



Santeri Haapalainen

Topologian optimointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

11.4.2023

Tiivistelmä

Tekijä: Santeri Haapalainen
Otsikko: Topologian optimointi
Sivumäärä: 43 sivua + 0 liitettä
Aika: 11.4.2023

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Konetekniikka
Ammatillinen pääaine: Koneautomaatio
Ohjaajat: Lehtori Heikki Paavilainen

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on ohjeistaa sen lukijaa käyttämään

Siemens NX -sovelluksen version 2206 topologiseen optimointiin tarkoitettua simulaattoria. Opinnäytetyössä kerrotaan enemmän itse topologian optimoinnista eli mitä se tarkoittaa ja avataan myös sen käyttökohteita ja sovelluksia konkreettisemmin. Lopputyö on osa Digitally-hanketta ja sen tavoitteena on opettaa topologisen optimoinnin ymmärtämistä ja käyttämistä.

Lopputyö alustetaan kertomalla sen tavoitteista ja selittämällä yksityiskohtaisesti mitä topologian optimoinnilla tarkoitetaan. Kolmen esimerkkikappaleen avulla esitellään Siemens NX -sovelluksen eri työkaluja topologisessa optimoinnissa. Vaikka kappaleet ovat yksinkertaisia malleja, niiden tarkoitus on muuttua hieman monimutkaisemmiksi samalla lisäten simulointiehtoja joita asetetaan topologia optimoinnin suorittamiseksi. Ensimmäisen kappaleen ollessa erittäin helppo hahmottaa, se auttaa käyttäjää ymmärtämään mikä on tavoitteena sekä ennen ja jälkeen kuvat mallista havainnollistavat lukijalle mitä simulointi tekee kappaleelle. Tätä kappaletta alustaessa avataan myös jokaista simulointiehtoa ja työkalua vaikka niitä ei vielä ensimmäisessä esimerkkikappaleessa käytetä.

Ensimmäisen malliesimerkin asettaessa hyvän pohjan käyttäjälle, toinen ja kolmas kappale syventää lukijan osaamista Siemens NX käytössä. Kappaleiden monimuotoisuus verrattuna ensimmäiseen vaatii useamman simulointiehdon huomioimisen. Opinnäytetyössä mainitaan vaihtoehtoisia tapoja suorittaa simulointi onnistuneesti, mikä tarjoaa lukijalle oman reitin maaliin. Viimeisessä kappaleessa on esitelty myös toinen tapa simuloida malli ja selitetty mistä vaihtoehtoinen lopputulos johtuu.

Tavoitteeseen päästiin koulutuksellisesta näkökulmasta hyvin eri vaiheet esittelemällä. Kuvat havainnollistavat myös selkeästi ja osoittavat käyttäjälle miten tulee toimia. Kokonaisuus opinnäytetyössä on selkeä ja aloittelevankin

käyttäjän on helppo seurata ohjetta ja onnistua oman kappaleensa topologisessa optimoinnissa.

Abstract

| | |
|---------------------|--|
| Author: | Santeri Haapalainen |
| Title: | Topology Optimization |
| Number of Pages: | 43 pages + 0 appendices |
| Date: | Eleventh of April 2023 |
| Degree: | Bachelor of Engineering |
| Degree Programme: | Mechanical Engineer |
| Professional Major: | Machine Automation |
| Supervisors: | Heikki Paavilainen, Lecturer Hydraulics and Pneumatics |

The purpose of this thesis is to work as a guide to its reader to use Siemens NX version 2206 simulator meant for topology optimization. The thesis entails also more information about topology optimization itself meaning how it works and what kind of applications it can be used for. This thesis was executed for Digitally project, and its goal is to assistance users to understand how topology optimization works and how to use it.

The thesis starts with clarification of the goals and with more details how the simulation works. There are three separate models to demonstrate different tools of Siemens NX topology optimization. Even though the models are quite simple, the idea is that the parts get increasingly complicated meanwhile adding more simulation conditions which are set for optimization to run. Due to simplicity of the first 3D-model, user to gets a better understanding of the goal and the before and after photos of the part visualizes what the topology optimization does to the part. While the first part is being set up this thesis tells the user more about each optimization constraint although they are not used in the first simulation.

While the first example part gives a good base for topology optimization, second and third part deepens user's knowledge on how to use Siemens NX. The variety of these two models compared to the first requires the user to set more conditions for optimization. The guide mentions also alternate ways to run the simulation successfully, giving the user possibility to own route for the final goal. During the last part, the thesis presents an optional way to simulate the model and explanation why the final product looks the way it looks.

The goal for this guide was met from the educational standpoint well due to clear showing of the different steps while moving forward during the simulations. The pictures illustrate the big picture well and teaches the reader all the way. Entirety is clear and even new users can follow the guide easily and succeed on topology optimization for their own part.

Sisällys

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Topologinen optimointi | 1 |
| 2.1 | Siemens NX | 2 |
| 2.2 | Rajoitteet tulostamisessa | 3 |
| 3 | Ohjeistus ensimmäisen esimerkkikappaleen avulla | 4 |
| 3.1 | Optimointityypin valinta | 5 |
| 3.2 | Optimoinnin valmistelu | 6 |
| 3.2.1 | Design Space | 7 |
| 3.2.2 | Shape Constraint | 9 |
| 3.2.3 | Construction Body | 10 |
| 3.2.4 | Scenery Body | 11 |
| 3.2.5 | Analysis Constraint | 12 |
| 3.2.6 | Analysis Load | 13 |
| 3.2.7 | Environmental Loads | 14 |
| 3.2.8 | Subcase Manager | 15 |
| 3.2.9 | Optimization Constraint | 16 |
| 3.3 | Simuloinnin aloittaminen | 17 |
| 3.4 | Simuloinnin seuranta | 17 |
| 3.5 | Tulokset | 18 |
| 4 | Toinen esimerkkikappale | 21 |

| | | |
|-------|---------------------------------------|----|
| 4.1 | Toisen kappaleen alustaminen | 21 |
| 4.1.1 | Connection | 24 |
| 4.1.2 | Kiinteät osat | 25 |
| 4.1.3 | Malliin kohdistuva rasiitus | 26 |
| 4.2 | Simulointi valmis | 28 |
| 5 | Kolmas esimerkkikappale | 29 |
| 5.1 | Optimoinnin valmistelu | 30 |
| 5.2 | Muodon varmistaminen 3D-tulostamiseen | 32 |
| 5.3 | Kuormitusten asettaminen | 33 |
| 5.4 | Simuloinnin aloitus | 34 |
| 5.5 | Vaihtoehtoinen simulointi | 35 |
| 5.6 | Lopputulosten vertailu | 40 |
| 6 | Yhteenveto | 42 |
| | Lähteet | 1 |

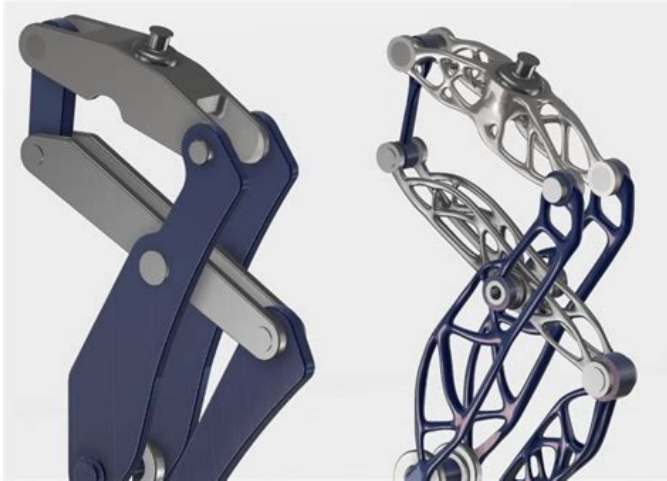
1 Johdanto

Tässä insinööriyössä käsitellään topologista optimointia ja ohjeistetaan yksinkertaisilla mallikappaleilla sen toteuttamista Siemensin NX-ohjelmalla. Ensimmäisen mallikappaleen simulointia valmisteltaessa kerrotaan työkaluista enemmän ja niiden mahdollisuuksista.

Tämä lopputyö on tehty osana Digitally-hanketta, joka kehittää uusia Garage-hybridioppimisympäristöjä tarkoituksena auttaa koneteknologia-alan digitalisointumista (DigiTally-hanke 2020:1.)

2 Topologinen optimointi

Topologinen optimointi, topologinen simulointi tai pintojen optimointi tarkoittaa käytännössä menetelmää, jolla saadaan 3D-mallista paras mahdollinen versio. Tämä kyseinen optimointi liitetään lähes poikkeuksetta 3D-tulostamiseen, sillä optimoinnilla saadut rakenteet ovat lähes mahdottomia työstää perinteisillä valmistusmenetelmillä. Simuloidut kappaleet ovat monimutkaisia, jolloin 3D-tulostaminen jää ainoaksi vaihtoehdoksi, kuten kuva 1 osoittaa. Nykypäivänä 3D-tulostamisen yleistyessä topologinen optimointi on tärkeä ja oleellinen osa materiaalikustannusten säästämässä ilman että rakenteellinen kestävyys kärsii liikaa. Simulointia voidaan myös hyödyntää, mikäli jostain vanhasta kappaleesta halutaan saada uudempi ja huolitellumpi versio. (Topology Optimization 2022: 1.)



Kuva 1. Kappale ennen, ja optimoinnin jälkeen

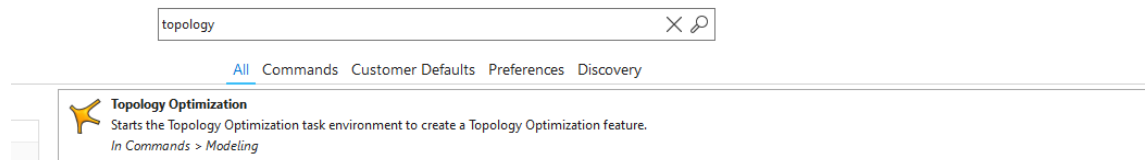
Esimerkkinä topologisen optimoinnin hyödyntämisestä autoteollisuudessa voidaan käyttää FCA:n (Fiat Chrysler Automobiles) tekemää tutkimusta Fraunhofer-instituutin kanssa, jossa heidän urheiluautoonsa sovellettiin 3D-mallia, jossa pyörän kannattaja sekä jarrusatula ovat yksi ja sama osa. Näin kokonaisuuden painoa saatiin vähennettyä 36 prosenttia ja 12 erillistä osaa saatiin yhteen. Valmistusaikaa saadaan myös vähennettyä, kun valmistettavana on vain yksi osa. Massatuotannossa 36 prosentin vähennys yhdestä osasta on erittäin suuri säästö myös materiaalikustannuksissa. (Fiat Chrysler uses AM to design suspension system 2020:2.)

Tässä opinnäytetyössä opetetaan vain Siemens NX:ssä olevaa työkalun käyttöä kolmen kappaleen avulla, jotka voitaisiin jatkossa myös 3D-tulostaa mutta se ei ole kannattavaa niiden ainutkertaisuuden takia sekä kustannusten takia.

2.1 Siemens NX

Topologinen optimointi on monimutkainen matemaattinen kaava, jossa materiaali, kuormitus ja kappaleen rajapinnat huomioimalla voidaan maksimoida kappaleen kestävyys ja minimoimaan sen materiaali. Tämä prosessi on erittäin monivaiheinen ja vaatii usein sopivan ohjelman sen suorittamiseen. Vaikka monissa CAD-ohjelmissa kuten SolidWorks, Fusion 360 sekä Catia 3D-experience

on mahdollisuus simuloida ohjelmassa mallinnettuja kappaleita, suunnittelijalla on vastuu ja tehtävä määrittää oikeat reunaehdot simuloinnille. Siemens NX-ohjelman versio 2206 sisältää myös useita erilaisia simulaattoreita, joista yksi on topology optimization (kuva 2).



Kuva 2 .Topology Optimization hakukentässä

2.2 Rajoitteet tulostamisessa

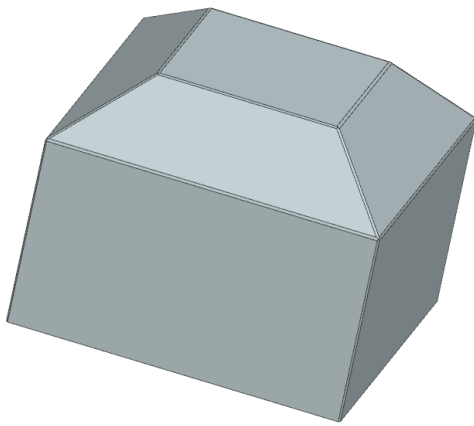
Topologinen optimointi liitetään lähes poikkeuksetta 3D- tulostamiseen, jonka takia tulee pitää mielessä tulostimien rajallisuus ja tästä syystä tulostimet ovat alisteisia tietyille eri ehdoille huolimatta siitä, että 3D- tulostaminen on nopeasti kehittyvä ja kasvava markkina. Riippuen tulostimen laadusta ja materiaalista, yleensä yli 45 asteen kulmassa olevat osat tarvitsevat tukirakenteet. (Chakravorty 2023: 3) Tukirakenteita hyödyntäessä tulee muistaa, että ne eivät kuulu kappaleeseen ja ne tulee leikata pois lopullisesta tuotoksesta. Tukirakenteita tulee käyttää vain mikäli ne ovat välttämättömiä ja silloinkin mahdollisimman rajallisesti. Näin minimoidaan riski epäonnistua varsinaisen kappaleen tulostamisessa, lisäksi säästään kallista tulostusmateriaalia. Mikäli kappaleen mitat, materiaali ja valmistustapa tiedetään, voidaan sen kustannuksista saada hinta-arvio eri yritysten lasku työkaluilla. Esimerkiksi Etteplanin-laskuri on erittäin helpokäyttöinen ja antaa halutun tuloksen syötetyn datan perusteella. (Etteplan AMOTool 3D-tulostuksen kustannuslaskentaan:3.)

