



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Valtteri Ritamäki

TOP FUEL -MOOTTORIN SYLINTERI- JÄNNITYSTEN ANALYSOINTI

Opinnäytetyö

Tekniikka
2019

TIIVISTELMÄ

| | |
|--------------------|--|
| Tekijä | Valtteri Ritamäki |
| Opinnäytetyön nimi | Top Fuel -moottorin sylinterijännitysten analysointi |
| Vuosi | 2019 |
| Kieli | suomi |
| Sivumäärä | 59 + 4 liitettä |
| Ohjaaja | Jari Lehtiö ja Heikki Salminen |

Tässä työssä analysoidaan Top Fuel -kiihdytysmoottoripyörän moottorin sylinteriin kohdistuvia jännityksiä ja väsymistä. Analyysi tehdään moottorin kestävyuden ja turvallisuuden parantamiseksi. Työssä halutaan myös selvittää parhaita mahdollisia toimintatapoja tämän tyyppisen ongelman selvittämiseen jatkossa ja mahdollisesti edesauttaa yksinkertaisempien analyysien luomista.

Työssä käytetään elementtimenetelmää rasiusten selvittämiseen ja tutkitaan miten erilaisilla menetelmillä ja ratkaisijoilla saadaan parhaat tulokset. Työn analyysi suoritetaan Comsol Multiphysics -ohjelmistolla. Ohjelmistossa käytetään 3D-ympäristössä, Structural Mechanics -moduulin Thermal Stress -fysiikkamoduulia. Lopuksi suoritetaan yksinkertaistettu väsymisanalyysi, käyttämällä Fatigue-moduulia.

Tulokset ovat laskentaresursseihin nähden mahdollisimman tarkkoja, mutta tuloksissa on syytä ottaa huomioon epävarmuudet joidenkin komponenttien materiaaleissa. Viimekädessä työ sopii menetelmiltään vertailukohdaksi vastaavanlaisille analyyseille.

ABSTRACT

| | |
|--------------------|---|
| Author | Valtteri Ritamäki |
| Title | Cylinder Stress Analysis of Top Fuel Engine |
| Year | 2019 |
| Language | Finnish |
| Pages | 59 + 4 Appendices |
| Name of Supervisor | Jari Lehtiö and Heikki Salminen |

In this thesis, the cylinder of a Top Fuel drag racing motorcycle engine is analyzed for tension and fatigue. The analysis is made to improve strength and safety of the engine. Also, the thesis is looking for the best ways to do this kind of research and if possible, help making a simpler analysis in the future.

The thesis is mainly uses the Finite Element Method for solving stresses and studies different methods and solvers for the best results. The analysis is made with the Comsol Multiphysics software. The thermal Stress physics module in Structural Mechanics module is used in 3D environment. In the end, a simplified fatigue analysis is made in the Fatigue module.

The results are accurate considering computing resources in use. But there is a reason to consider uncertainties of material specifications, in some components. However, the thesis and used methods are a good reference for this kind of research.

Keywords FEA, Finite Element Method, Comsol and internal combustion engine

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | JOHDANTO | 9 |
| 1.1 | Tavoitteet | 9 |
| 1.2 | Toteutus..... | 9 |
| 2 | TEORIA | 10 |
| 2.1 | Elementtimenetelmä | 10 |
| 2.2 | Väsyminen | 16 |
| 2.3 | Nitrometaanikäyttöinen polttomoottori | 18 |
| 3 | ANALYYSIN TOTEUTUS | 21 |
| 3.1 | Lähtötiedot | 21 |
| 3.2 | Sylinterikomponentit ja materiaalit..... | 24 |
| 3.2.1 | Sylinteriputki..... | 25 |
| 3.2.2 | Palotila ja sylinterikansi | 26 |
| 3.2.3 | Ylä- ja alasylinteri | 28 |
| 3.2.4 | Pultit | 30 |
| 3.3 | Analyysi elementtimenetelmällä..... | 33 |
| 3.3.1 | Määritykset ja rajoitteet..... | 36 |
| 3.3.2 | Elementtiverkko | 42 |
| 4 | TULOKSET | 49 |
| 4.1 | Vertailu | 49 |
| 4.2 | Hypoteesi | 49 |
| 5 | JOHTOPÄÄTÖKSET | 55 |
| 5.1 | Muita huomioita..... | 56 |
| 5.2 | Jatkokehitys..... | 56 |
| | LÄHTEET..... | 58 |

LIITTEET

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

| | |
|--|-----|
| Kuva 1. Elementtityyppejä. /7/ | 12 |
| Kuva 2. Luonnos kampikoneistosta. | 23 |
| Kuva 3. Pultit ja mutterit. | 23 |
| Kuva 4. Sylinterikokoonpano. | 24 |
| Kuva 5. Sylinterikokoonpanon pultit. | 25 |
| Kuva 6. Sylinteriputki. | 26 |
| Kuva 7. Sylinterikansi. | 27 |
| Kuva 8. Sylinterikansi muokattuna Comsol Multiphysicsissä. | 27 |
| Kuva 9. Palotila. | 28 |
| Kuva 10. Yläsylinteri. | 29 |
| Kuva 11. Alasylinteri. | 29 |
| Kuva 12. Kannenpultit. | 30 |
| Kuva 13. Sylinteripultit kuvassa pisimpinä. | 31 |
| Kuva 14. Alasylinteripultti. | 32 |
| Kuva 15. Alasylinteri, missä M10-yläsylinterin kiinnityspultit kiinni. | 32 |
| Kuva 16. Muuttajat Comsol Multiphysicsissä. | 34 |
| Kuva 17. Paineenmäärittäminen sylinteripinnalle. | 35 |
| Kuva 18. Männänliike ajansuhteen. | 35 |
| Kuva 19. Paine ajansuhteen. | 35 |
| Kuva 20. Muokattu Lämpötila ajansuhteen. | 336 |
| Kuva 21. Palotilan sisäpinnat. | 37 |
| Kuva 22. Sylinteriputken sisäpinta valittuna kuormitukselle. | 37 |
| Kuva 23. Sylinteripulttien ja sylinterialapulttien kierre osuudet valittuna. | 38 |
| Kuva 24. Sylinteriputken alaosan ulkoseinä valittuna. | 38 |
| Kuva 25. Mutterin kontakti yläsylinterin kanssa. | 39 |
| Kuva 26. Pultin ja seinämän kontaktitaso. | 39 |
| Kuva 27. Sylinteriputken ja alasylinterin kontaktitaso. | 40 |
| Kuva 28. Mallin symmetriataso. | 40 |
| Kuva 29. Suurin osa ilmaviiran kanssa kohtaavista ulkopinnoista. | 41 |
| Kuva 30. Lohkon sisälle jäävät ulkopinnat. | 41 |
| Kuva 31. Esimerkkejä jatkuvuus tasoista. | 42 |

| | |
|---|----|
| Kuva 32. Pultin pinnat väsymisanalyysiin. | 42 |
| Kuva 33. Extra Fine, automaattisen fysiikan mukaan rakennettu verkko. | 43 |
| Kuva 34. Manuaalinen verkko Mesh 2. | 44 |
| Kuva 35. Verkon tiheyden muuttuminen. | 45 |
| Kuva 36. Verkon tihentyminen pyöristyksissä. | 45 |
| Kuva 37. Pultit automaattisella verkotuksella. | 46 |
| Kuva 38. Manuaalisen verkon määritteet. | 47 |
| Kuva 39. Pultit ja sylinteriputki manuaalisella verkotuksella. | 47 |
| Kuva 40. Pultit verkotettu muita komponentteja tiheämmin. | 48 |
| Kuva 41. Sylinterikannen harva Coarse-verkko. | 48 |
| Kuva 42. Staattisen analyysin tulos 28,5 MPa -paineella. | 50 |
| Kuva 43. Staattisen analyysin tulos 32.5 MPa -paineella. | 50 |
| Kuva 44. Manuaalisella verkolla saatu kokonaistulos. | 51 |
| Kuva 45. Manuaalisella verkolla saadut kriittisimmät rasitukset. | 51 |
| Kuva 46. Automaattisella verkolla saatu kokonaistulos. | 52 |
| Kuva 47. Automaattisella verkolla saadut kriittisimmät rasitukset. | 52 |
| Kuva 48. Alle 250 MPa -paineiden tasainen jakautuminen. | 53 |
| Kuva 49. Kannenpultin väsymisikä. | 53 |
| Kuva 50. Erään kannenpultin jännitykset 0.014 sekunnin ajalta. | 54 |
| Kuva 51. Kannen alueella tapahtuva suurin muutos tilavuudessa. | 57 |

LIITELUETTELO**LIITE 1.** Lähtötiedot**LIITE 2.** Comsol-analyysi automaattisella verkolla**LIITE 3.** Comsol-analyysi manuaalisella verkolla**LIITE 4.** Lopputulos gif-kuva

LYHENTEET

YKK=Yläkuolokohta

FEM=Finite Element Method

FEA=Finite Element Analysis

S/N-käyrä=Wöhler käyrä

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö kohdistuu toimeksiantajan suunnittelemaan moottoripyörän moottoriin. Moottori on kaksisynterinen 90 asteen V-konfiguraatiossa ja se on rakennettu käyttämään polttoaineena nitrometaania. Pyörällä on myös ajettu maailman ensimmäiset alle kuuden sekunnin ajat kaksisynterisillä moottoreilla ja tarkoituksena on ajaa maailmanennätys sylinterimäärästä riippumatta. Top Fuel -moottoripyörien kiihdytyskilpailussa ajetaan kahdella rinnakkaisella ¼-mailin (402 m) mittaisella radalla kilpaa monituhatevosvoimaisilla moottoripyörillä. Näiden moottoripyörien tuottamat tehot vaihtelevat tuhannesta hevosvoimasta ylöspäin. Työssä tutkittavasta moottorista on laskennallisesti saatu tehoiksi noin 2000 hv tai SI-järjestelmän mukaisesti 1471 kW. /4/

1.1 Tavoitteet

Yksi työn oleellisista tavoitteista on varmistaa moottorin turvallisuus sylinterin osalta. Sylinteripaineet näissä nitrometaanilla toimivissa moottoreissa ovat noin neljä kertaa suuremmat, kuin esimerkiksi tehokkaimmissa bensiinimoottoreissa. /4/ Opinnäytetyöllä haluttuun myös ottaa selvää tämäntyyppisen analyysin haasteista ja mahdollisuuksista tuottaa jatkossa vastaavia analyysejä yksinkertaisempia menetelmiä käyttäen.

1.2 Toteutus

Opinnäytetyössä on käytetty valmiita 3D-malleja Top Fuel -moottorin sylinteristä. Mallit on saatu työn toimeksiantajalta ja ainoat niihin tehtävät muutokset on tehty analyysin helpottamiseksi laskentatehon kannalta. Tehtävän tarkastelemiseksi tehtiin Comsol Multiphysicsillä keskenään vertailtavia testejä, siitä kuinka tulokset muuttuvat, kun vertaillaan dynaamista muutosta ajan funktiona ja staattisia tuloksia. Tällä vertaillulla voidaan sulkea tai olla sulkematta pois mahdollisuus käyttää vain staattista analyysiä tulevaisuudessa, kun halutaan etsiä mahdollisia kehitysalueita sylinterien rakenteissa. Analyysiä lähestyttiin hyvin pragmaattisella tavalla ja toimeksiantajan tietopohjaa kehittäen.

2 TEORIA

Tässä luvussa käsitellään tähän opinnäytetyöhön liittyvää teoreettista viitekehystä. Pääasiassa keskitytään elementtimenetelmään ja väsymisanalyysiin nitrometaanikäyttöisessä polttomootorissa. Teoriaa tullaan myös sivuamaan myöhemmin käytännön vaiheen tarkastelussa, sekä tulosten tarkastelun yhteydessä. Teorialuvussa käsitellyjä asioita ei ole pystytty käytännön syistä soveltamaan absoluuttisesti käytännön vaiheessa työtä, mutta teoriaa on pyritty soveltamaan laskentatehon puitteissa parhaaksi katsotulla tavalla.

2.1 Elementtimenetelmä

Tila- ja aikariippuvaiset fysiikan lait voidaan ilmaista osittaisdifferentiaaliyhtälöjen avulla. Suurinta osaa monimutkaisia geometrioita sisältävistä ongelmista ei voida ratkaista käyttämällä analyyttisiä menetelmiä. Näihin ongelmiin ratkaisuksi on kehitetty Finite Element Method (FEM), eli elementtimenetelmä. /2/

Elementtimenetelmän käyttäminen alkoi Yhdysvalloista lentokoneteollisuuden haasteiden ratkaisemiseksi 1950-luvulla. Tekniikan käyttäminen yleistyi kone- ja rakennustekniikan aloilla. 1960- ja 1970-luvuilla menetelmän käyttö yleistyi tietokoneiden yleistymisen mukana. Samalla syntyi lineaarisen statiikan ja dynamiikan ohjelmistoja. Näiden ohjelmien käyttäminen oli tuohon aikaan vielä jokseenkin monimutkaista ja aikaa vievää. Erityisesti numeerinen manuaalisesti tapahtuva tiedon syöttö vaikeutti menetelmän käyttöä. 1980-luvulta tähän päivään kehittyneet tietojen käsittely ohjelmat ovat tehneet elementtimenetelmän käytöstä huomattavasti käyttäjäystävällisempää. Alkujaan elementtimenetelmän käyttö oli mahdollista vain suurilla keskusyksikkötietokoneilla, vaadittavan laskentatehon vuoksi. Nykyään menetelmän käyttö on mahdollista tavallisilla pöytä- ja kannettavilla tietokoneilla. /1, 2/

Monista ratkaisumenetelmistä elementtimenetelmä on todettu tehokkaimmaksi ja se onkin käytössä nykypäivänä lähes ainoana tekniikkana. Elementtimenetelmän käyttö ei rajoitu pelkästään mekaanisten ongelmien ratkaisemiseen, vaan

laskentatehon ja ohjelmien parantuessa on menetelmää voitu käyttää muidenkin teknistä laskentaa vaativien ongelmien ratkaisemiseksi. /1/ Hyviä esimerkkejä ovat:

- lämmönsiirto
- virtaustekniikka
- akustiikka
- säteenseuranta
- maamekaniikka
- biomekaniikka.

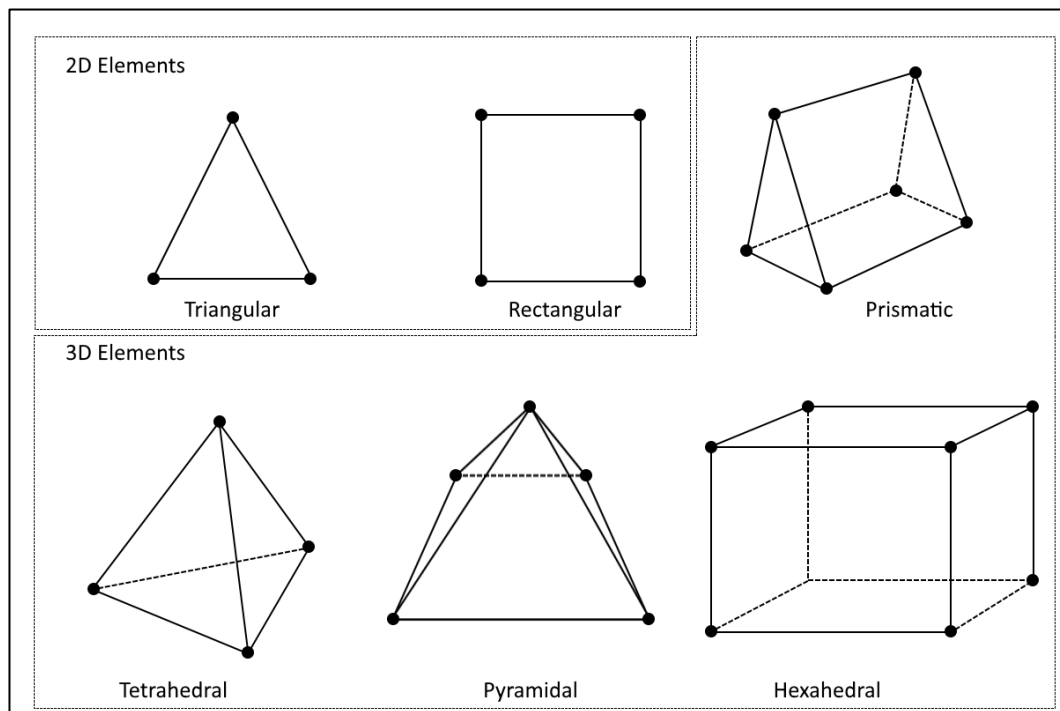
Lujuusopin teoriasta on pitänyt johtaa tarvittavat yhtälöt, jotta voidaan selvittää lujuuslaskentatehtävän kuormituksista rakenteille aiheutuvat siirtymätilakenttä, muodonmuutostilakenttä ja jännitystilakenttä. Kenttien selvittämiseksi täytyy tuntea rakenteen tuenta. Ratkaisujen selvittämiseksi tarvitaan lineaarisen kimmoteorian perusyhtälöjärjestelmää, mistä voidaan johtaa periaatteessa tarvittavat yhtälöt lineaarisen lujuusopin ratkaisemiseksi. Tarkka analyttinen ratkaisu onnistuu pelkästään käytettäessä yksinkertaisia geometrioita. Haastavimmissa muodoissa ratkaisua ei löydy suoraan tavallisten matemaattisten funktioiden avulla, vaan likiratkaisu pitää haarukoida jollain numeerisista menetelmistä. /1/

Tyypillisesti säännölliseen erotteluun perustuvia olettamuksia yhtälöissä voidaan muodostaa, kokonaisvaltaisempia ratkaisuja varten. Säännöllisen erottelun menetelmiä voidaan käyttää tekemään olettamuksia osittaisdifferentiaaliyhtälöistä, käyttäen hyväksi numeerisen mallin yhtälöitä. Näitä yhtälöitä taas voidaan ratkaista numeerisilla menetelmillä. Nämä menetelmät ovat vuorovaikutuksessa osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisujen kanssa. Elementtimenetelmä ratkaisee juuri näitä olettamuksia. /2/

Elementtimenetelmän perusyhtälöt lujuusopissa muodostetaan elementtialueiden interpoloinnin avulla. Interpoloinneista saadaan tarkasteltavalle ongelmalle likimääräinen ratkaisu. Interpolointiin perustuva elementtimenetelmä on ainoa ratkaisu, jos tutkitaan kolmi- tai kaksiulotteisia malleja. yksiulotteiset viiva mallit voidaan ratkaista käyttämällä suoraa elementtimenetelmää. viivamalleissa

perusyhtälöt voidaan muodostaa suoraa sauva- ja palkkiteoriaa käyttäen. Koska näissä ei tarvita interpolointia saadaan tarkka ratkaisu. /1/

Koska lujuusopin perusdifferentiaaliyhtälöiden analyttiset ratkaisut sopivat pelkästään yksinkertaisten rakenteiden ratkaisemiseen, joudutaan monimutkaisempia rakenteita jakamaan säännöllisesti eroteltuihin äärellisiin osiin eli elementteihin. Elementit ovat yksinkertaisempia geometrioita. Kolmiulotteisen rakenteen elementit voivat olla suora tai yksinkertaisesti kaartuvia 4–5 tasoisia geometrioita. Kolmiulotteisten solidien elementtejä kutsutaan tetraedri-, tiilikivi- ja kiilaelementeiksi (Kuva 1). Kaksiulotteisilla pintamalleilla elementit ovat nelisivuisia ja kolmisivuisia tasoja. Yksiulotteiset viivaelementit muodostuvat janoista ja yksinkertaisista kaarista. Harvinaisempia kontakti ja liitos elementtejä käytetään esimerkiksi pultti-liitoksen mallin yksinkertaistamiseksi. /1/



Kuva 1. Elementtityyppejä. /7/

Elementeistä muodostettavan elementtiverkon eli laskentamallin luonne ja koko vaihtelee yleensä tutkittavan kappaleen mukaan. Elementit voivat olla materiaaliominauksiltaan ja geometriselta muodoltaan eri tyyppisiä, mikä parantaa verkon käytettävyyttä erilaisissa tilanteissa. Verkon tiheys eli elementtien koko voi

vaihdella tutkittavan mallin tai geometrian fyysisen rakenteen mukaan. Elementtien koko vaikuttaa myös laskennan tarkkuuteen, koska elementeistä koottu malli ei koskaan vastaa täydellisesti oikeaa geometriaa. Periaatteena mitä tiheämpi malli sitä tarkemmat tulokset. Toisaalta tiheämpi malli vaatii enemmän laskentatehoa. /1, 2/

Elementit liittyvät toisiinsa solmukohdissa eli elementtisolmuissa. Laskentamallien käsittely vaatii elementtien ja elementtisolmujen järjestelmällistä numerointia. Ilman numerointeja laskentaohjelmisto ei pysty tuottamaan oikeanlaisia tuloksia. Nykypäivänä kuitenkin ohjelmat suorittavat numeroinnin automaattisesti. Numerointeja elementeille tarvitaan kaksi, mitkä ovat globaali- ja lokaalimerointi. Elementin lokaalia numerointia tarvitaan silloin, kun lasketaan kyseistä elementtiä. Globaaleja numeroita tarvitaan laskettaessa koko verkkoa. Solmuihin liittyy lujuuslaskennan kannalta tietyt suureet. Siirtymäsuureet eli translaatio- ja rotaatiosiiirtymät, sekä voimasuureet eli jännityskomponentit, kannattimen poikkileikkausrasitukset ja pintarakenteen leikkauksen rasitusiheydet. Solmusuureet ovat riippuvaisia elementeistä, jotka ovat liittyneinä tarkasteltaviin solmuihin. Matriisilaskentaa voidaan hyödyntää, kun tarkastellaan solmusuureiden merkitsemistä. Suuret määrät elementtejä ja solmuja, mitä käsitellään globaalisti ja lokaalisti, vaativat matriisin käsittelemään solmusuureita. Solmusuureiden mittausta tapahtuu aina tietyssä suunnassa ja suunta voidaan määrittää globaalkoordinaatiston tai tietyn elementin lokaalkoordinaatiston mukaan. Elementtityyppi vaikuttaa siihen mitä solmusuureita kulloinkin käytetään. Elementtiverkon solmuisiirtymä- ja solmukuormitusvektori voi sisältää helposti miljoonia komponentteja. Näiden komponenttien asettaminen matriiseihin kävisi manuaalisesti erittäin työlääksi. /1, 2/