Mikäli tulostettavissa kappaleissa on lieriörakenteet, tulee huomioida kappaleiden kestävyys ja asentaa tukirakenteet sylintereiden sisään. Mikäli 3D- tulostaminen tapahtuu tarpeeksi pienessä mittakaavassa, tukirakenteet eivät ole tarpeen, sillä yhden ja kolmen sentin halkaisijat kantavat näissä riittävästi riippuen

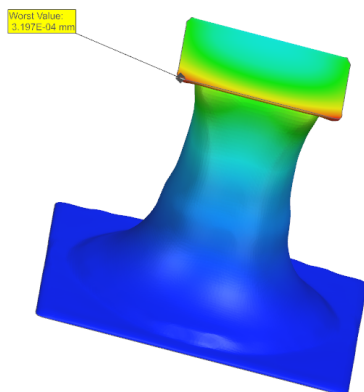
toki materiaalista. Mikäli halutaan olla varmoja ettei tukirakenteita tarvita, voidaan lieriötä muokata soikion muotoiseksi pystysuuntaan. Näin varmistetaan putken kantavuus hienosäätämällä se sopivammaksi 3D-tulostamiseen. (Lindqvist 2018:4.)

3 Ohjeistus ensimmäisen esimerkkikappaleen avulla

Ensimmäisenä mallikappaleena työn alle otetaan kuvassa 3 näkyvä kuutio, jonka päällä on loivasti nouseva pyramidi. Pyramidi on noin keskeltä puolitettu siten, että yläpuoli on tasainen.



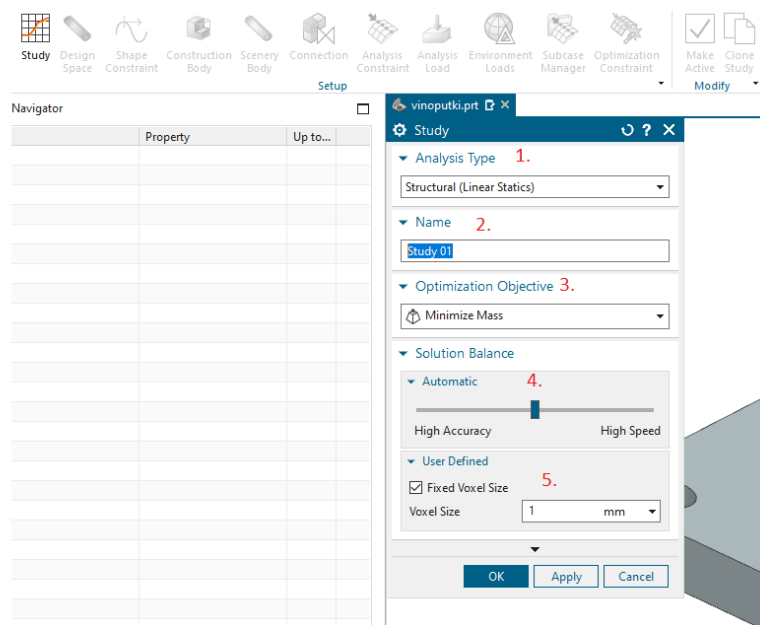
Kuva 3. Ensimmäinen kappale ennen optimointia



Kuva 4. Ensimmäinen kappale optimoinnin jälkeen

3.1 Optimointityypin valinta

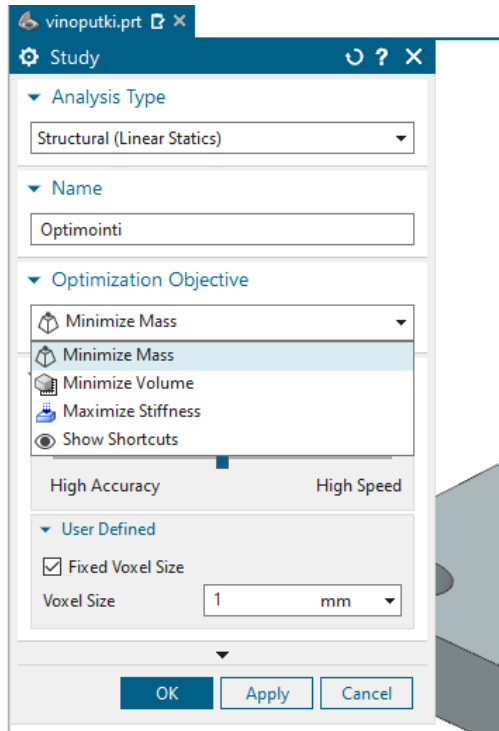
Tätä ohjetta varten on mallinnettu kolme hieman erilaista kappaletta, joiden avulla selitetään, miten topologian optimointi tapahtuu. Topology optimization-työkalu valittuna, valitaan kuvassa 5 olevasta rivistä ainoa mahdollinen valittavissa oleva kohta eli Study. Study tarkoittaa tässä tapauksessa koko optimointia eli tästä aloitetaan koko operaatio. Tämä valittuna aukeaa alla olevassa kuvassa oleva valikko, josta valitaan optimoinnin tyyppi (1.), nimi (2.) ja tavoite (3.). Lisäksi voidaan muokata optimoinnin tarkkuutta suhteessa aikaan jonka se kestää (4.). Valinnan ollessa noin keskellä, simulointi kestää kappaleesta riippuen noin 15 - 20 minuuttia. Voxel size tarkoittaa vokselin kokoa eli kolmiulotteista pikseliä tai resoluutiota mikä voi tässä tapauksessa olla fixed kuten kuvassa, jolloin sen koko määräytyy mallikappaleen mukaan (5.)



Kuva 5. Study välilehti

Optimointia valittaessa tulee tietää mikä on optimoinnin tavoite. Minimize mass tarkoittaa massan minimointia (kuva 6). Minimize volume vaihtoehdolla saadaan

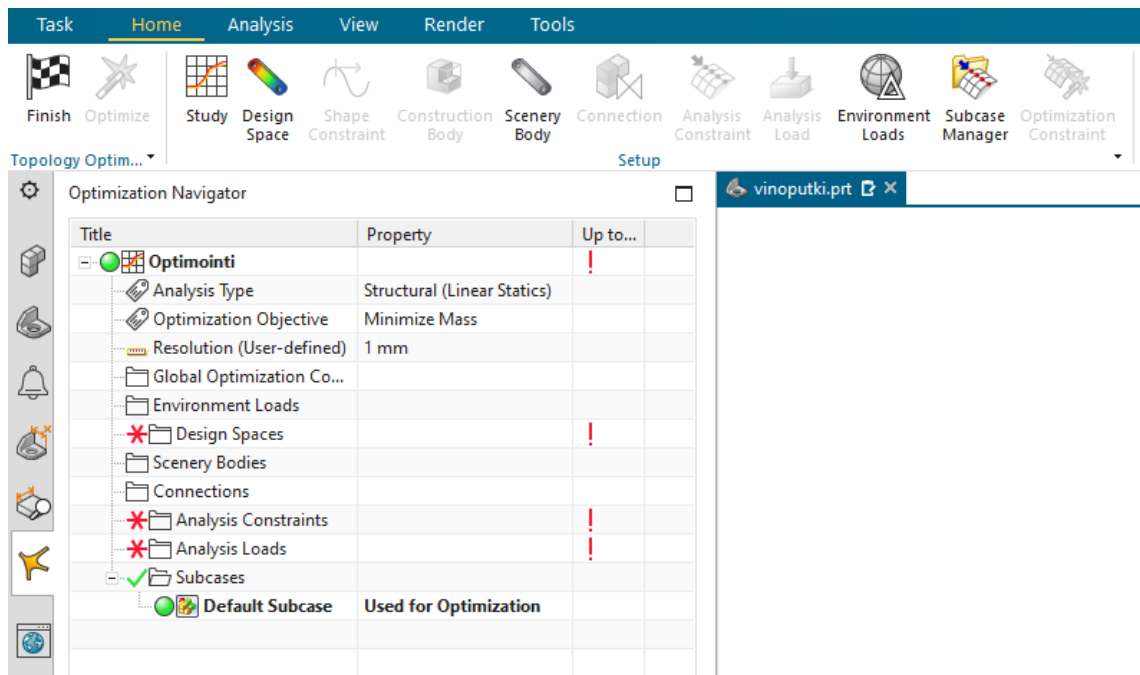
pienin mahdollinen kappale ”määrältään” eli kappaletta on mahdollisimman vähän. Maximize stiffness tarkoittaa jäykkyyden maksimointia eli kappaleesta saadaan kestävin mahdollinen simuloimalla.



Kuva 6. Optimoinnin tavoitteen valinta

3.2 Optimoinnin valmistelu

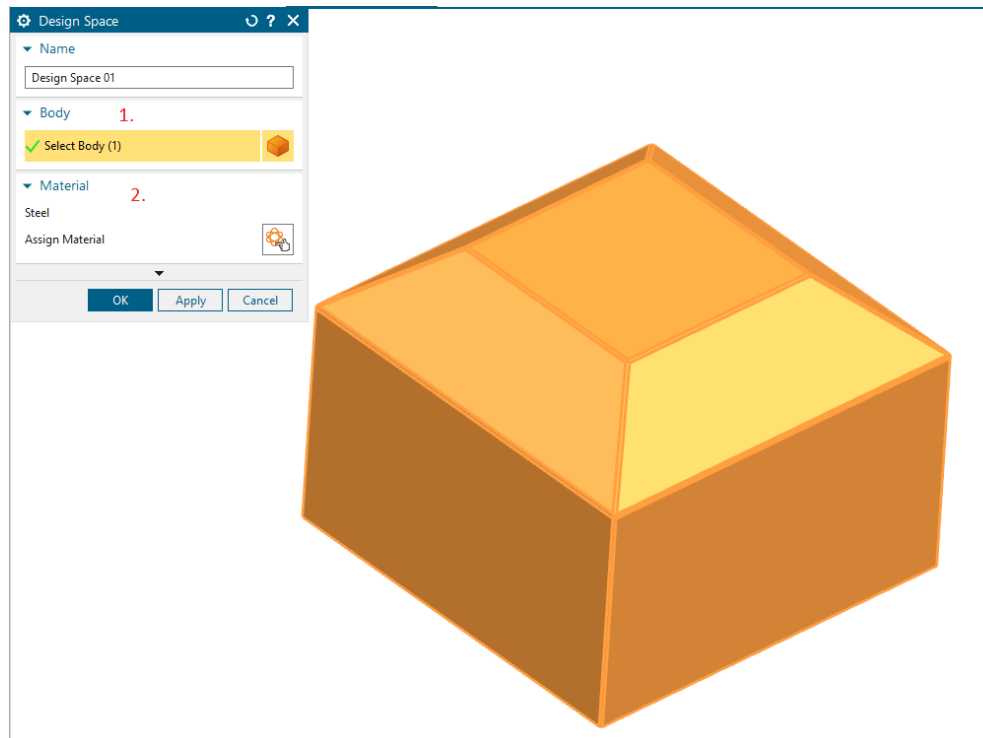
Nyt kun Study on aloitettu, voidaan huomata, että optimize-painike on harmaana (kuva 7) eli sitä ei voida vielä valita vaan täytyy tarkentaa simulointia. Huutomerkkit osoittavat puutteellisia tietoja, jolloin simulointia ei voida suorittaa. Näihin kyseisiin kohtiin tarvitaan täydennystä, jolloin optimize saadaan valittua.



Kuva 7. Aloitusnäky

3.2.1 Design Space

Ensimmäisenä valittavissa olevista kohdista painetaan Design Space, eli käytännössä kerrotaan ohjelmalle missä tilassa kappaletta halutaan simuloida. Esimerkiksi, jos kappaleesta halutaan simuloida vain tietty osa parhaaksi mahdolliseksi, valitaan Design Space (kuva 8) välilehden alta kohdasta Select Body (1.) pelkästään kyseinen kohta aktiiviseksi. Kun kappale on valittu, sen pitäisi näyttää samalta kuin kuvassa. Materiaalin valinta (2.) tulee muistaa valita ennen simuloinnin aloitusta kohdasta Assign Material. Design Spacea luodessa tulee muistaa, että jokaiselle kappaleen eri osalle tulee luoda oma Design Space, jotta työkaluja voidaan käyttää täsmällisesti ja osa työkaluista vaatii useamman Design Spacen niiden käyttämiseen. Tässä esimerkkikappaleessa on vain yksi Design Space simuloinnin demonstroinnin helpottamiseksi.

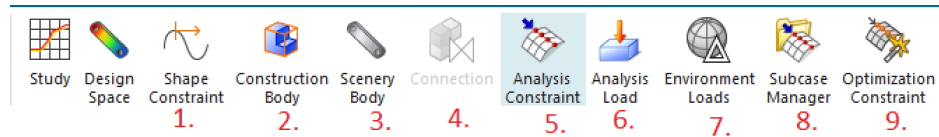


Kuva 8. Design Space

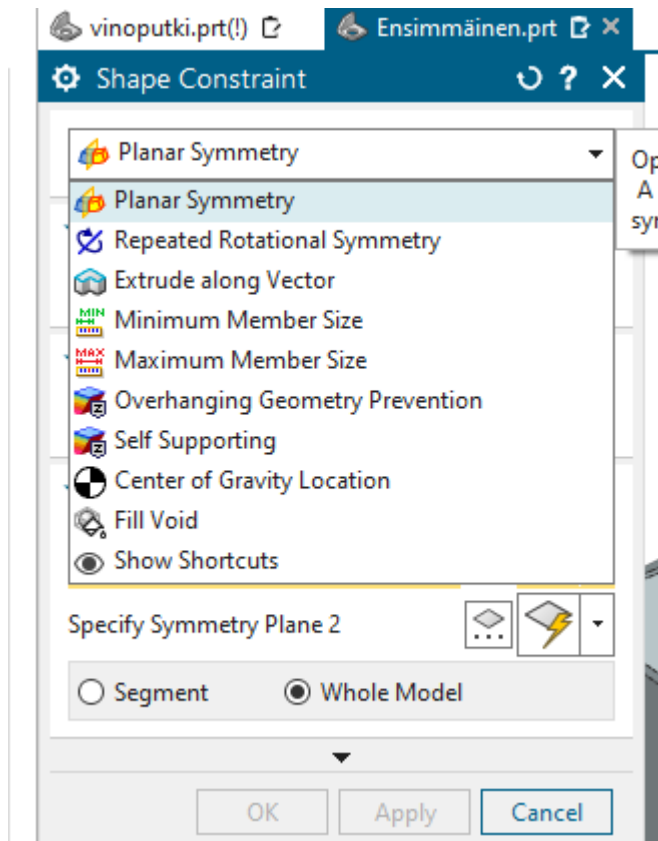
Design Space määriteltynä saadaan useampi työkalu näkyviin ja voidaan aloittaa simuloinnin tarkempi määrittely. Tässä kohtaa käyttäjän tulee huomioida mitä tietoja simulointiin tarvitsee, eli tuleeko määrittää jokainen näistä kohdista vai riittääkö harvempi muuttuja.