Elementtiverkkoon kohdistuvat ulkoiset voimat eivät vaikuta solmuihin pelkästään pistevoimina tai momentteina, vaan elementteihin voi kohdistua myös suoraan elementtikuormituksia. Näistä esimerkkeinä tasainen kuormitus palkkielementeissä ja reunapaine levyelementeissä. Ekvivalenttisten solmukuormitusten avulla voidaan elementtikuormituksia muuntaa solmujen pistekuormituksiksi, käyttäen apuna tiettyä samanarvoisuusperiaatetta. Elementtikuormitusten huomioon ottaminen vaatii, että solmukuormitusvektorin alkioihin lisätään ekvivalenttisten solmukuormitusten

mukaiiset termit, millä solmukuormitusvektoreista saadaan kokonaiskuormitusvektoreita. /1/

Solmusuureet ratkaistaan ensimmäisenä ja seuraavaksi elementtien alueilla olevat tuntemattomat suureet. Tuntemattomat suureet ratkaistaan tunnetuista solmuarvoista alkaen. Yksinkertaisella viivarakenteella sen voi tehdä tarkasti ja helpommin, mutta monimutkaisempien elementtirakenteiden tapauksissa käytetään interpolointia ja tyydytään likiarvoihin. Elementtimenetelmässä solmusuureiden ratkaiseminen on avainasemassa. Parhaaksi menettelytavaksi on osoittautunut, kun solmusiirtymät ratkaistaan ensin. Siirtymämenetelmässä toimitaan juuri näin. Ylensäkin ratkaisumenetelmät eroavat siinä, missä järjestyksessä solmusuureet ratkaistaan. Siirtymämenetelmässä solmuvoimavektorin ja solmusiirtymävektorin välille saadaan lineaarinen yhteys. /1/

FEM-ohjelmistoissa voi tavallisesti olla kymmenistä satoihin elementtityyppejä, mistä kaikki perustuvat vastaavaan lujuusopin teoriaan. Normaalisti käytetään vakiintuneita peruselementtejä, mitä löytyy noin kaksikymmentä. Mikään ei kuitenkaan rajoita erityyppisten elementtien käyttöä ja monien elementtityyppien käyttö erilaisissa geometrioissa tekee elementtimenetelmästä hyvin joustavan laskentamallin. 3D-solidimalleissa käytettävät monitahokkaat tetraedri, kiila ja tiili elementit, näiden reunat voivat olla tasoja, jolloin elementti on lineaarinen tai kvadraattisia toisen asteen pintoja. Erityiselementtejä käytetään usein kosketuselementteinä, säron kärjen elementteinä ja puoliäärettöminä solidielementteinä. Kaikkien elementtityyppien onnistunut käyttö vaatii lujuusopin tuntemista ja elementtimenetelmän teorian tuntemista. Kaikki elementtityypit sisältävät oletuksia ja rajoitteita, näiden tunteminen laskelmien onnistumiseksi on välttämätöntä. /1, 2/

3D-malleja käytetään elementtimenetelmässä, kun kappaleen geometrian monimutkaisuus, ei salli yksi- tai kaksiulotteisten mallien käyttöä. Joissain tapauksissa voidaan yhdistellä eri ulottuvuuksia omaavia malleja. Riittävän tarkkojen tulosten saamiseksi laskentamallia valittaessa täytyy huomioida elementtityypit. Myös verkon tiheys tulee valita tilanteeseen sopivaksi, vaikka laskentatehoa olisi rajattomasti ei mahdollisimman tiheä verkko ole pelkästään ratkaisu, jos elementtien geometria ei

ole tarpeeksi säännöllistä. FEM-ohjelmiston mallin luonnissa ei siis ole kysymys pelkästään geometrian luomisesta, koska geometrialla pitää pystyä luomaan tehokas elementtiverkko. Koska laskentatehoa ei ole rajattomasti, ei analyysejä pysty aina tekemään tarkan 3D-mallin pohjalta, mikä sinänsä olisi tulosten kannalta kaikkein paras vaihtoehto. Tarkka 3D-malli ei ole analyysin itsetarkoitus, jos sopivasti yksinkertaistetulla mallilla saadaan käytettävillä laskentaresursseilla riittävän tarkka likiratkaisu, mikä on muutenkin elementtimenetelmän tarkoitus. /1, 2/

CAD-ohjelmistoissa mallinnetut geometriat, varsinkin suuret ja monimutkaiset geometriat, voi ja kannattaa yleensä tuoda laskentaohjelmistoon sellaisenaan. Moni CAD-ohjelmisto sisältääkin valmiiksi FEM-lisäosan tai voisi sellaisen siihen liittää. CAD-ohjelmistosta tuotu geometria ei kuitenkaan aina sellaisenaan ole hyödyllistä tuoda laskentaohjelmistoon. CAD-malleja joudutaan ja kannattaa yleensä yksinkertaistaa, jotta saadaan haluttu ja riittävän tarkka elementtiverkko. Ohjelmasta riippuen, tuotuihin malleihin voi syntyä myös turhaan tiheitä kohtia verkossa geometrian kannalta sellaisissa paikoissa, missä se ei ole tarpeellista. Elementtien materiaaliominaisuudet, mallin tuenta ja kuormitukset ovat verkon ja elementtityyppien lisäksi keskeisessä asemassa tulosten kannalta. Yksi elementtimenetelmän etu on, että se on niin pitkälle kehitetty. Esimerkiksi numeerisen ja heikon osittaisdifferensiaalisyhtälön luonnin suhde tuo esiin virheet ja merkit siitä, että jokin on vialla silloin, kun mallia ratkaistaan tietokoneohjelmalla. Elementtimenetelmä myös vaatii, että mallin geometria on niin sanotusti vesitiivis. Tarkoittaen, että FEM-analyysissä geometrian pinnat eivät saa olla irtonaisia, vaan ne pitää olla yhdistetty. 3D-pinnat joskus voivat CAD-ohjelmissa muodostaa tilavuuden, mutta elementtimenetelmässä pinnat tulee olla yhdistettynä muodostaakseen tilavuuden. Vaikka geometrian pinnat muodostaisivatkin tilavuuden, voi silti jotkin pinnat olla liian kapeita tai jotkin kulmat liian lyhyitä suhteessa muuhun geometriaan. Voivat tämän tyyppiset ei-toivotut piirteet muodostaa verkkoon turhia keskittymiä ja tätä kautta johtaa virheellisiin tuloksiin. /1, 2/

Mallien esikäsittely kattaa ison osan elementtimenetelmästä tarvittavista toimenpiteistä. Mallit pitää tietysti luoda, mutta tuodessa CAD-ohjelmasta geometrioita pitää yleensä korjata ja yksinkertaistaa. Nykypäivänä mietittäessä

elementtimenetelmää monifysikaalisten mallien rakentaminen ei ole tavatonta, vaikka alun perin menetelmää on käytetty pääasiassa koneteknisissä ja lämmönsiirtymä analyyseissä. Nykyään siis menetelmän käyttö on levinnyt laajalti myös esimerkiksi elektromagneettisiin simulaatioihin ja virtaussimulaatioihin. Ylipäätään elementtimenetelmä on otettu käyttöön kaikilla tieteen aloilla. Riippumatta, kuinka elementtimenetelmää sovelletaan, analyysi on sama. Mutta yleisesti, FEA tai FEM viittaa rakenneanalyysiin. /1, 2/

Rakenteellisessa mekaniikassa fysiikan lait pohjautuvat voimatasapainoon ja rakenteellisiin suhteisiin, mitkä liittyvät jännityksiin ja venymään, esimerkiksi Hooke'n lakiin. Fysiikan lakeja kuvataan yleensä matematiikan avulla ja osittaisdifferentiaaliyhtälöillä voidaankin kuvata energian, massan ja liikkeen säilymisen lakeja. Perussuhteilla voidaan myös kuvata fysiikan lakeja muuttujilla, kuten lämpötila, tiheys, nopeus, potentiaali tai muilla riippuvaisilla muuttujilla. Ja ratkaisuja kuvataan tilassa ja ajassa, riippumattomien muuttujien x , y , z ja t mukaan. /2/

2.2 Väsyminen

Väsymisilmiö esiintyy tilanteessa, kun rakenteeseen kohdistuu suuria määriä syklisiä jännityksiä. On hyvin mahdollista, että rakenteeseen muodostuu murtumaan johtavia säröjä. Tämä toteutuu, vaikka maksimijännitys yksittäisissä sykleissä alittaisi rakenteen materiaalin myötö- ja murtorajan. Väsymisraja on normaali satunnaismuuttuja, minkä keskiarvon ja keskihajonnan oikeellinen määrittäminen vaatii testausta. Testaukset voidaan suorittaa testisauvoilla tai varsinaisilla komponenteilla. Testauksia pitää kuitenkin suorittaa lukuisia kertoja, jotta voidaan varmistaa tulosten oikeellisuus. Metallien väsymisrajan saavuttamiseksi tarvitaan yleensä yhdestä kymmeneen miljoonaa kuormituskertaa. /3/

Kun rakennetta kuormitetaan, säröt alkavat ydintyä mikrokooppisella tasolla. Sykliä jatkua säröt kasvavat ja lopulta johtavat rakenteen rikkoutumiseen. Tutkitessa väsymistä pitää ottaa huomioon ei pelkästään rakenteen suunnittelugeometrian kannalta, vaan myös materiaalien kannalta. Säröt ydintyvät ja kasvavat materiaalin kideleikunauhoissa tapahtuvan syklisen liukuman seurauksena. Muutamia materiaaleja syntyvät muodonmuutoksia makrotasolla, vaikka jännitys ei

ylittäisikään materiaalin myötörajaa. Näitä muodonmuutoksia tapahtuu yleensä helpommin geometrian ulkoreunoilla, koska joka puolella ei ole materiaalia. Paikalliset aineviat, missä yleensä esiintyy jännityskeskittymiä, ovat erittäin riskialttiita paikkoja säröjen ydintymiselle. Liukumassa tapahtuva muokkauslujittuminen aiheuttaa liukunauhassa suuremman leikkausjännityksen vastakkaiseen suuntaan kuorman poistuessa. Viereisessä liukutasossa, mutta samassa liukunauhassa tapahtuva päinvastainen liukuma, eli intruusio. Intruusion särö kasvaa seuraavien syklien aikana. Todellisuudessa materiaaliin syntyvä särö ei ole äärettömän terävä, mutta lineaarinen ja kimmainen murtumismekaniikka olettaa matemaattisesti särön olevan terävä. Lisäksi metalleilla myötörajan ylittyessä materiaalissa tapahtuvan muodonmuutoksen seurauksena särön kärki todellisuudessa pyöristyy. Pyöristymisen johdosta särö muistuttaa enemmänkin lovea, minkä ympärille muodostuu jännityskenttä. Materiaalin rakeiden kidehiloissa jännityksen kanssa yhteisvaikutuksena särö ydintyy vinosti ja makroskooppisella tasolla kasvaessaan se etenee kohtisuoraan jännitysvuohon nähden. Seuraavan rakeen kohdatessaan pieni särö voi pysähtyä, jos syklinen jännitys on lähellä metallin jännitysrajaa. /3/