3.2.2 Shape Constraint

Kuva 9. Työkalut



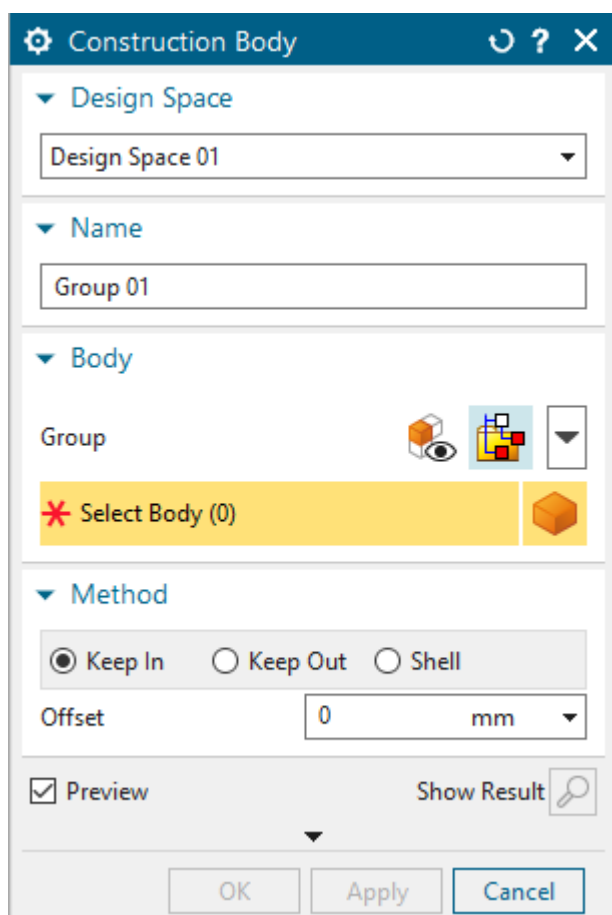
Shape Constraint (1.) -työkalun avulla (kuva 9) voidaan asettaa ehtoja kappaleen muodolle simuloinnin osalta. Planar Symmetry tarkoittaa kappaleen symmetrisyyttä määritellyn pinnan suhteen. Repeated Rotational Symmetry tarkoittaa symmetrisyyttä jonkin akselin suhteen. Extrude along Vector tarkoittaa kappaleen muodon jatkuvan yhtenäisesti jonkin määritellyn pinnan suhteen. Minimum ja Maximum Member Size -työkalut voivat määrittää kappaleeseen syntyvien tukirakenteiden vähimmäis- tai enimmäispituuden. Overhanging Geometry Prevention avulla voidaan varmistaa, ettei simuloidun kappaleen osat roiku tai riipu toistensa päälle. Self Supporting tarkoittaa nimensä mukaisesti sitä, että simuloidun kappaleen rakenteet tukevat itseään ja tämä on erittäin hyvä valinta, mikäli kappale halutaan 3D- tulostaa ja näin ollen kappaleelle ei tarvitse itse suunnitella tukirakenteita. Center of Gravity Location -työkalulla voidaan määrittää kappaleen painopiste tiettyyn paikkaan. Fill Void -työkalu valittuna simuloinnissa vältetään reikien syntyminen kappaleeseen, esimerkiksi jos halutaan simuloidun kappaleen pitävän nestettä.



Kuva 10. Shape Constraint

3.2.3 Construction Body

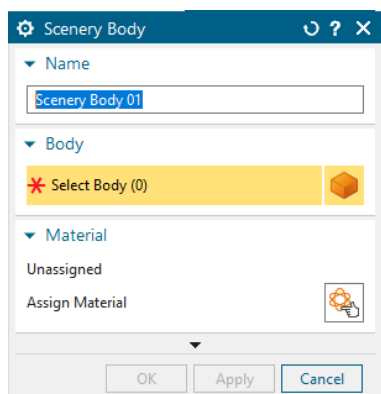
Construction Body -työkalulla (kuva 11) voidaan valita mitä simuloinnin aikana halutaan ehdottomasti pois tai mitä halutaan pitää (Keep In, Keep Out). Vaihtoehtona voidaan valita Shell, eli kyseisestä Design Spacesta voidaan jättää haluttuun kohtaan vain kuoret. Group-kohdasta voidaan valita joko separate tai grouped, eli onko valitut kappaleet erillään vai yhdessä.



Kuva 11. Construction Body

3.2.4 Scenery Body

Tässä kohtaa on hyvä määrittää alueet, joihin ei haluta koskea simuloinnissa ja se tapahtuu Scenery Body -työkalulla (kuva 12) joka on yksinkertainen eikä vaadi sen enempää kuvailemista. Select Body -kohdasta valitaan osa kappaleesta, jonka halutaan pysyvän sellaisenaan. Esimerkiksi ruuvien reiät tai muuten ennalta tarkkaan määritetyt kohdat kappaleesta on hyvä määrittää koskemattomiksi.

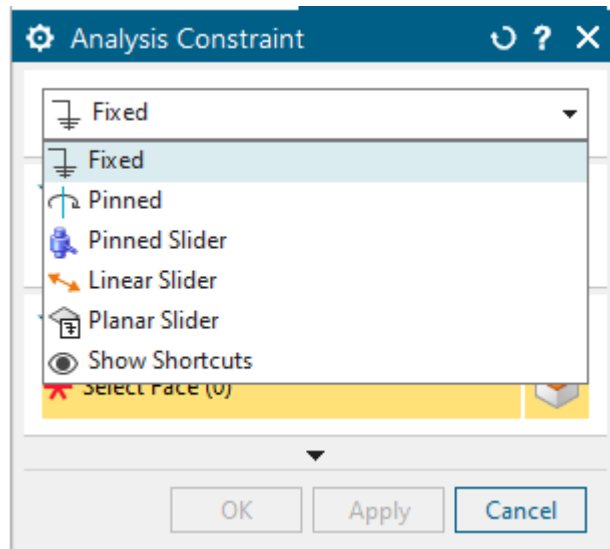


Kuva 12. Scenery Body

Connection-työkalua käytetään, kun halutaan luoda yhteys Design Space ja Scenery Bodyn välille. Tässä kappaleessa on vain yksi Design Space, kuten aikaisemmin jo todettiin, joten tätä työkalua ei käytetä tässä vaiheessa.

3.2.5 Analysis Constraint

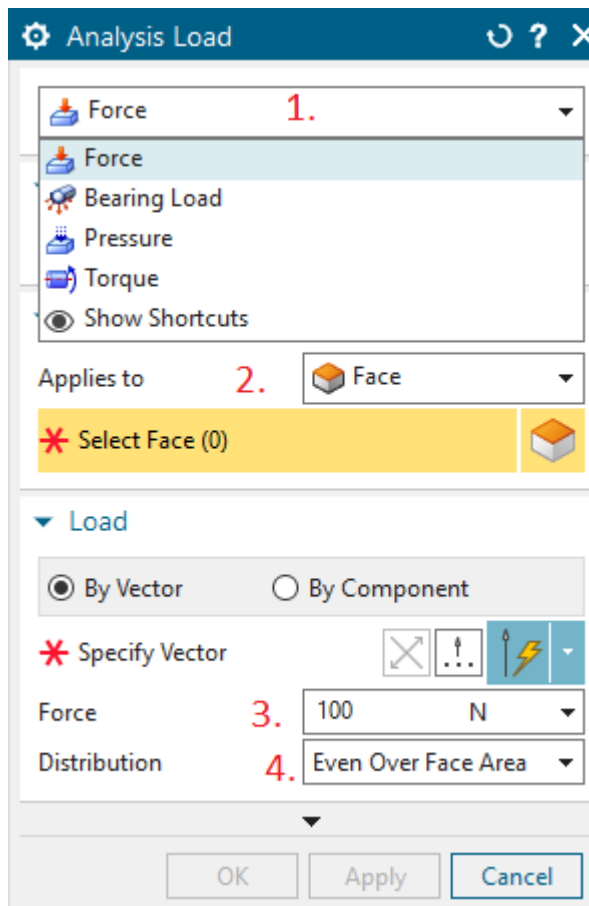
Seuraavana määriteltävänä kohtana on Analysis Constraint, jolla voidaan kertoa ohjelmalle kappaleen uusi liikkumisehto (kuva 13). Fixed-ehdolla voidaan asettaa jokin kohta paikalleen eli se ei liiku. Pinned-vaihtoehto tarkoittaa liikettä määritetyn akselin ympäri ja Pinned Slider tarkoittaa, että kappale voi pyöriä ja liikkua samalla jonkin akselin suuntaisesti. Linear Slider tarkoittaa liikettä ainoastaan määrätyn akselin suuntaisesti ja Planar Slider valittuna liike tapahtuu asetetun tason mukaan.



Kuva 13. Analysis Constraint

3.2.6 Analysis Load

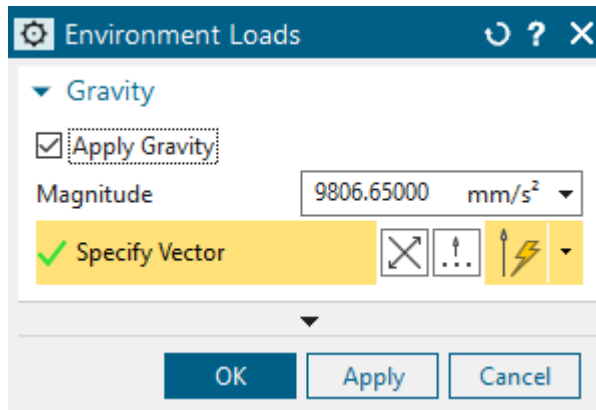
Seuraavana asetetaan simuloinnin kannalta merkittävä muuttuja eli kuormitus, joka löytyy Analysis Load -välilehden alta (kuva 14). Ensimmäisenä määritetään minkälaista kuormitusta kappaleeseen kohdistuu (1.) Force eli voima tai Bearing Load, eli kuorma tietyistä kulmista. Bearing Load -toimintoa voidaan käyttää pelkästään lieriön muotoisissa kappaleissa, joten tässä esimerkissä se on mahdoton vaihtoehto. Lisäksi vaihtoehtoina on Pressure, eli paine tai Torque, joka tarkoittaa vääntöä. Geometry-kohdasta (2.) valitaan joko Face, eli taso tai Point, eli piste miten voimaa kohdistetaan. Kuormitustavasta riippumatta käyttäjän tulee asettaa seuraavaksi, kuinka paljon kappaletta rasitetaan (3.) Tässä esimerkissä käytetään perinteistä voimaa ja tällöin tulee myös määrittää, miten voima jakautuu kappaleeseen (4.). Tässä valittu Even Over Face Area, eli tasainen kuormitus valitulle pinnalle. Load-otsikon alta voidaan myös valita voiman kohdistumisen suunta joko vektorin mukaan tai komponentin mukaan, eli eri suunnista voidaan kohdistaa eri määrä voimia.



Kuva 14. Analysis Load

3.2.7 Environmental Loads

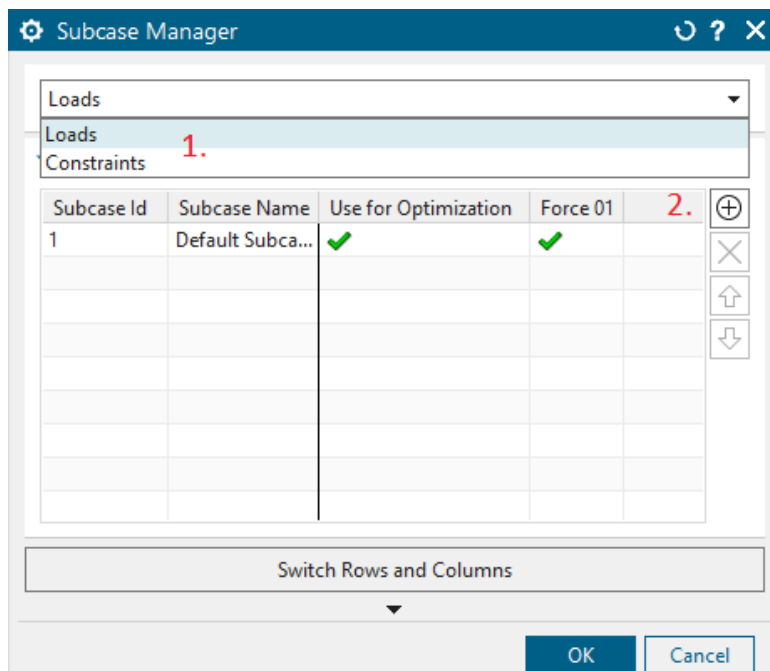
Tällä tarkoitetaan ulkopuolisia voimia, jotka kohdistuvat kappaleeseen. Käytännössä mahdollisia voimia on painovoima. Mikäli painovoima valitaan simulointiin mukaan (kuva 15), tulee myös valita suunta vektorilta, näin saadaan myös määritettyä kappaleen suunta.



Kuva 15. Environmental Loads

3.2.8 Subcase Manager

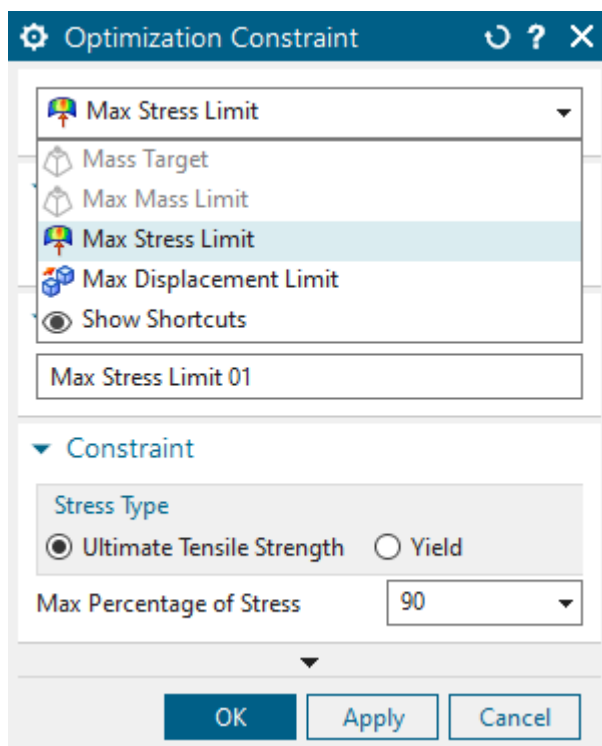
Subcase Manager -työkalulla (kuva 16) voidaan nimensä mukaisesti hallita kappaleen alaotsikoita, jotka voidaan jakaa kuvan mukaisesti kuormituksiin ja rajoituihin (1.) Ikkunan oikeasta laidasta löytävästä plus-painikkeesta (2.) käyttäjä voi lisätä kuormitusta tai rajoitteita kappaleelle. Tässä kappaleessa ei välttämättä tarvitse tätä työkalua, sillä ehtoja sekä kuormituksia on rajallisesti.



Kuva 16. Subcase Manager

3.2.9 Optimization Constraint

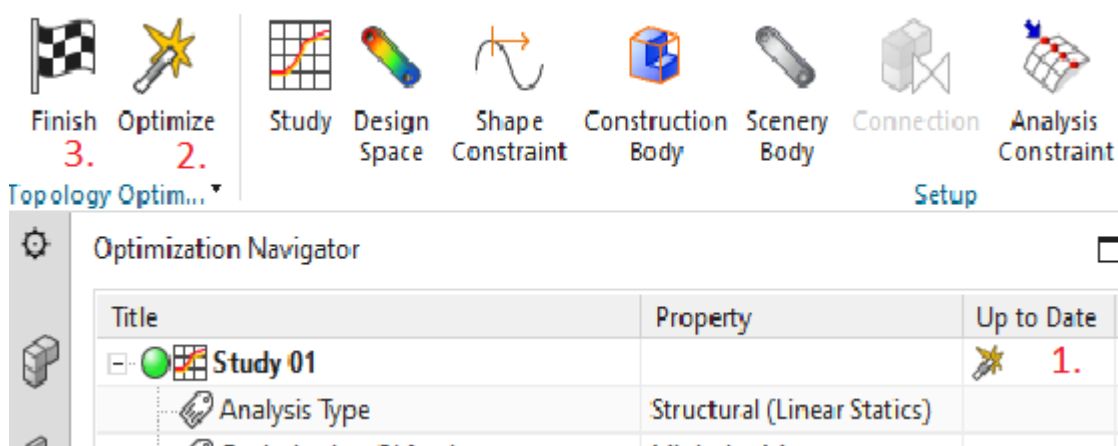
Viimeisenä vaiheena ennen optimoinnin suorittamista tulee asettaa simulointiehto (kuva 17) eli käytännössä kertoa ohjelmalle mitä tavoitellaan. Kaksi ylimmäistä Mass Target ja Max Mass Limit vaativat useamman Design Spacen toimiakseen, joten ne ovat harmaalla koska ensimmäisessä esimerkkikappaleessa on vain yksi. Mass Target valinnalla voidaan saada eri Design Spacet tiettyyn tavoite massaan ja Max Mass Limit -työkalulla voidaan asettaa massalla jokin raja. Tässä esimerkissä käytetään Max Stress Limit -ehtoa, jolla voidaan määrittää kappaleen kestävyys, eli alla olevasta kohdasta valitaan enimmäismäärä rasitusta prosentteina mikä on tässä esimerkissä 90 prosenttia kappaleen kestävydestä. Max Displacement Limit -vaihtoehdolla pystytään rajoittamaan kappaleen liikettä eri suuntiin esimerkiksi vektorien tai muiden pintojen suhteen. (Siemens simcenter 2021:16.)



Kuva 17. Optimization Constraint

3.3 Simuloinnin aloittaminen

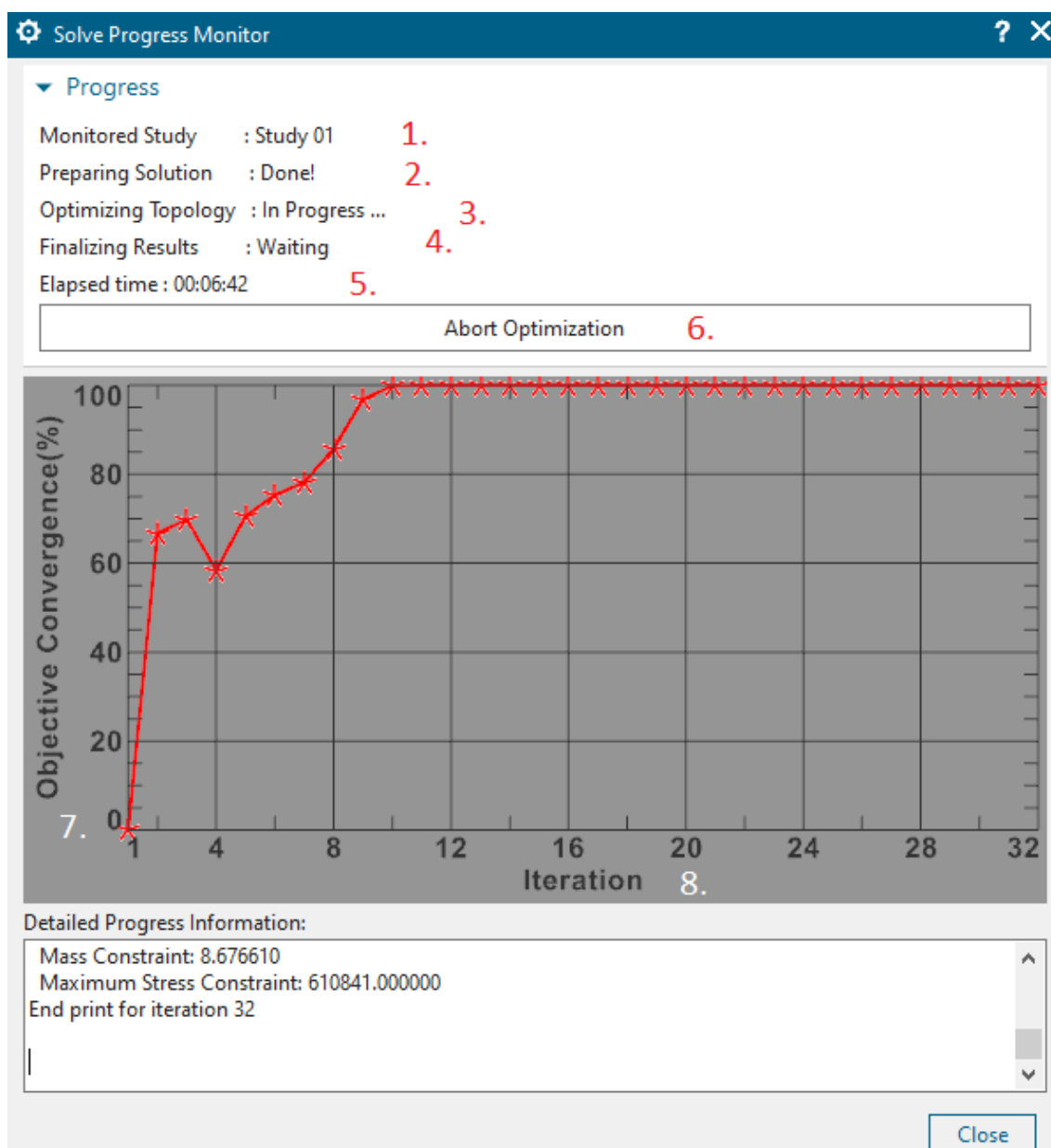
Kun kaikki ehdot simuloinnille on asetettu, Study-kohtaan tulee kuvan 18 mukainen symboli (1.), joka kertoo, että ohjelma voi tehdä optimoinnin. Painamalla Optimize (2.) simulointi lähtee pyörimään. Mikäli optimointia ei vielä haluta aloittaa esimerkiksi jos kappaletta tarvitsee muokata, niin voidaan painaa Finish (3.), jolloin simuloinnin tiedot jäävät talteen ja ohjelma sulkee Topology Optimization työkalun.



Kuva 18. Optimize-painike valittavissa

3.4 Simuloinnin seuranta

Simuloinnin käynnistyessä näytölle ilmestyy kuvan 19 mukainen käyrä. Tästä ikkunasta voidaan seurata simuloinnin kehitystä ja tarkastella sen tietoja. Monitored Study (1.) kertoo minkä niminen Study on kyseessä. Kohdissa 2, 3 ja 4 on hyvä seurata, ettei niissä ole mitään vikailmoitusta simuloinnin aikana. Kohdassa 5 näkyy simulointiin käytetty aika, joka on yleensä noin 15 - 20 minuuttia riippuen kappaleen ja simuloinnin monimutkaisuudesta. Vasemmalla oleva asteikko (7.) Objective Convergence tarkoittaa kappaleen prosentuaalista valmistumista. Vaikka kuvaaja on aivan asteikon ylälaidassa, simuloinnissa saattaa kestää vielä hyvä tovi. Alarivillä oleva Iteration tarkoittaa iterointia ja tarkoittaa käytännössä kuinka monta kierrosta tai looppia ohjelma ajaa.



Kuva 19. Simuloinnin kuvaaja

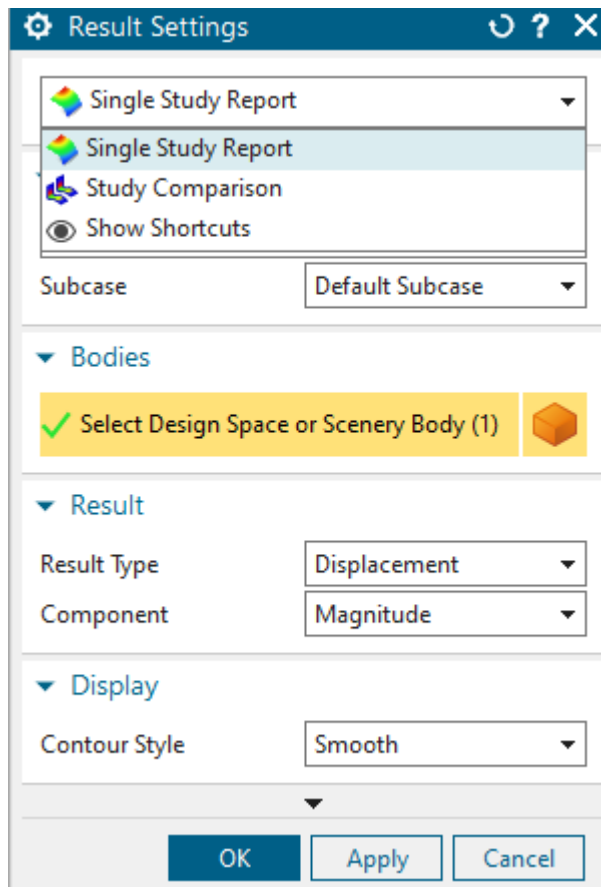
3.5 Tulokset

Simuloinnin ollessa valmis voidaan lopputuloksia tarkastella eri lähtökohdista. Show Result -välilehdeltä (kuva 20) voidaan katsoa optimoitua kappaletta.



Kuva 20. Simuloinnin jälkeen

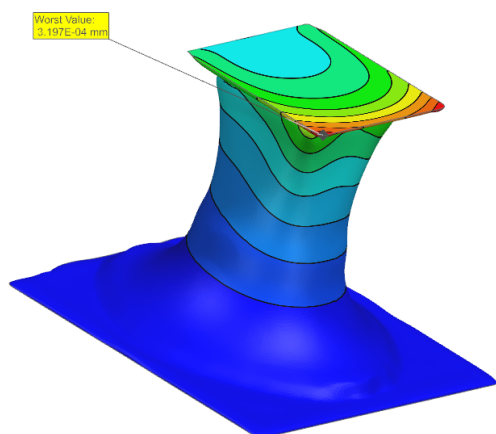
Mikäli on tehty useampi simulointi eli Study, voidaan niitä vertailla valitsemalla Study Comparison. Tässä esimerkissä on tehty vain yksi, joten valitaan perinteisesti Single Study Report.



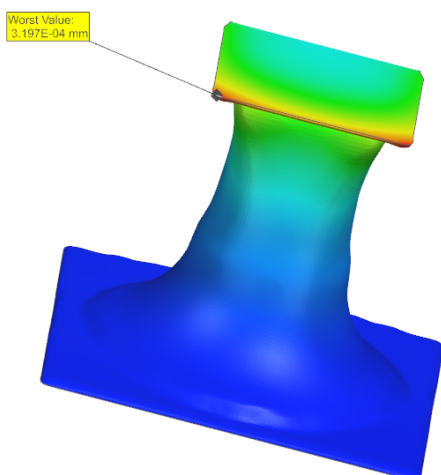
Kuva 21. Result Settings

Result Type -kohdasta voidaan valita joko Displacement eli muotoiltu kappale tai Stress, joka tarkoittaa rasiusta. Contour Style valikosta voidaan valita kap-

paleen ulkomuoto Smooth tai Banded. Alla olevissa kuvissa 22 ja 23 on simuloitu kappale yläpuolella Banded ja alapuolella Smooth. Kuvista voidaan huomata simuloinnin toimineen ja asetetut tasot kappaleen päällä ja pohjassa ovat pysyneet alkuperäisenä. Kappale on nyt topologisesti optimoitu ja on valmis 3D-tulostamiseen. View Graph ja Results kohdista käyttäjä voi tarkastella simuloinnin tuloksia kuvaajan muodossa mutta kappaleen ulkomuoto on tässä ratkaiseva, joten niitä ei käsitellä tässä ohjeessa.