Ainevikoja kuten teräksissä tyypillisesti teräksissä esiintyviä epämetallisia sulkeumia tai valurautojen kutistuskalot ovat säröjen ydintymisen kannalta johtamassa siihen, että ainevikoja yritetään soveltaa enenevässä määrin metallien väsymisrajan tutkintaan. Haurasmurtumissa aineen ominaisäänennopeudella etenevä särö on kytköksissä atomitasojen sidosenergiaan, kun muodostuessaan se vapauttaa enemmän energiaa, kuin särön kasvattaminen kuluttaa. Ainekojen lisäksi suuri tekijä särön syntymiselle on pinnan virheet tai ylipäättään pinnan laatu. Pelkästään korrosio voi joissain tapauksissa heikentää väsymislujuutta jopa 90 % alkuperäisestä. /3/

Koska kuormitukset voivat olla staattisia tai dynaamisia, niitä pitää tutkia eri tavalla. Staattisia kuormituksia tutkittaessa riittää useimmiten, että jännitykset eivät ylitä varmuuskerroituja lujuusarvoja. Tietyissä tapauksissa pitää myös ottaa huomioon nurjahdus- ja lommahdusvarmuudet. Mikäli kuormitukset taas ovat vaihtelevia eli dynaamisia ja jännityssykkien lukumäärän ollessa suuri, staattinen analyysi ei riitä. Jännitysamplitudin ollessa vakio ja syklien määrä suuri, eli miljoonasta

ylöspäin, on väsymisanalyysin oltava sellainen, mikä nimellisesti tähtää ikuiseen elinikään. Toki tässä tapauksessa jännitysamplitudin ei saa ylittää suurinta väsymisrajaa. Jännitysamplitudi ja keski-jännitys ovat harvoin vakioita kone-elimissä. Momentti ne ovat riippuvaisia koneen eliniän aikana tapahtuvista käyttöolosuhteiden muutoksista ja ne myös vaihtelevat olosuhteiden mukaan. Esimerkkinä työssä tutkittavan moottoriin vaikuttavista vaihtuva-amplitudisistajännityksistä löytyy palotilaan ja sylinteriputkeen kohdistuvat jännitystilat. Lämpölaajenemisen takia voinäissä kohdissa käynnistyksen ja pysäytyksen aikana syntyä suuria jännitysamplitudeja. Näitä harvalukuisia jännityssyklejä kutsutaan low-cycle -jännityssykleiksi. Low-cyclejä tapahtuu moottorin eliniän aikana joitain tuhansia. Normaali käyntitilanteessa sytytyspaine aiheuttaa enemmän high-cycle -jännityssyklejä. High-cycle -jännityksillä tarkoitetaan usein esiintyviä pienempiä jännityksiä. /3/

Oikeita fysikaalisia suureita, kuten keskiarvoa ja keskihajontaa käyttävä todennäköisyysteoria tarjoaa luotettavamman tuloksen, kuin tilastollisella kokokertoimella laskettu väsyminen. Todennäköisyysteorian avulla tehty väsymisanalyysissä tarvitaan paikallisia jännityksiä, mitkä saadaan tuotettua elementtimenetelmän avulla. Perinteisesti väsymisanalyysit ovat perustuneet hieman vaihteleviin ja epämääräisiin käsitteisiin, kuten nimellisjännityksiin ja lovenvaikutuslukuihin. Jos halutaan päästä eroon epämääräisesti määritellyistä nimellisjännityksistä, täytyy analyysissä käyttää elasto-plastista ainemallia. Varmuuskertoimet vaihtelevat kyseessä olevasta riskistä ja keskihajonnasta koosta riippuen. Todellinen keskihajonta ja keskiarvo voidaan saavuttaa vain systemaattisella testauksella. /3/

Tutkittavan moottorin käyttötarkoitus altistaa sen suurelle määrälle toistuvia jännityksiä, mitkä voivat ajan kuluessa aiheuttaa rakenteiden murtumisen kohdissa, missä sitä ei haluta tapahtuvan. Nämä murtumat voivat johtaa nopeasti katastrofaalisiin seurauksiin. /4/

2.3 Nitrometaanikäyttöinen polttomoottori

Tarkasteltaessa polttomoottoria ja nitrometaanikäyttöistä polttomoottoria voisi ajatella, että toiminnallisesti eroja ei paljoakaan ole. Otetaan esimerkiksi, vaikka perinteinen nelitahtinen Otto-moottori ja sen toimintaperiaate. /4/

Mäntä liikkuu sylinterin ohjaamana, kiertokangen ja kampiakselin johdattelemaa rataa pitkin ylös ja alas. Joka toinen kerta ilman ja polttoaineen seos puristetaan ja sytytetään, jotta mäntä saadaan liikkumaan kohti alakuolokohtaa. Välikerroilla puristetaan pakokaasut pois ja alipaineella imetään uusi seos sisälle. Toisaalta taas ylipaineella ahdetuissa moottoreissa seosta tuodaan sylinteriin pakotetusti normaali-paineen tilavuuttaan enemmän ja tätä hyödynnetään myös kyseessä olevissa nitromoottoreissa. Venttiilien ohjaukseen tässä tapauksessa on käytetty kahta hammashihnalla käytettyä nokka-akselia. /4/

Pikaisella tarkastelulla voitaisiin todeta, että kyseessä oleva nitromoottori ei mekaanisesti eroa paljoakaan tavallisesta Otto-moottorista. Erot ilmenevät, kun verrataan polttoaineita ja rasituksia mille moottoreiden rakenteet altistetaan. Tavallista bensiiniä ja nitrometaania verrattaessa polttoaineina erot ovat suuret. Oikeastaan ominaisuuksiltaan nitrometaani muistuttaa enemmän räjähdysainetta, kuin polttoainetta. Nitrometaani on itsessään voimakkaampaa, kun esimerkiksi TNT, mitä puolestaan käytetään yleisesti sotilaskäyttöön tarkoitetuissa räjähteissä. Joten on hyvin tärkeää tiedostaa turvallisuusriskit. Esimerkiksi pelkästään moottorin käynnistäminen väärin voi aiheuttaa kuolemaan johtavia seurauksia, niin käynnistäjälle kuin mahdollisille sivusta seuraajille, moottorin räjähtäessä. Käsitellessä yli 50 % nitrometaania sisältäviä polttoaineita, tulee asiaan suhtautua erityisellä vakavuudella ja varovaisuudella. Nitrometaanikäyttöinen polttomoottori muistuttaa enemmän ominaisuuksiltaan rakettimoottoria, kuin bensiinikäyttöistä polttomoottoria. Moottori käyttäytyy, kuin kemiallinen reaktori, missä on ensisijaisen tärkeää pitää yllä ja hallita reaktiota, jotta reaktiosta ei tulisi hallitsematon ja synnyttäisi räjähdystä. /4/

Nitrometaania voi periaatteessa kutsua polttoaineeksi, mutta oikeastaan se on monopropellantti tai ajoaine. Toisin, kuin bensiini ja ilma, mitkä muodostavat kemiallisella reaktiolla bipropellantin. Tarvitsee siis bensiini räjähtääkseen hapettimen. Oikein käsiteltyinä ja oikein varastoituina monopropellantit pysyvät vakaina, mutta vääränlaisissa olosuhteissa ne räjähtävät vapauttaen huomattavasti enemmän energiaa. Monopropellantit eivät tarvitse muita kemikaaleja palotapahtumaan. Top Fuel -moottoreissa kyky hallita palotapahtumia ja polttoaineen käsittelyä on yleisesti

perustunut vuosikymmenten käytännön kokeiluihin ja kokemuksiin, eikä niinkään paljon tieteellisiin tutkimuksiin. /4/

3 ANALYYSIN TOTEUTUS

Aikaperusteisiin simulointeihin luontevimmaksi ohjelmistoksi valikoitui Comsol Multipysics, sen tarjoaman laajan kokonaisuuden simulointimallien luomiseen. Työtä tehdessä jouduttiin kuitenkin tekemään kompromisseja esimerkiksi pulttien kiinnitysten, kierteiden ja esijännitysten suhteen. Dynaaminen kokonaisanalyysi osoittautui niin laskentatehoa vaativaksi, että päätettiin ratkaisuja yksinkertaistaa kokonaiskuvan vuoksi.

3.1 Lähtötiedot

Opinnäytetyön suorittamiseen tarvittava lähtötiedot ovat peräisin työn toimeksiantajalta. Lähtötiedot, mihin kuuluu sylinterin painearvot ja sylinterin lämpöarvot on tuotettu simuloituna GT-Power-ohjelmistolla. Paine ja lämpötila on simuloitu tiedossa olevien tietojen, kuten kiihtyvyyden ja moottoripyörän massasta saadun tehon ja väännön pohjalta. tietojenkäsittelyä varten saatiin toimeksiantajalta myös moottorin perustiedot, kuten iskun- ja kiertokangennpituus.

Sylinterin painearvot yksinkertaistettiin Excelissä-ohjelmistossa laskenta-ajan säästämiseksi (Liite 1). Paineikäyrän mittauspisteistä valittiin ne, missä kulmakeroin selvimmin muuttui. Tarkistus testauksessa todettiin, että yksinkertaistaminen ei vaikuta lopputulokseen merkittävästi. Varsinkaan, kun otetaan huomioon, että paineen efektiivinen muutos tapahtuu sekunnin tuhannesosissa. Alkuperäisiä mittauspisteitä oli 720 ja yksinkertaistuksen jälkeen Comsoliin vietäviä tietoja oli 73:n mittauspisteen verran (Liite 1).

Lämpöarvoja hyödynnettiin ainoastaan kertomaan lämpökäyrän muoto (Liite 1). Käytettävät lämpöarvot interpoloitiin toimeksiantajan määrittelemän alkuarvauksen pohjalta. Alkuarvaus perustuu sylinteriputken teräksen kerroksittaiseen värjäytymiseen. Tiedossa on myös sylinterin ulkopinnan lämpötila, mikä auttoi haaru-koinnissa. Tutkittavan moottorin männänlaki yltää yläkuolokohdassaan (YKK) kolmen millimetrin päähän sylinteriputken yläpinnasta. Toimeksiantajan mukaan palotapahtuman räjähdysrintama yltää sylinteriseinämille männän liikkuessa alaspäin

noin viisi millimetriä sylinteriputken yläpinnasta. Tämä on päätelty sylinteriputken teräksen kuumenemisen aiheuttamasta vääjätymisestä.

Tilavuus ja sitä tärkeämpi männän aseman selvittämiseen vastaaville kampikulmille tai ajanhetkille saatiin konvertoimalla lähtötiedot alkamaan nolasta. Männän aseman muuttumiseen ajansuhteen tarvitaan:

- moottorin iskunpituus
- kiertokangenpituus
- männän puristuskorkeus.