Kuva 22. Simuloitu kappale banded-tyylillä

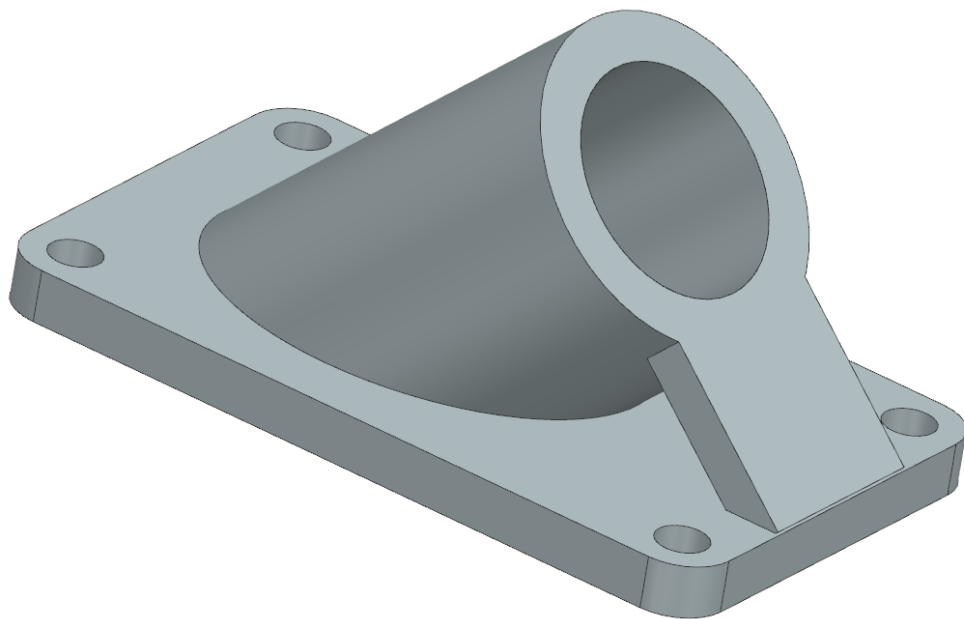


Kuva 23. Simuloitu kappale contour-tyylillä

4 Toinen esimerkkikappale

4.1 Toisen kappaleen alustaminen

Toisessa esimerkissä on hieman monimutkaisempi, mutta silti hyvin helposti mallinnettava vinoputki (kuva 24), jossa on neljä reikää kiinnitystä varten. Keskeisessä osassa tässä kappaleessa on useampi Design Space. Tähän esimerkkiin on tehty kaksi eri Design Spacea riippuen käyttäjästä, miten kappale mallinnetaan tai miten sen itse haluaa jakaa. Tässä ohjeessa kappale on jaettu alustaan, tankoon ja nämä yhdistävään tukivarteeseen, josta tehdään esimerkkiä varten Scenery Body (kuva 25), eli sitä ei muokata simuloinnissa.

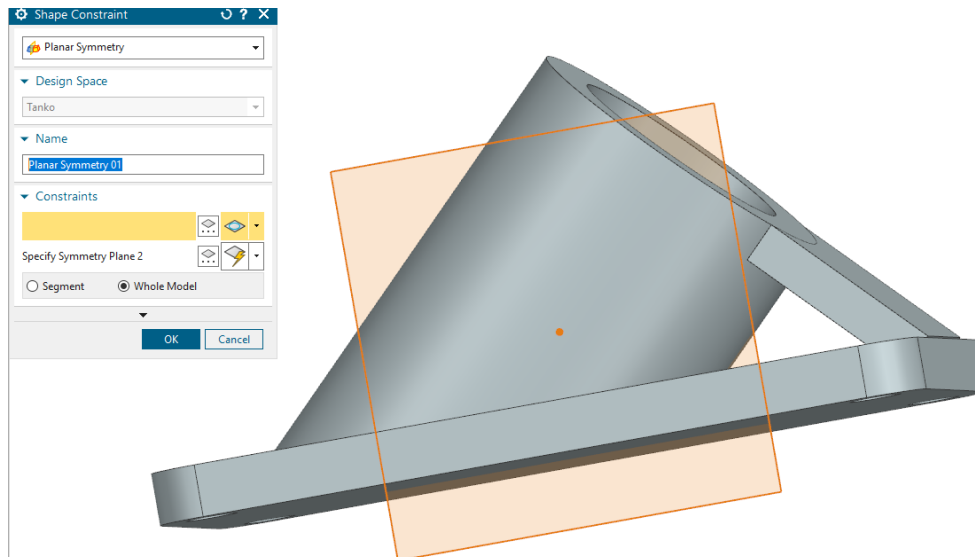


Kuva 24. Toinen kappale ennen simulointia

| Title | Property | Up to Date |
|---------------------------------|-----------------------------|------------|
| Study 01 | | ! |
| Analysis Type | Structural (Linear Statics) | |
| Optimization Objective | Minimize Mass | |
| Resolution (User-defined) | 1 mm | |
| Global Optimization Constraints | | |
| Environment Loads | | |
| Design Spaces | | ! |
| Tanko | Extrude (12) | ! |
| Material | Steel | |
| Construction Bodies | | |
| Shape Constraints | | |
| Planar Symmetry 01 | Whole Model | |
| Optimization Constraints | | ! |
| Alusta | Extrude (2) | ! |
| Material | Steel | |
| Construction Bodies | | |
| Shape Constraints | | |
| Repeated Rotational Sy... | 2 | |
| Optimization Constraints | | ! |
| Scenery Bodies | | |
| Tukivarsi | Extrude (13) | |
| Material | Steel | |
| Connections | | ! |
| Analysis Constraints | | ! |
| Analysis Loads | | ! |
| Subcases | | |
| Default Subcase | Used for Optimization | |

Kuva 25. Rakennepuu

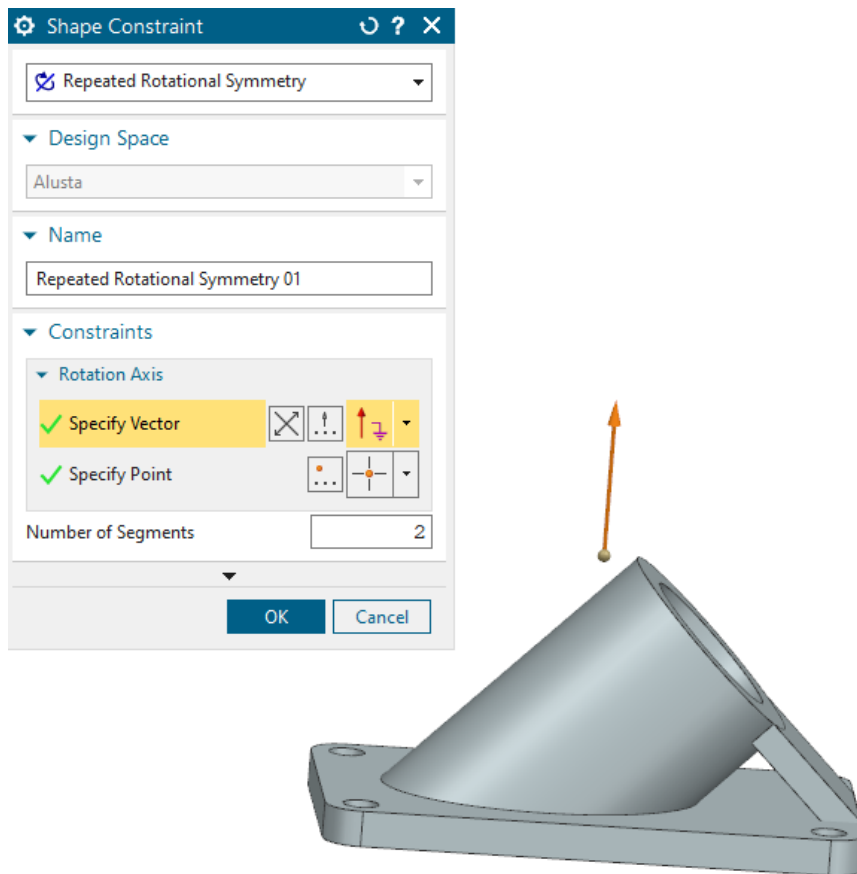
Samalla tavalla kuin ensimmäisessä kappaleessa, aluksi tulee määrittää Shape Constrain -työkalun avulla simuloitavan kappaleen muodot. Tankoa varten on valittu Planar Symmetry, eli symmetrisyys määrätyn tason mukaan. Tähän valittu taso tai piste on tangon keskilinja (kuva 26).



Kuva 26. Planar Symmetry

Segment ja Whole Model -kohdasta valitaan tässä kohtaa Whole Model. Tällä tarkoitetaan vaikuttaako symmetrisyys koko kappaleeseen vai pelkästään kyseiseen osaan. Koska keskiliinja menee alustan eli toisen osan läpi, täytyy valita Whole Body.

Alustan Shape Constraint voidaan valita hieman eri tavalla, koska se asettuu suoraan XYZ-asteikolle, jolloin siihen voidaan asettaa symmetrisyys akselin mukaan (kuva 27).

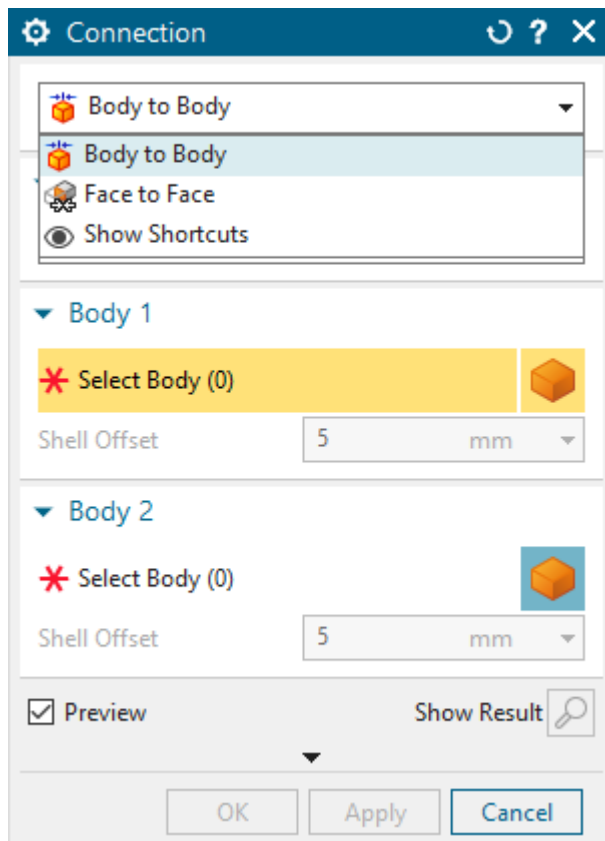


Kuva 27. Shape Constraint

Tukivarren symmetrisyys voidaan soveltaa sen ulkotason mukaan ilman että se vaikuttaa muuhun kappaleeseen.

4.1.1 Connection

Ensimmäisestä esimerkkikappaleesta poiketen, toisessa kappaleessa on useampi eri osa eli Connection-työkalua voidaan hyödyntää (kuva 28). Connectionin avulla ohjelmalle voidaan kertoa kiinnityksistä Design Bodyn ja Scenery Bodyn välillä. Alkuun välilehdeltä tulee valita Body to Body, eli kappaleet ovat kiinni toisissaan tai Face To Face, mikä tarkoittaa kahden tasaisen pinnan kiinnitystä.

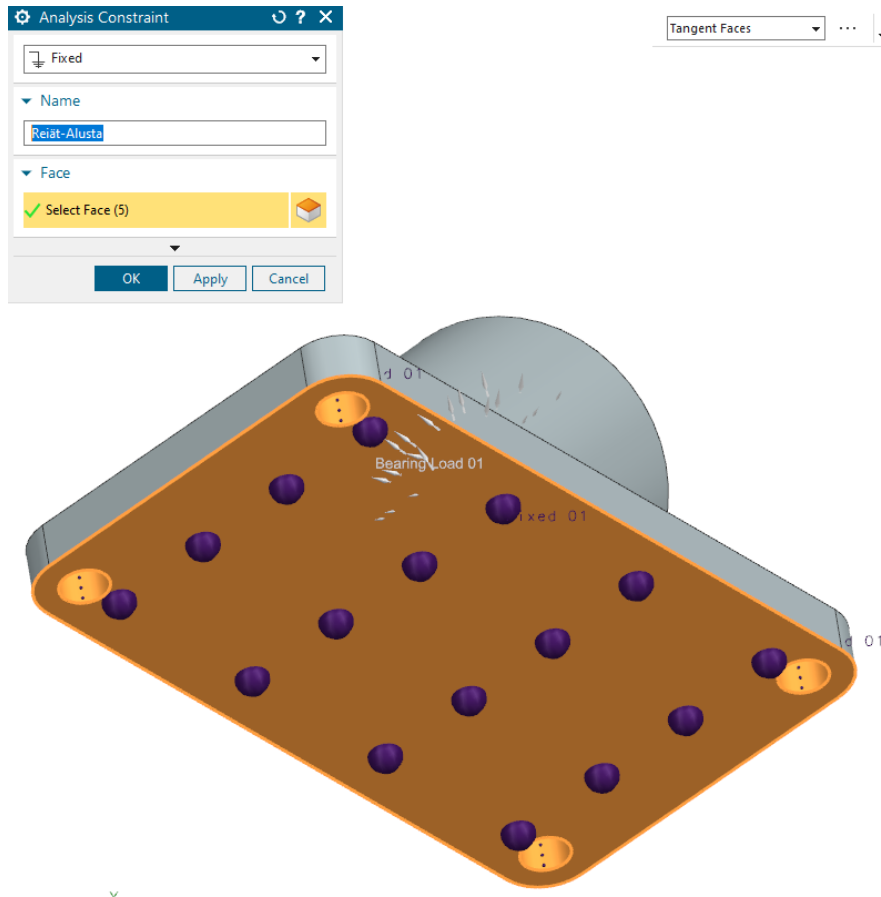


Kuva 28. Connection

Nyt kun tukivarsi on määritetty Scenery Bodyksi, se voidaan kiinnittää alustaan ja tankoon Connectionilla.