Kampiakselin kulma vieään kahden täyden kierroksen aikana aikajanelle, moottorin pyörimisnopeuden ollessa 9000 1/min. Näin saadaan tietää missä kulmassa akseli on milläkin ajanhetkellä. Tästä saadaan laskettua männän asema ajanhetkelle (Liite 1). Kaavassa 1 on esitetty männän aseman muutokseen tarvittavat arvot. Lopulliseen männän yläreunan asemaan tarvittiin männän puristuskorkeus lisätä tulokseen. Kun arvoja vielä halutetaan käyttää Comsolissa pitää sylinterikorkeudesta vähentää saatu arvo. Kaikki laskenta on suoritettu (Liite 1) sisällä.

$$x = r \cdot \cos A + \sqrt{i^2 - r^2} \cdot \sin^2 A, \text{ missä} \quad x = \text{männän asema} \quad (1)$$

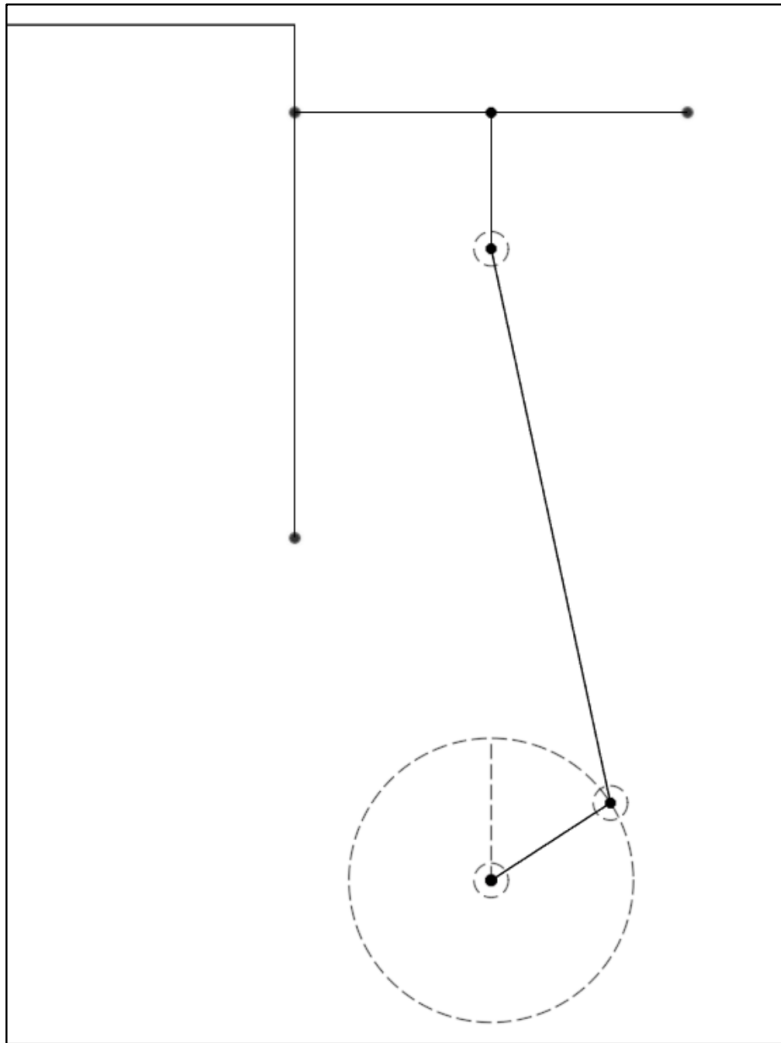
$r = \text{iskunpituus}/2$

$A = \text{kampikulma}$

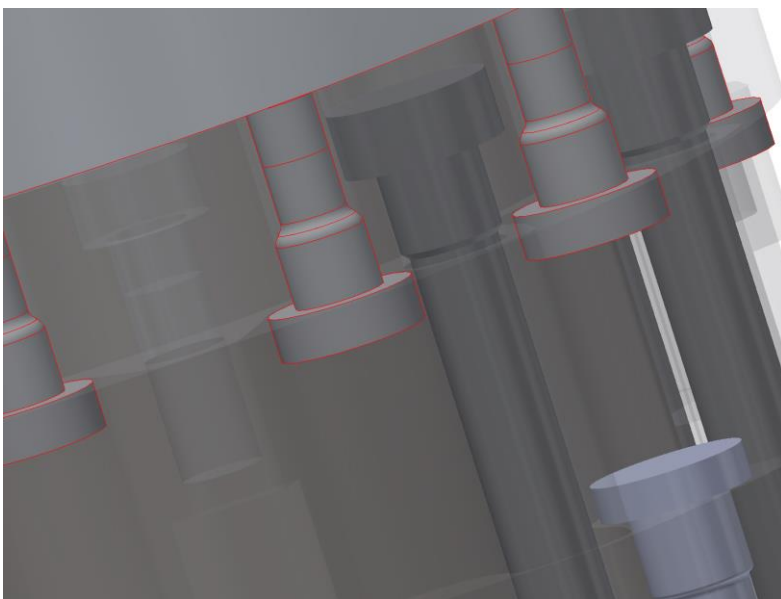
$i = \text{kiertokangenpituus.}$

Kaavan tarkistamiseksi ja tueksi tehtiin Autodesk Fusion 360 -ohjelmistolla luonnos kampikokoonpanosta, millä voitiin tarkistaa männän asema, luonnoksen kampikulmaa vaihtamalla (Kuva 2).

Toimeksiantajalta saatuihin 3D-malleihin jouduttiin tekemään joitain muutoksia. Suurimmat muutokset tehtiin palotilaan ja sylinterikuoren ulkopintaan. Muutokset tehtiin mallien yksinkertaistamiseksi, jotta simulaation vaatimia laskentatehoja saatiin pienennettyä. Malleihin tehdyt muutokset koskevat suurimmaksi osaksi pyöritysten ja palotilan piirteiden yksinkertaistamista, mutta esimerkiksi sylinterin ja kannen pulttien mutterit ovat mallinnettu kiinteiksi osiksi pultteja (Kuva 3).



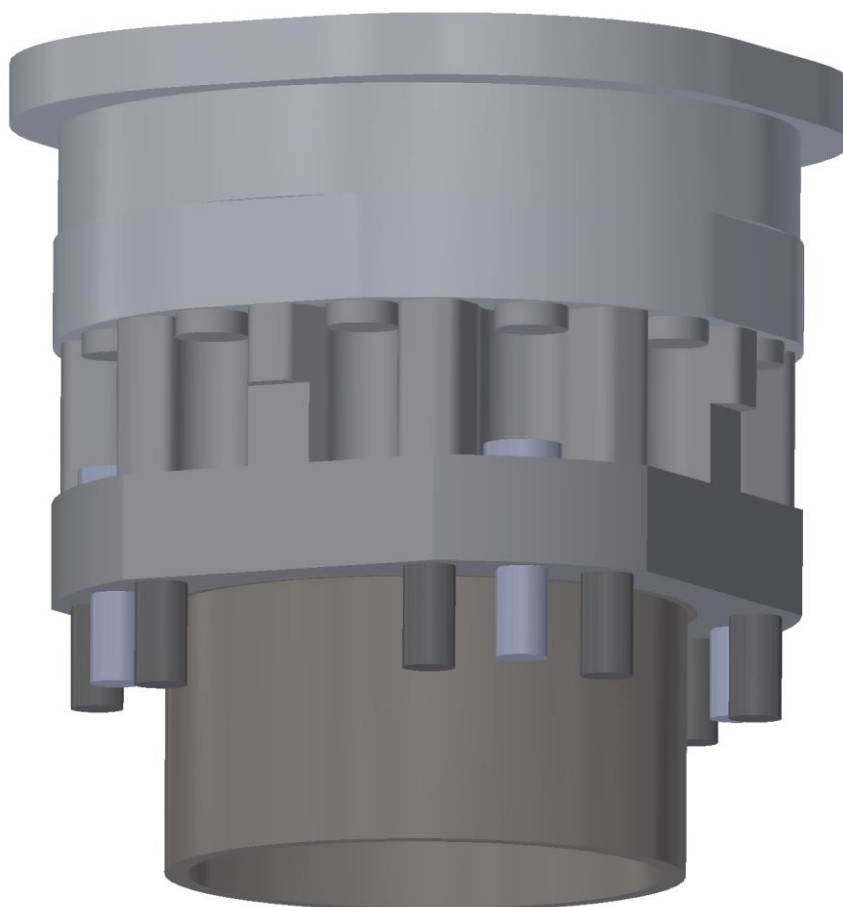
Kuva 2. Luonnos kampikoneistosta.



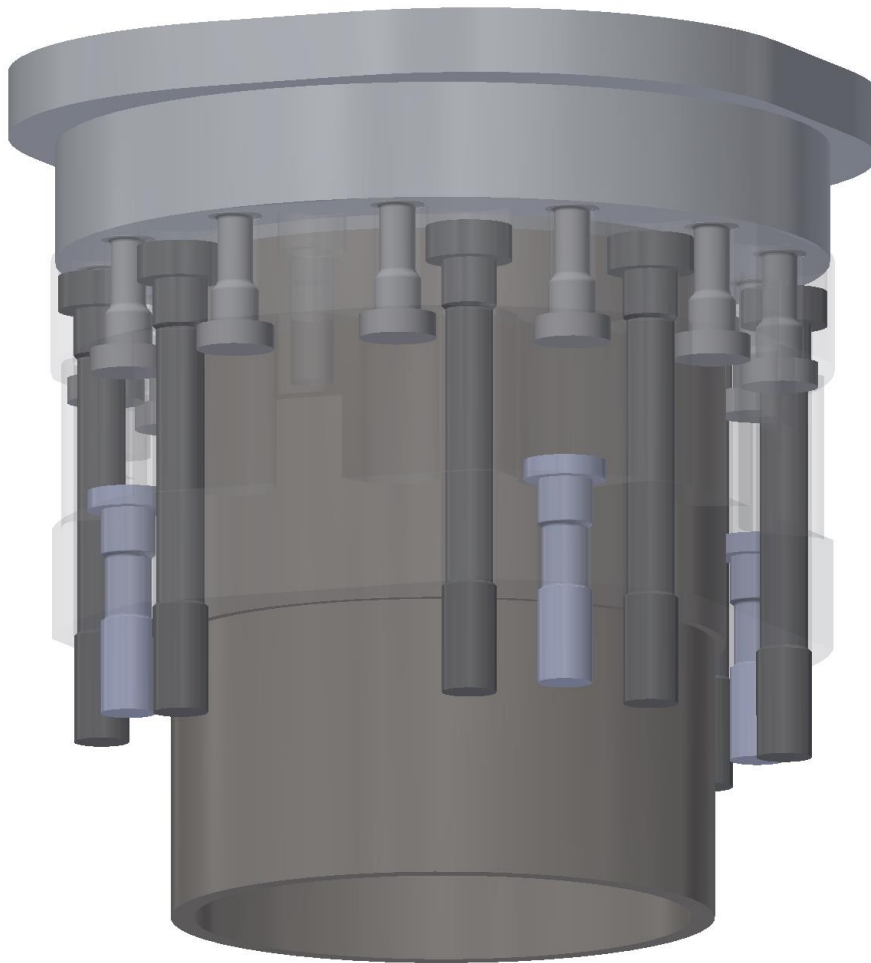
Kuva 3. Pultit ja mutterit.

3.2 Sylinterikomponentit ja materiaalit

Mallit on alun perin suunniteltu ja luotu Solidworks-ohjelmistolla, mutta niitä on muokattu laskennan yksinkertaistamiseksi Autodesk Inventorilla. Toimeksiantaja on myös muokannut joitain malleja plagioinnin välttämiseksi. Kokoonpano ennen mallien viemistä Comsoliiin suoritettiin myös Inventorilla. Kokoonpanossa oli otettava huomioon geometrioiden epäsymmetrisyydet, mitkä joissain kohdissa olivat vaikeahkoja huomata (Kuva 4 ja 5).



Kuva 4. Sylinterikokoonpano.



Kuva 5. Sylinterikokoonpanon pultit.

3.2.1 Sylinteriputki

Kyseisessä moottorissa käytettävä sylinteriputki on poraukseltaan 114.3 mm ja kokonaispituudeltaan 149.5 mm (Kuva 6). Ulkomitoiltaan sen alaosan halkaisija on pienempi 125 mm, kuin pää halkaisija 130 mm 86 mm matkalta yläosasta mitattuna. Yhdessä palotilan kanssa, sylinteriputki on keskeisessä roolissa ottamaan vastaan räjähdys aiheuttamat kuormitukset ensimmäisenä. Analyysiä varten mallista on jätetty nurkkapyöritykset pois.

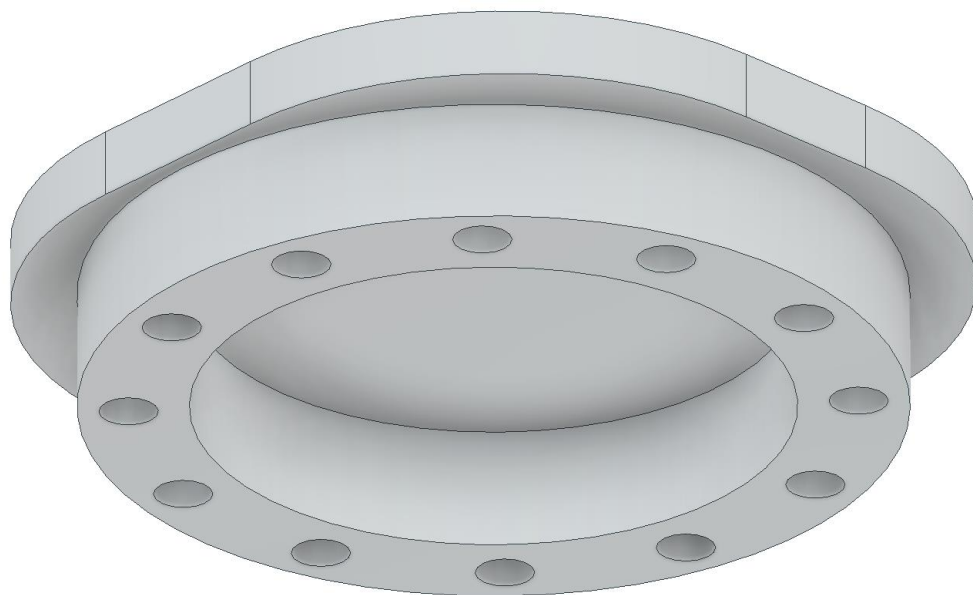
Materiaalina sylinteriputkessa käytetään ASTM-A536-pallografiittivalurautaa. Materiaaliominaisuuksiltaan sen murtolujuus 689 MPa on sinänsä riittävä ottamaan vastaan maksimiräjähdyspaineen 32.5 MPa, yksinään ilman tukirunkoa. Putket ovat peräisin Darton Sleevesiltä. /5/



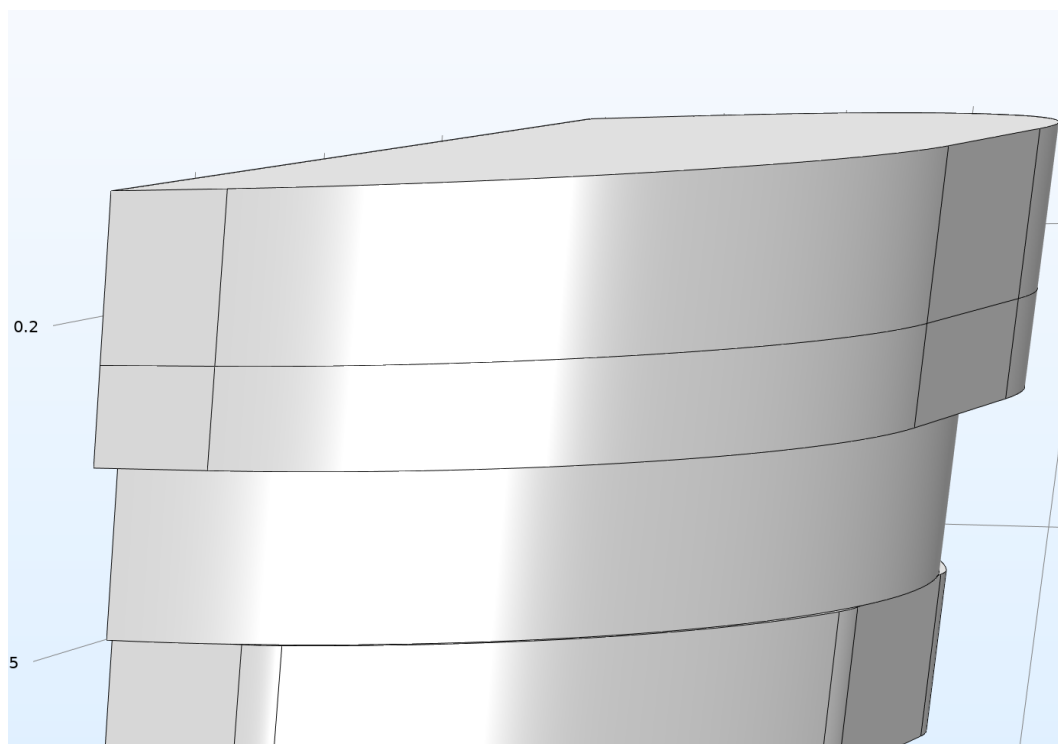
Kuva 6. Sylinteriputki.

3.2.2 Palotila ja sylinterikansi

Sylinterikannen mallista on tätä työtä varten jätetty pois suurin osa piirteistä, kuten imu- ja pakokanavat plagioimisen välttämiseksi (Kuva 7). Vain oleellimmat piirteet koko sylinterin lujuusanalyysia varten on jätetty. Comsolissa kannen päälle on vielä lisätty kerros kuvastamaan kannen rakenteita ja massaa (Kuva 8). Materiaaliltaan sylinterikansi on 7075-alumiinia.

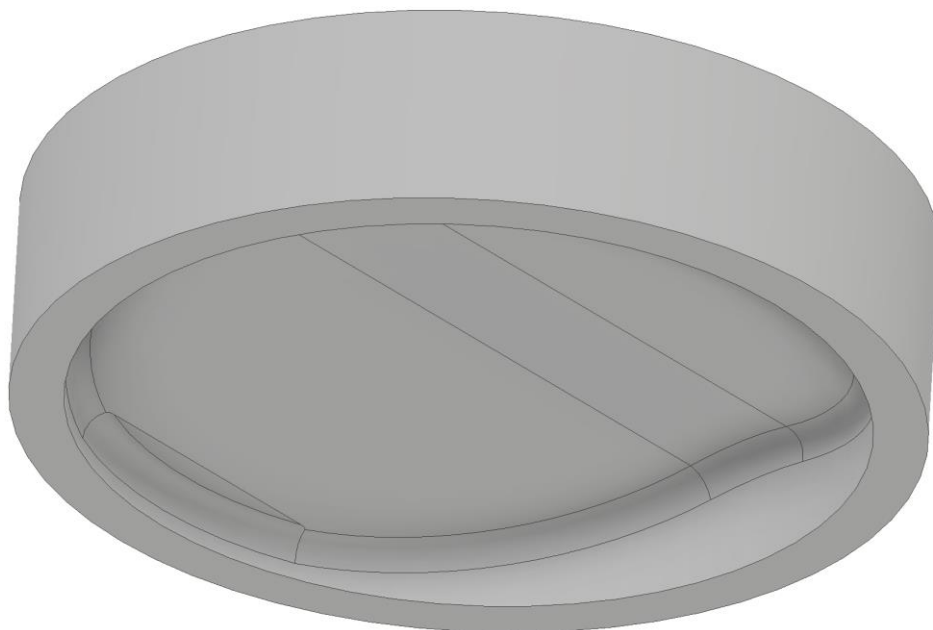


Kuva 7. Sylinterikansi.



Kuva 8. Sylinterikansi muokattuna Comsol Multiphysicsissä.

Palotila on oleellisin osa kansirakennetta analyysin kannalta, se uppoutuu kannen sisälle 30 mm (Kuva 9). Palotila on kutistusliitetty kansirunkoon ja analyysissä niitä käsitelläänkin yhtenä kappaleena analyysissä, mutta toki eri materiaaliominaisuuksilla. Sen lisäksi palotilaa on yksinkertaistettu poistamalla pienimpiä pyörityksiä ja venttiilit.

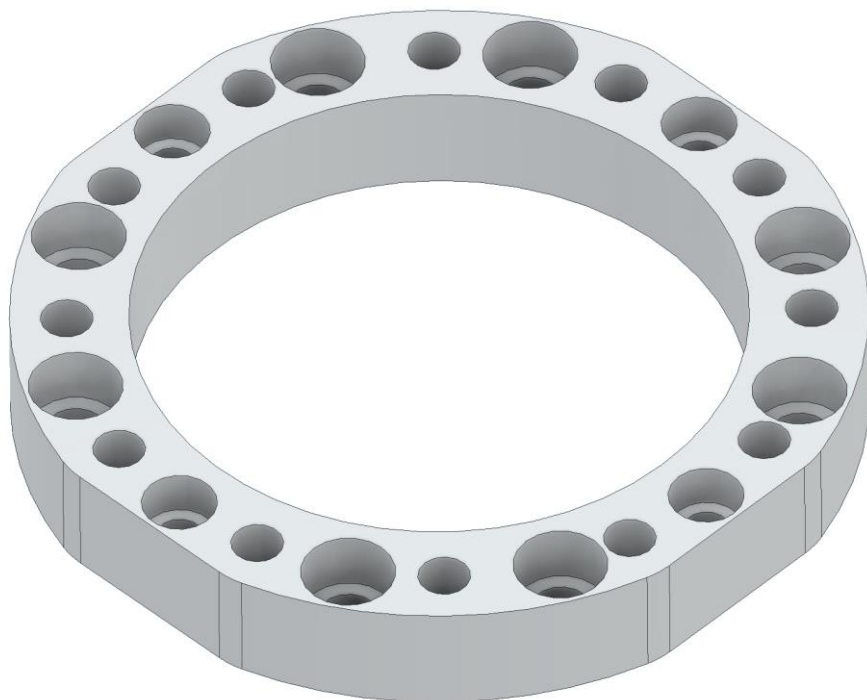


Kuva 9. Palotila.