4.1.2 Kiinteät osat

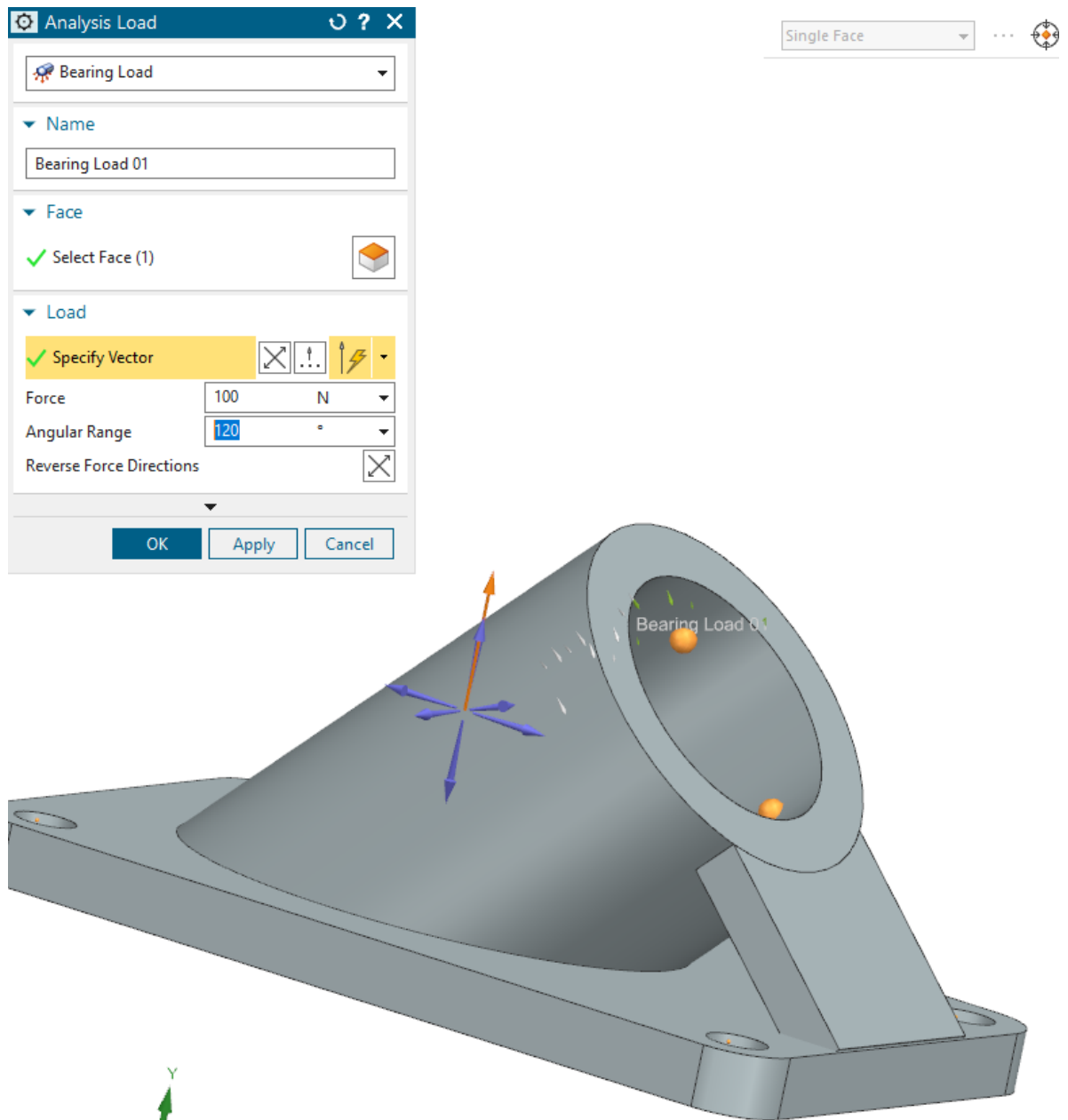
Analysis Constraint -työkalulla voidaan määrittää liikkumattomat osat kappaleesta tarkemmin. Esimerkiksi kuvassa 29 olevat kiinnitysreiät ja alusta halutaan pysyvän ennallaan, joten ne valitaan Fixed-vaihtoehdolla. Näin simuloitu kappale pystytään asentamaan samalla tavalla kuin alkuperäinen. Analysis Constraint -työkalulla voidaan tarkentaa Design Bodyn sisällä olevia yksityiskohtia muuttumattomiksi ilman, että koko osa täytyy asettaa Scenery Bodyksi.



Kuva 29. Pohja asetettu Analysis Constraint -työkalulla

4.1.3 Malliin kohdistuva rasitus

Lieriömalliseen tankoon voidaan tässä kappaleessa hyödyntää Bearing Load -tyyppistä rasitusta. Kuormitusta asettaessa tulee valita pinta, johon voima kohdistuu, eli tässä tapauksessa lieriön sisäpinta (kuva 30) mihin asetettaisiin kuvitteellinen esine. Tämän lisäksi voimalle tarvitaan suunta ja se valitaan kuvassa 30 sinisenä näkyvästä suuntavektorivalikosta. Tässä esimerkissä kuvitteellinen voima kohdistuu ylöspäin mikä on valittuna ja sen voi huomata eri värisenä nuolena ylöspäin. Angular Rangella tarkoitetaan missä kulmassa voima kohdistuu tangon sisäpintaan ja se voidaan asettaa 180 asteeseen, jos kuvitellaan tangon sisällä olevaa tappia tai muuta esinettä vedettävän ylöspäin. Force-kohdasta voidaan määrittää voima Newtonina ja 100N on teräksiseen kappaleeseen hyvä simuloitava voima.

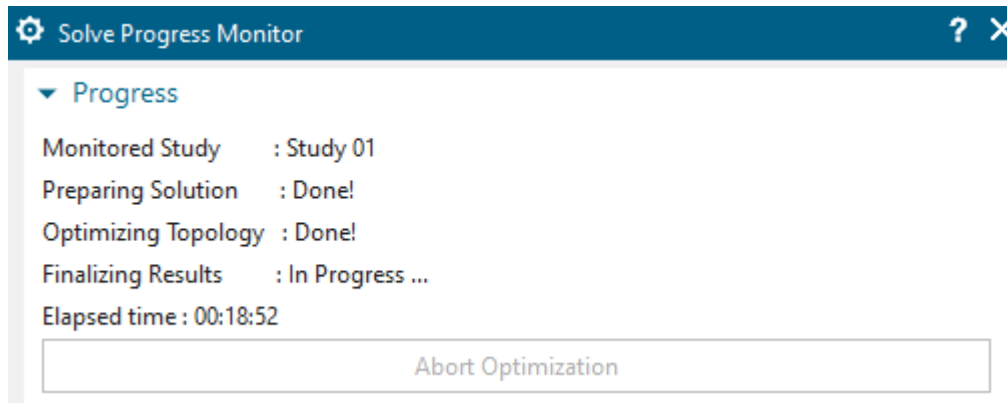


Kuva 30. Rasiuksen asettaminen

Voiman asettamisen jälkeen voidaan siirtyä suoraan määrittämään Optimization Constraint. Asettaessa Max Stress Limit tulee muistaa asettaa se molemmille Design Spaceille erikseen.

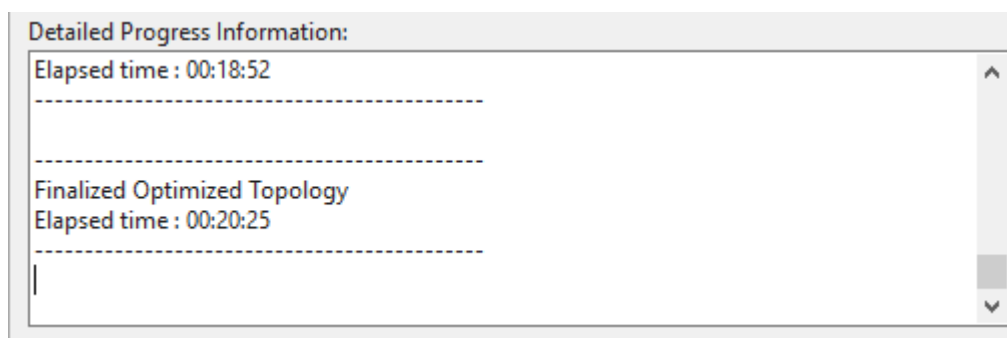
4.2 Simulointi valmis

Nyt kun kaikki ehdot on asetettu, niin simulointi voidaan aloittaa ja tässä tulee huomioida, että sen pituus on pidempi kuin ensimmäisessä kappaleessa simulointiehtojen kasvaessa.



Kuva 31. Simuloinnin valvonta

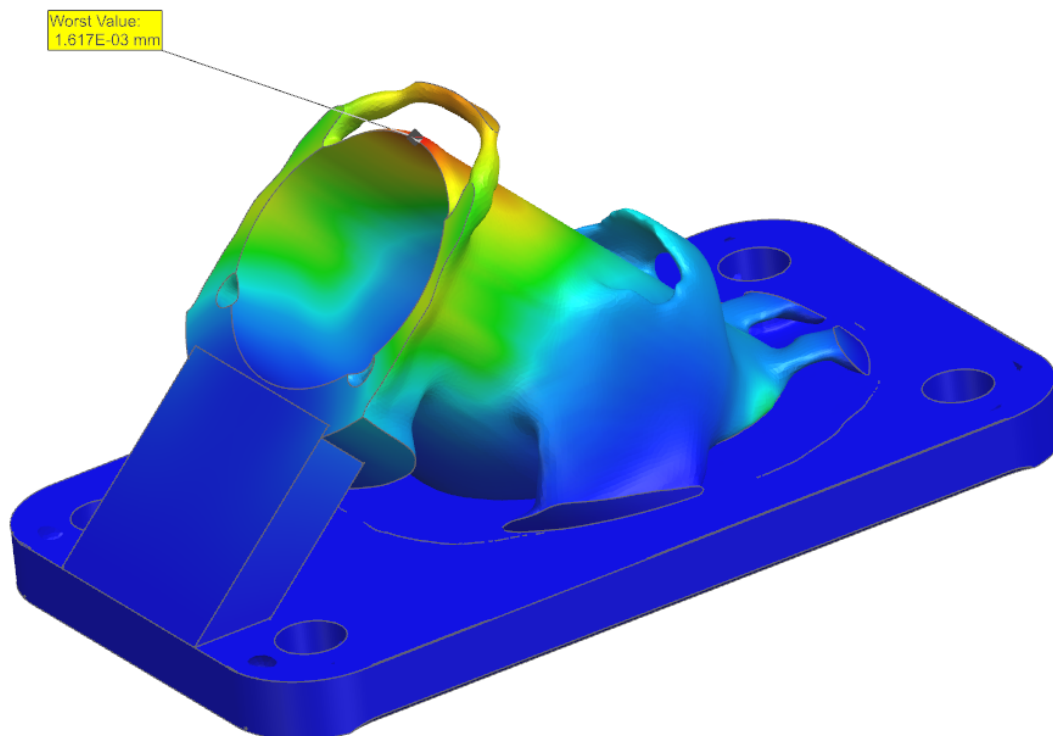
Välilehti, jossa simulointikäyrät ovat, tulisi sisältää myös kuvassa 31 näkyvät tekstit "Done!" sekä kertoa simulointiin käytetty aika kuten alla olevassa kuvassa 32 näkyy.



Kuva 32. Simulointiin käytetty aika

Simuloidusta kappaleesta (kuva 33) voidaan huomata miten tukivarsi, alusta ja tangon sisäpuoli ovat pysyneet hyvin ennallaan eli Fix-toiminto on toiminut halulla tavalla ja topologinen optimointi on onnistunut. Näin kappale voitaisiin 3D-

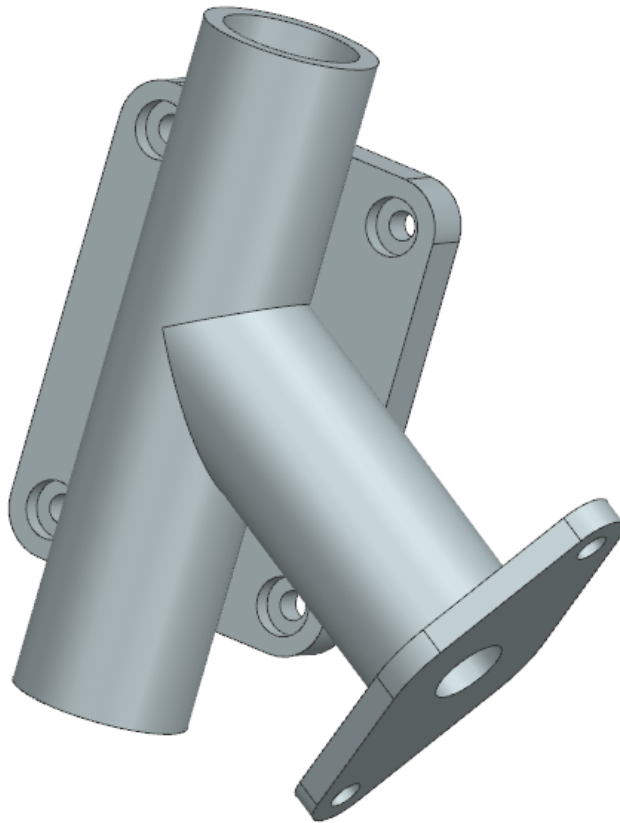
tulostamisen jälkeen ottaa suoraan käyttöön. Toki malli on melko ruma eli jos sen haluaa asettaa esille, olisi hyvä hieman muokata sen ulkoasua.



Kuva 33. Toinen kappale simuloituna

5 Kolmas esimerkkikappale

Kolmannessa ja viimeisessä kappaleessa (kuva 34) on kyseessä kahden putken liitoskohta sekä asennuslevyt, jotka ovat kiinni pystyputkessa ja vinoputken päädyssä mahdollistaen jatkokiinnitykset. Asennuslevyn suhteen kappale on hyvin samanlainen kuin edellinen kappale ja sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi jäähdytysvesijärjestelmissä.



Kuva 34. Kolmas kappale

5.1 Optimoinnin valmistelu

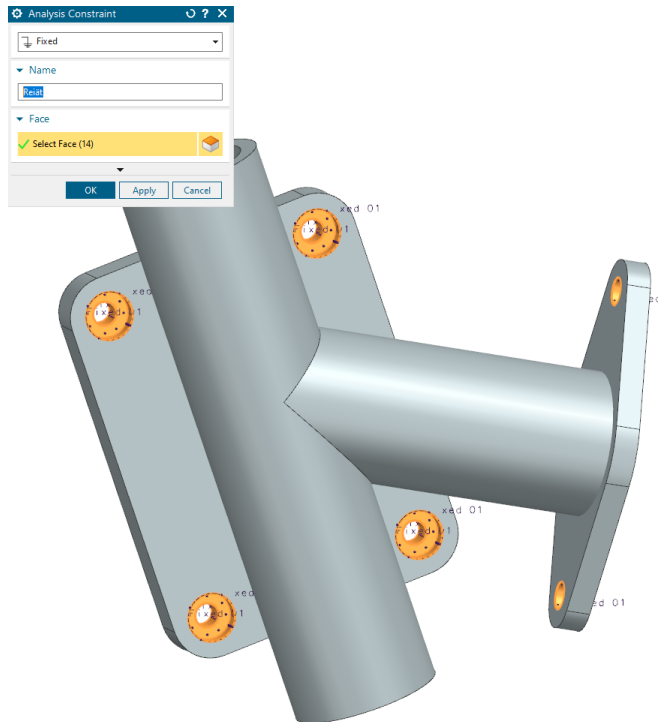
Kappale voidaan monimutkaisuutensa takia optimoida useammalla eri tavalla ja tässä ohjeistetaan kahden eri tavan käyttö. Eri simulointiehdolla saadaan eri lopputulokset.

Tässä esimerkissä kappale on jaettu neljään eri osaan. Alustat, joissa on kiinnitysreiät jäävät entiselleen, joten niistä tehdään muuttumattomat Scenery Bodyt (1.) ja putkista tehdään kaksi eri Design Spacea (2.) Näin voidaan asettaa kaksi eri Connection-kohtaa (3.) putkien ja aluslevyjen välille (kuva 35). Lisäksi kappaleelle on lisätty painovoima (4.), joka on tässä tapauksessa pystyputken suuntaisesti alaspäin.

| Title | Property | Up to... |
|--------------------------------|------------------------------|----------|
| [-] Study 01 | | ! |
| [-] Analysis Type | Structural (Linear Statics) | |
| [-] Optimization Objective | Minimize Mass | |
| [-] Resolution (User-defined) | 1 mm | |
| [-] Global Optimization Co... | | |
| [-] Environment Loads | | |
| [-] Gravity 4. | 9806.65 mm/s ² | |
| [-] Design Spaces | | ! |
| [-] Putki1 2. | Extrude (11) | ! |
| [-] Putki2 | Extrude (22) | ! |
| [-] Scenery Bodies | | |
| [-] Alusta1 | Extrude (2) | |
| [-] Alusta2 1. | Extrude (25) | |
| [-] Connections | | |
| [-] Alusta-Putki1 3. | Body to Body | |
| [-] Alusta-Putki2 | Body to Body | |
| [-] Analysis Constraints | | ! |
| [-] Analysis Loads | | ! |
| [-] Subcases | | |
| [-] Default Subcase | Used for Optimization | |

Kuva 35. Kolmannen kappaleen rakennepuu

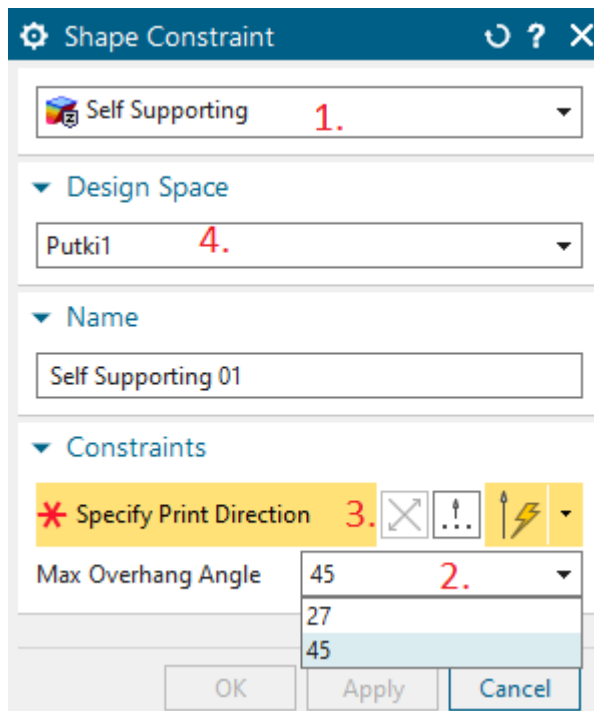
Seuraavana asetetaan Analysis Constraint -työkalulla kappaleen reiät pysymään paikoillaan (kuva 36).



Kuva 36. Reiät valittuna

5.2 Muodon varmistaminen 3D-tulostamiseen

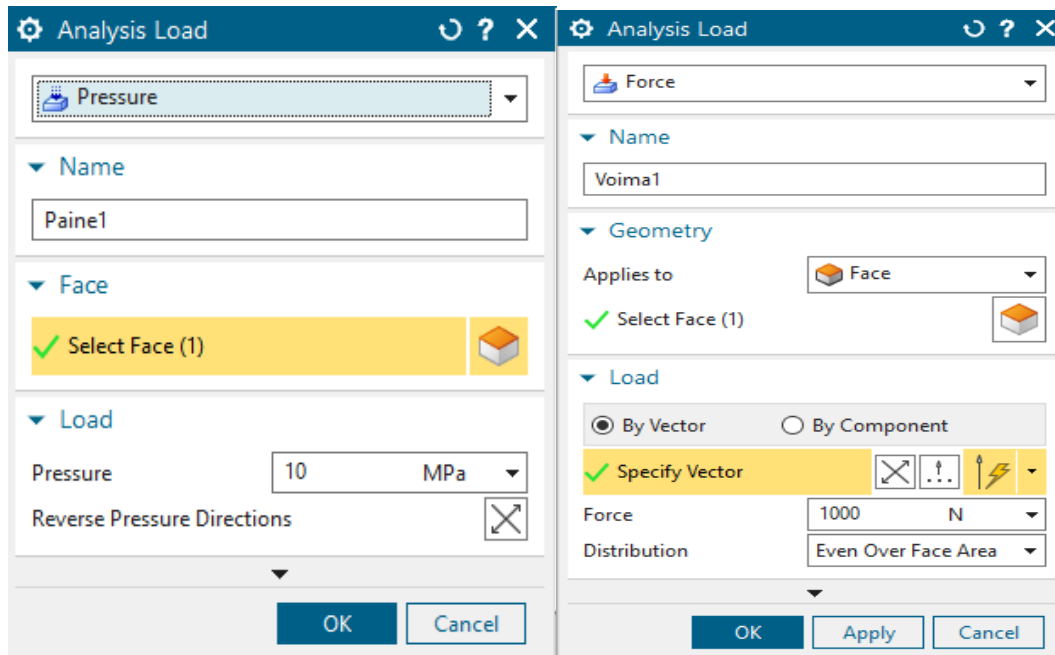
Shape Constraint -toiminnolla (kuva 37) voidaan asettaa kappale paremmin soveltuvaksi seuraavaan työvaiheeseen eli 3D-tulostamiseen asettamalla alavaliokosta Self Supporting (1.) eli ohjelma asettaa itse kappaleelle tukirakenteet. Valikosta voidaan myös asettaa enimmäiskulma (2.), joka on 45 tai 27 astetta. Tässä kappaleessa yleinen 45 asteen sääntö ylittyy riippumatta kappaleen tulostussuunnasta (3.) Asettamalla suunnaksi sama kuin painovoima, sivuputki asettuu 60 asteen kulmaan ja tulostussuunnan ollessa käännteinen kulma on 120 astetta. Tässä voidaan asettaa kerrallaan vain yksi Design Space (4.)



Kuva 37. Muotoehdot

5.3 Kuormitusten asettaminen

Monisuuntaisessa kappaleessa kuormitus voidaan asettaa eri tavoin vaikuttaen simuloinnin lopputulokseen. Putkien sisäpinnoille asetetaan vasemmalla olevan kuvan 38 mukaisesti 10 MPa:n paine. Näiden lisäksi putkien päätyihin voidaan asettaa voimat, jotka on määritelty 1000 N suuruiseksi (kuva 39).

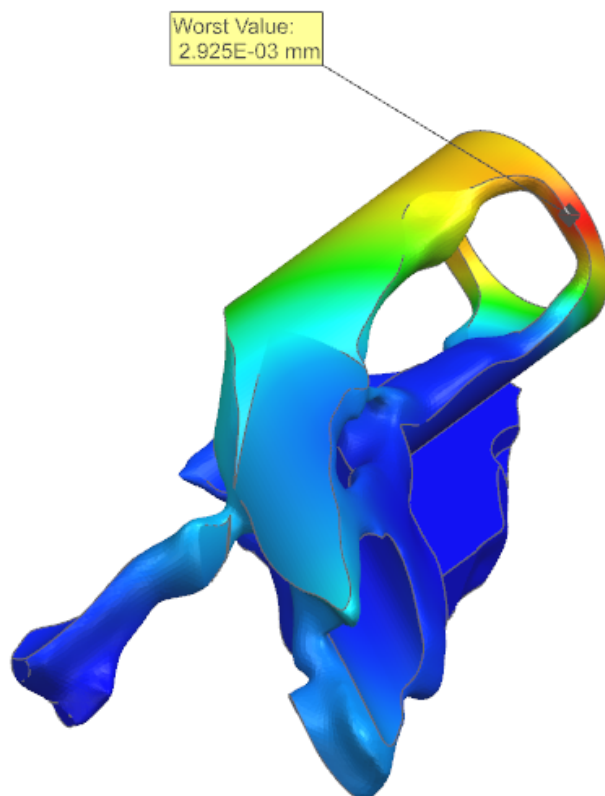


Kuva 38. Paine

Kuva 39. Voima

5.4 Simuloinnin aloitus

Ennen simuloinnin aloitusta kappaleelle asetetaan vielä Optimization Constraint -välilehdeltä Max Stress Limit kappaleen eri osille kuten aikaisemmissakin esimerkeissä. Tässä tapauksessa Design Space -osien määrä on kaksi eli molempiin määritetään ehdoiksi suurimman rasituksen löytäminen.

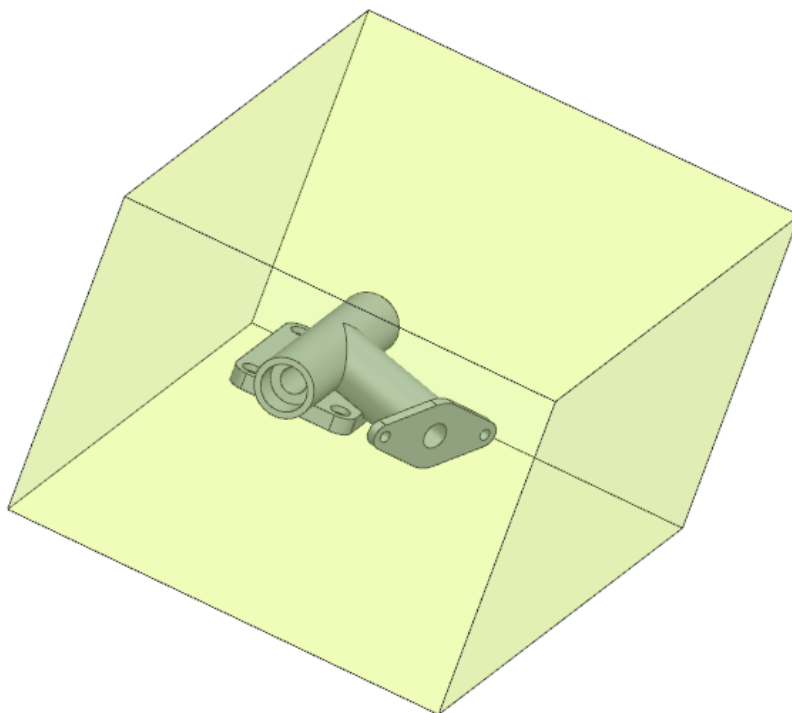


Kuva 39. Simuloitu kappale

Näillä ehdoilla kappaleesta tulee kuvan 40 mukainen sen 3D-tulostettavuuden takia, eikä tämä oikein sovi mihinkään. Näin ollen kappaleen optimointiehtoja tulee hieman muokata.

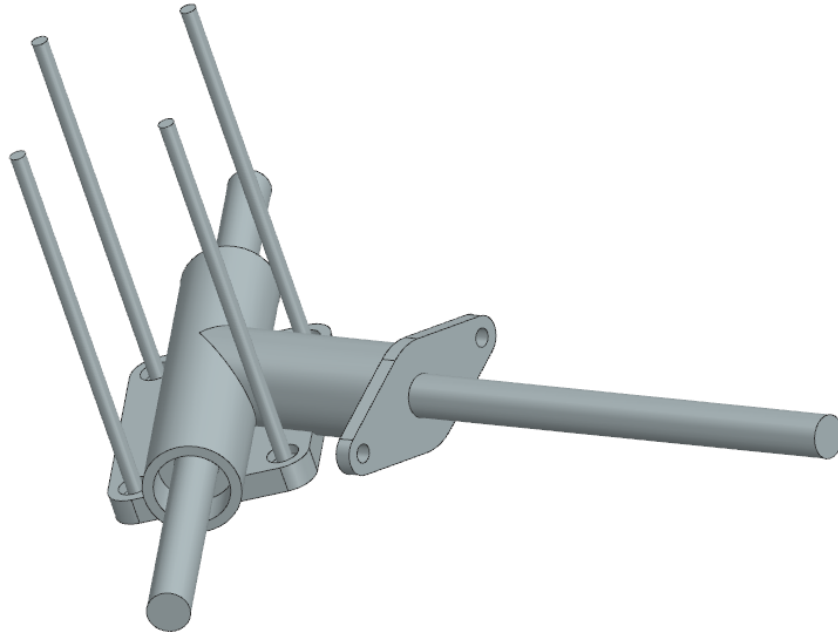
5.5 Vaihtoehtoinen simulointi

Paremmen lopputuloksen takaamiseksi kappale voidaan optimoida myös hieman eri lähestymistapaa hyödyntäen. Alkuun luodaan kuvan 41 mukainen alue, johon simuloitava kappale mahtuu asettamalla se Design Spaceksi ja itse muokattava kappale rakennetaan Construction Bodyjen avulla. (Whats new in NX | Topology optimization 2022:35.)