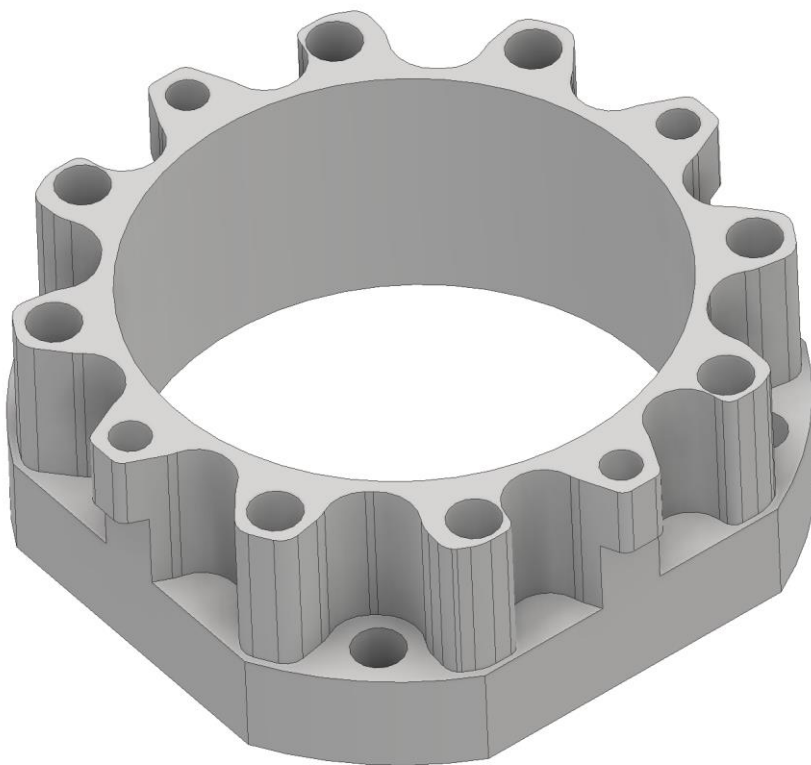
Materiaaliltaan palotila on Uddeholm Coolmould -beryllium-kupariseosta. Materiaalia käytetään tavallisimmin muovien valutyökaluissa. Korkean lujuuden, kovuuden ja lämmönjohtumisen vuoksi, sitä käytetään kyseisen palotilan materiaalina. Murtolujuus 1280 MPa. /4, 6/

3.2.3 Ylä- ja alasyylinteri

Sylinterin ulkokuori koostuu kahdesta osasta. Yläsylinteristä, mikä on koko rakenteen pulteilla yhdistävä rengas (Kuva 10). Sekä alasyylinteristä, mikä puolestaan luo kannen jälkeen suurimman osan kokonaisrakenteesta (Kuva 11). Materiaalina käytetään molemmissa samaa 7075-alumiinia, kuin kannessa.



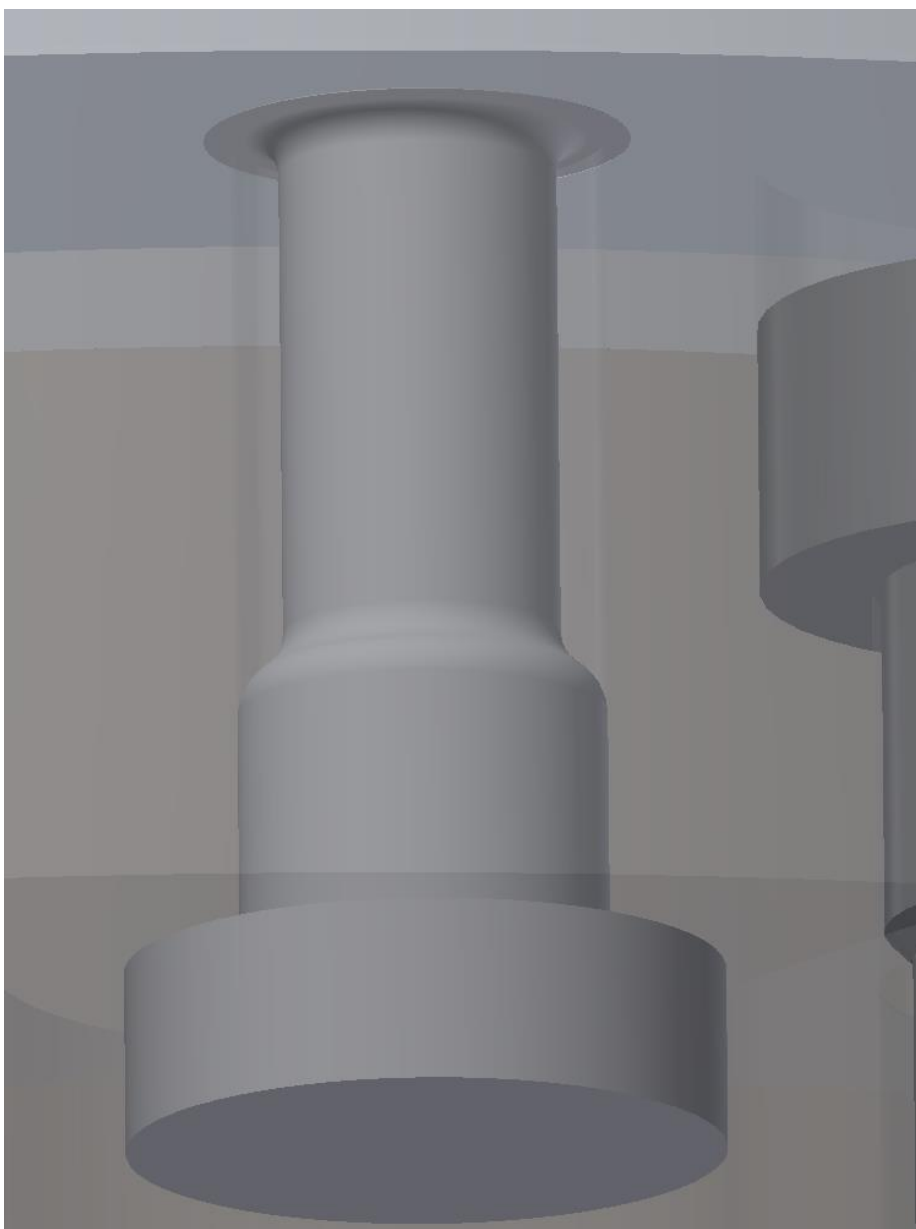
Kuva 10. Yläsylinteri.



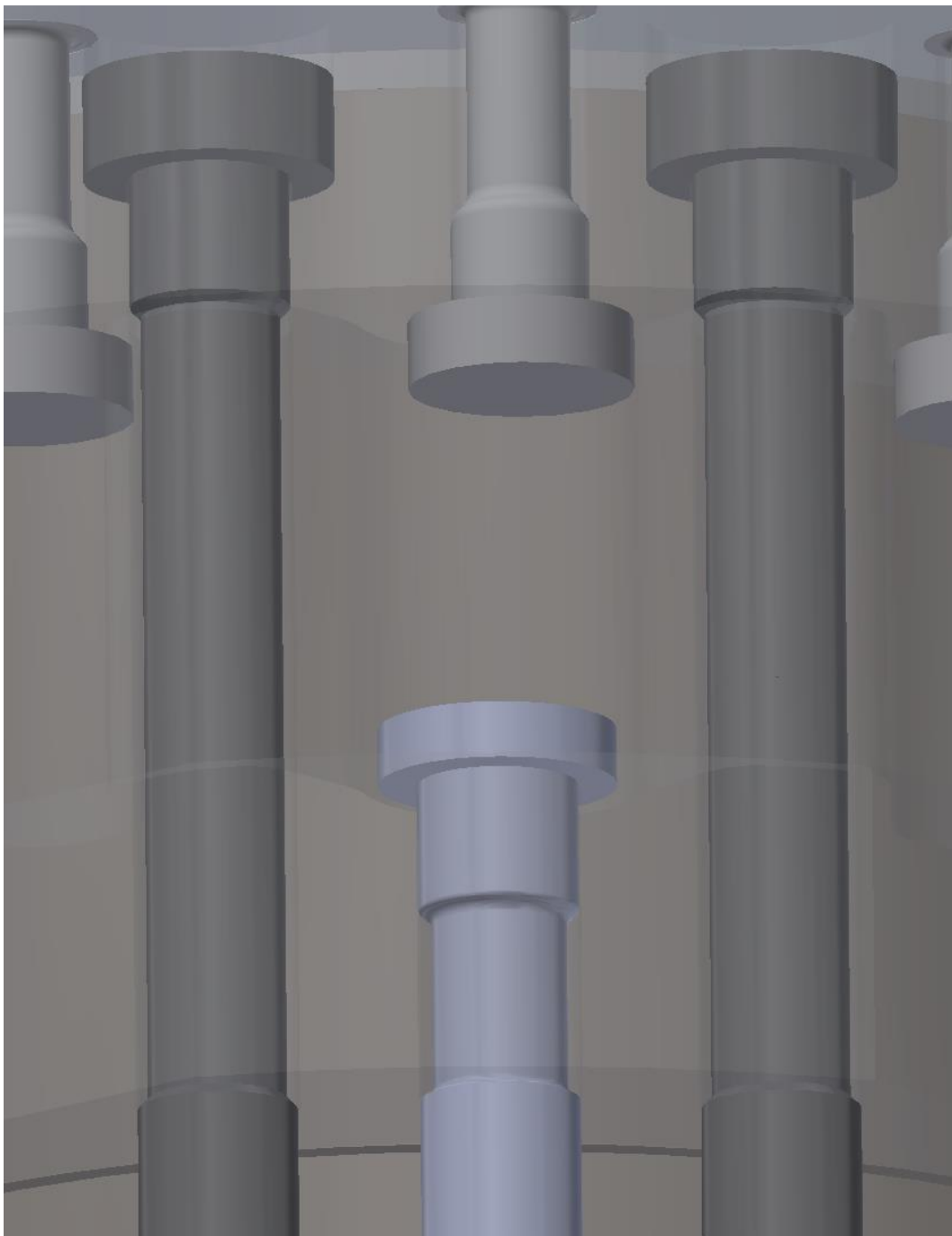
Kuva 11. Alasylinteri.