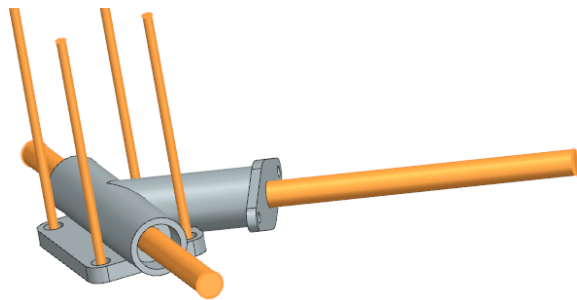
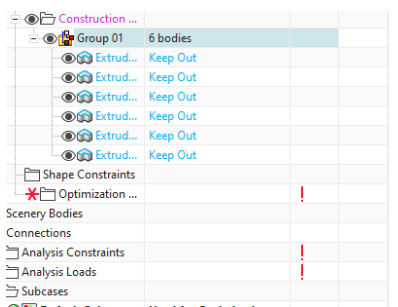
Kuva 40. Design Space

Kuution tekemisen jälkeen voidaan Extrude-työkalulla pursottaa reikien kohdat, joihin ei haluta materiaalia (kuva 42).



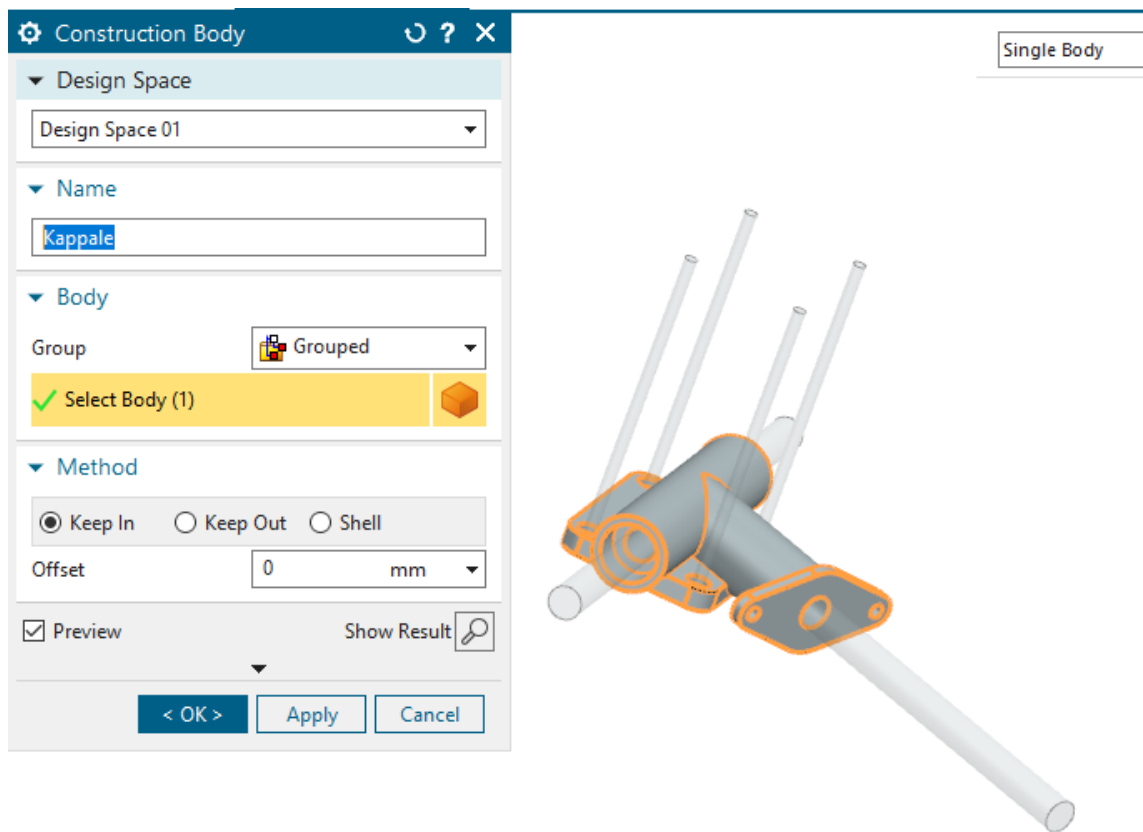
Kuva 41. Pursotetut reiät

Nyt simulointia alustaessa nämä ”ylimääräiset” tangot tehdään Construction Bodyiksi, jossa ne valitaan Keep Out -kohdasta (kuva 43) eli ohjelmalle kerrotaan, ettei niihin tule asettaa materiaalia. Näin varmistetaan, että kyseiset kohdat kappaleesta pysyvät alkuperäisinä.



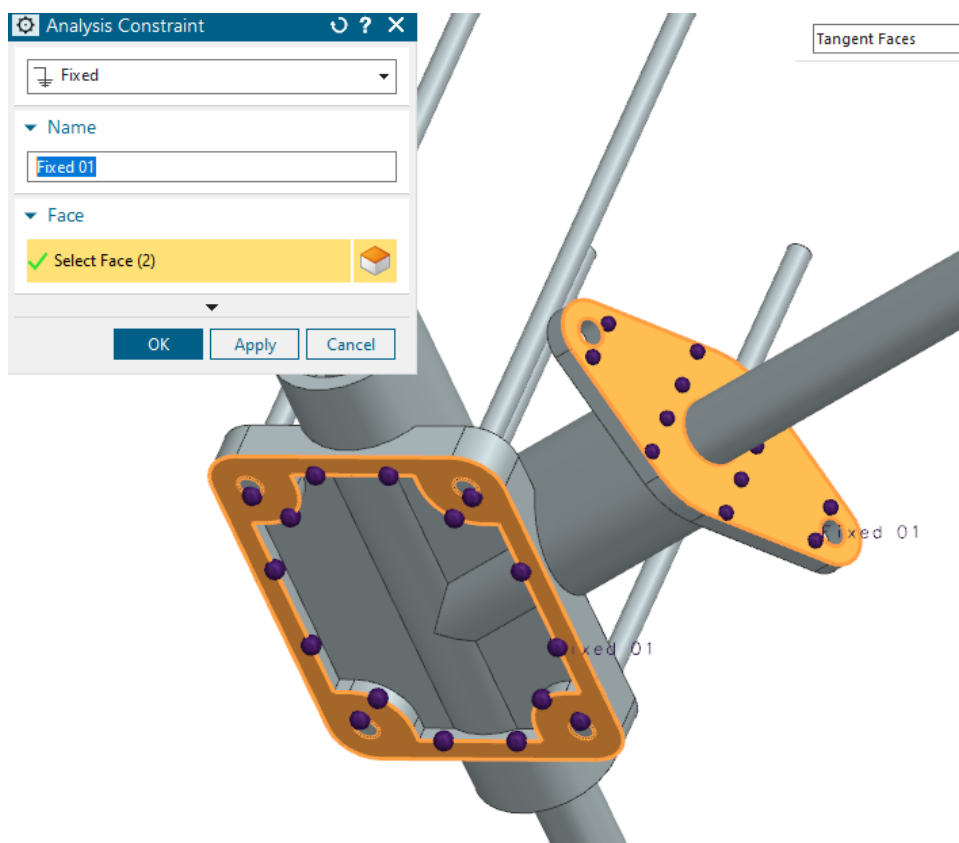
Kuva 42. Tangot valittuina

Vastapainoksi Keep Outeille valitaan varsinainen kappale Construction Bodyn kautta Keep In (kuva 44).



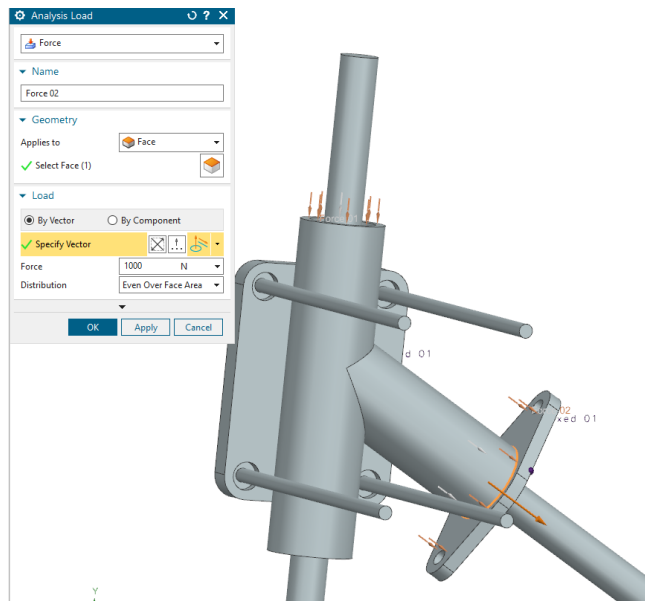
Kuva 43. Keep In

Muokattavat ja muokkaamattomat osat valittuna voidaan alustaa simulointia lisää asettamalla sille ehtoja. Seuraavana alustojen kiinnityspuolet kiinnitetään paikoilleen Fixed-työkalulla (kuva 45).



Kuva 44. Fixed

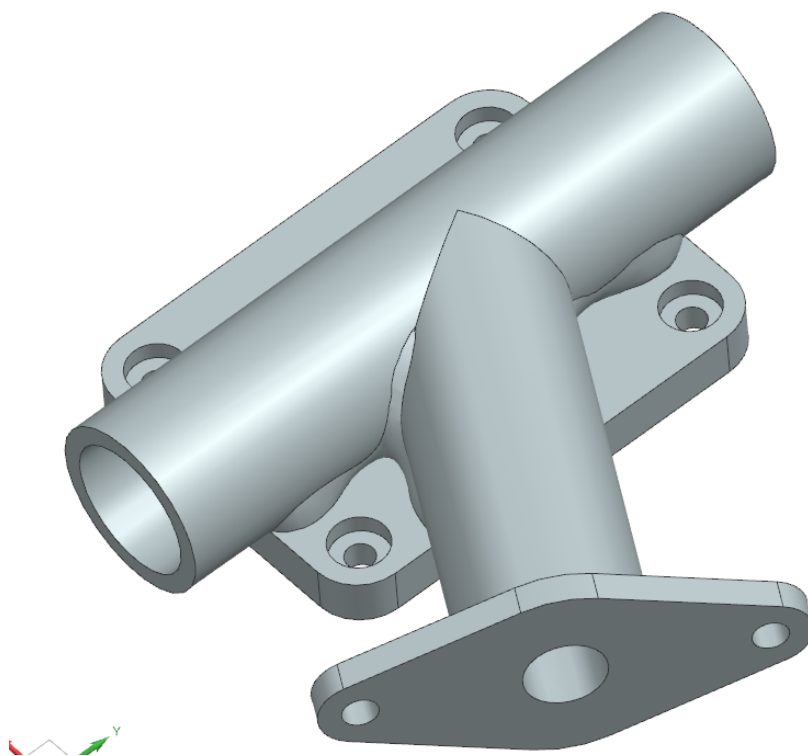
Seuraavana voidaan asettaa rasitukset samoihin paikkoihin kuin aikaisemmin. 1000 N voima kohdistuu kuvan 46 mukaisesti kappaleen pätyihin. Lisäksi putkien sisäpinnoille voidaan asettaa 10 MPa:n paine sekä asettaa Optimization Constraint -välilehdeltä ehdoksi Max Stress Limit, jonka jälkeen simulointi voidaan aloittaa.



Kuva 45. Voimien määrittäminen

5.6 Lopputulosten vertailu

Aikaisempaan verrattuna kappaletta voidaan hyödyntää jossain sovelluksessa, vaikka sitä ei voida valmistaa 3D-tulostamalla ilman tukirakenteita. Koska kappaleessa ei ole alun perin liikaa ylimääräistä, se ei muutu huomattavasti optimoinnin jälkeen.



Kuva 46. Simuloitu kolmas kappale

Kuvasta 47 voidaan huomata pienet muutokset, jotka kappaleeseen on tullut jäykkyyden maksimoimiseksi. Myös asennuspinnat ja reiät ovat ennallaan halutulla tavalla.

6 Yhteenveto

Kolmea eri kappaletta simuloitaessa voi huomata eri työkalujen ja simulointiehtojen vaikutuksen lopputulokseen ja näin oppia miten ne toimivat ja miten niitä tulee käyttää. Näin simuloinnin ehtoja voidaan muokata varmistaen lopputuloksen sopivuuden omaan tarkoitukseen. Eri simulointiehtoja kokeilemalla voi kokeilla miten ne vaikuttavat lopputulokseen, mikäli lopputulos epäonnistuu ja turhautuu helposti. Tähän auttaa parhaiten työkalujen toiminnan ymmärtäminen, jota on yritetty tässä opinnäytetyössä avata.

Topologinen optimointi on tehokas tapa säästää materiaalikustannuksissa ja ajassa, jota käytetään kappaleiden suunnitteluun. Rajoitteitakin löytyy, kuten aikaisemmin on todettu tukirakenteiden ja valmistuksen osalta.

Lähteet

Chakravorty. 3D Printing supports – The ultimate guide. Verkkoaineisto <https://all3dp.com/1/3d-printing-support-structures/> Päivitetty 27.2.2023. Luettu 2.2.2023.

DigiTally – Digitaalisten taitojen parantaminen koneteknologian aloilla. 2020. <https://www.metropolia.fi/fi/tutkimus-kehitys-ja-innovaatiot/hankkeet/digitally> Luettu 11.4.2023.

Fiat Chrysler automobiles uses AM to design suspension system. Carlota V. <https://www.3dnatives.com/en/fiat-chrysler-automobiles-suspension-system-171120205/> Julkaistu 17.11.2020. Luettu 4.3.2023

Etteplan AMOtool 3D-tulostuksen kustannuslaskentaan. Verkkosivusto <https://www.etteplan.com/fi/palvelumme/suunnittelupalvelut/3d-tulostus/etteplan-amotool-3d-tulostuksen-kustannuslaskentaan> Luettu 22.3.2023

Limit Stress meaning. Siemens Simcenter. Keskustelu <https://community.sw.siemens.com/s/question/0D54O000078zNY8SAM/limit-stress-meaning> Julkaistu 18.10.2021. Luettu 12.2.2023.

Lindqvist. 3D-tulostamalla valmistettavan hydraulisen paineenkohottimen suunnittelu. Opinnäytetyö https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/147718/Lindqvist_Vili.pdf?sequence=1&isAllowed=y Julkaistu 20.5.2018. Luettu 2.2.2023

Topology Optimization. Blender community. Keskustelu <https://blender.community/c/rightclickselect/w0om/?sorting=hot> Päivitetty 13.3.2023. Luettu 15.1.2023

Whats new in NX | Topology Optimization. Video. <https://www.youtube.com/watch?v=VyOBznxzifl> Julkaistu 31.3.2022. Katsottu 23.2.2023