3.2.4 Pultit

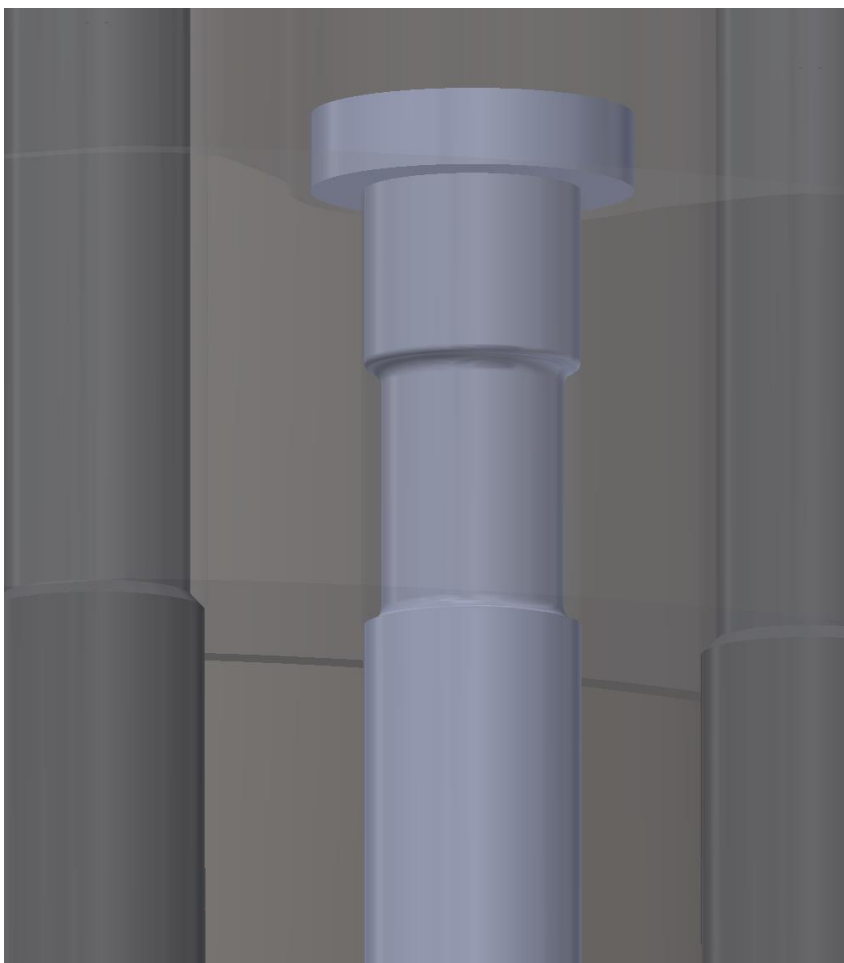
Kannen- ja sylinterinpultit ovat toimeksiantajan alihankkijalla teettämiä tarkoitukseen varten valmistettuja pultteja. Analyysiä varten niitä on muokattu siten, että mutterit ovat kiinteä osa pulttia (Kuva 12–15), koska tarkat FEM-mallinnetut kierreet ovat vaikeahkoja rakentaa ja niiden laskeminen kuluttaa laskentatehoa jo entistään niitä vaativassa laskennassa.



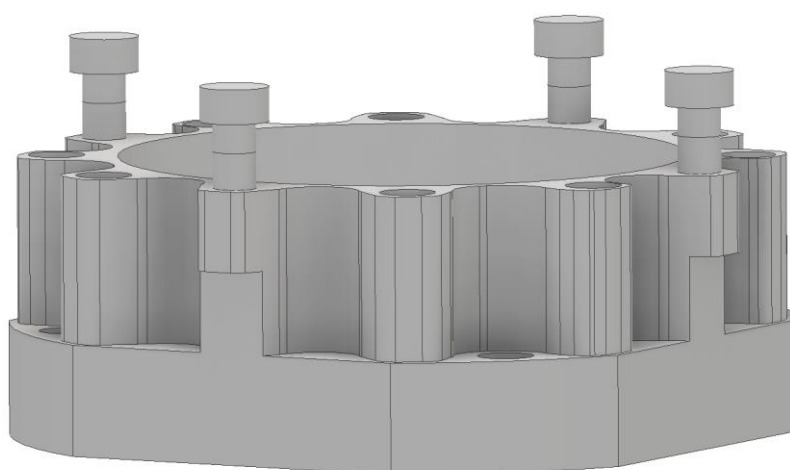
Kuva 12. Kannenpultit.



Kuva 13. Sylinteripultit kuvassa pisimpinä.



Kuva 14. Alasynteripultti.



Kuva 15. Alasynteri, missä M10-yläsynterin kiinnityspultit kiinni.

3.3 Analyysi elementtimenetelmällä

Mallit tuotiin Autodesk Inventorista Comsol Multiphysicsiin kokoonpantuna. Komalli puolitettiin symmetriatasolla Comsolissa määritetyn xz-tason avulla, jotta voitiin säästää laskentatehoa. Mallin puolikkaan olisi voinut vielä puolittaa siten, että jäljelle olisi jäänyt 1/4-osa kokonaismallista. Tätä ei tehty johtuen palotilan epäsymmetrisyydestä.

Ensimmäinen ongelma oli selvittää, kuinka mallia voidaan simuloida siten, että samalla ajanfunktiolla muutetaan rakenteisiin kohdistuvaa painetta, lämpötilaa ja samalla muutetaan tilavuutta. Tilavuuden muutoksella on tarkoitus kuvata männän liikettä. Männän liike taas vaikuttaa seinämä pinta-alaan, mihin paine ja lämpö kohdistuu. Lähtötiedot paine- ja lämpökäyrästä tuotiin suoraan Excel-ohjelmistosta (Liite 1) (interpolation) määritelmäksi Comsoliin. Näillä käyrillä muodostettiin muuttujat (variable), mitä puolestaan hyödynnettiin määriteltäessä kuormitusten arvoja.

Comsolissa kuormituksen alueen muuttaminen löytyi kokeilemalla ja yhdistelmällä erilaisia ratkaisuja. Esimerkiksi tässä tapauksessa sylinterin keskiakseli oli Z-akselin suuntainen, joten sylinterin yläpään kohdistuva kuormitus voidaan määrittää ilmaisulla (Kuva 17):

$$P \cdot (z > H), \text{ missä} \quad P = \text{paine} \quad (2)$$

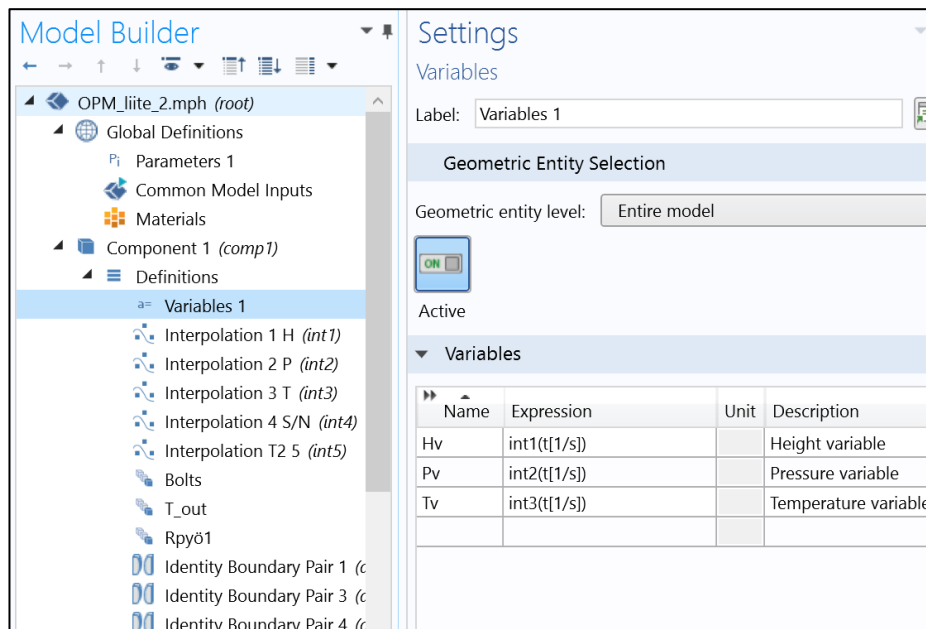
$z = \text{toiminta akseli}$

$H = \text{kuormituspinnasta poisjäävä korkeus.}$

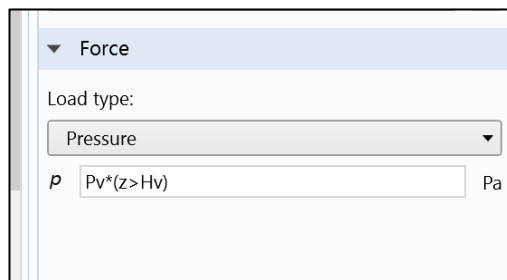
Aikafunktio saadaan tähän mukaan, kun yhtälön vakioiden paikalle määritetään muuttujat, mitä ajetaan tässä tapauksessa lähtötietojen käyrillä (Kuva 18–20). Muuttujat määritetään käyrien avulla antamalla niille aikaan sitova yksikkö, tässä

tapauksessa ($t[1/s]$) (Kuva 16). Suurin paine esiintyy 32.5 MPa 0.006 sekunnin kohdalla (Kuva 18).

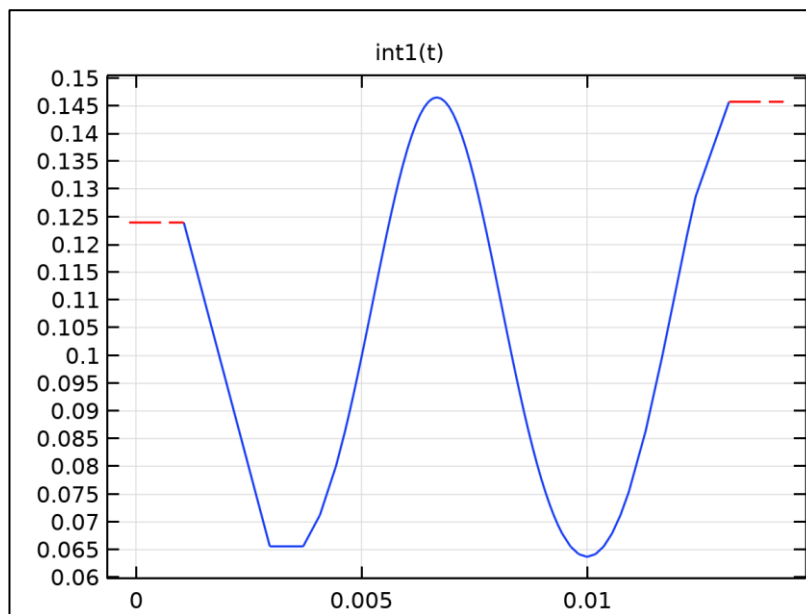
Suurimmaksi ongelmaksi mallin rakentamisessa Comsolilla osoittautui pulttiliitosten mallintaminen oikealla tavalla. Kaikki kontaktipinnat olivat ylipäättään laskentaresurssien puutteessa vaikea saada toimimaan. Kontaktipintojen verkotuksen saaminen oikeanlaiseksi kaikkiin tilanteisiin vaikutti melkein mahdottomalta. Pienimätkin muutokset kuormituksiin aiemmin toimivalla verkotuksella saa virheen aikaiseksi, jolloin verkkoja pitää säätää. Perusajatuksena kontaktipintojen verkotuksessa toimii yleensä tiheämpi verkko kohdepinnassa (destination), kuin aiheuttajapinnassa (source). Kohdepinnan verkon tulisi olla monimutkaisilla malleilla ainakin kaksi kertaa tiheämpi, mutta tilanne ei aina ole niin yksiselitteinen. Varsinkaan tämän kaltaisella mallilla, missä kontaktipintoja on eri tyyppisiä. Pulttiliitokset vaativat lieriöpinnalle yleensä eri säädöt, kuin mutterin kontaktipinnalle. Mutterien kontaktipintojen laskemista voi joissain tapauksissa helpottaa määrittämällä niille kartoitusmetodiksi initial configuration. Verkkojen lopuksi mentyä niin pieniksi, että laskentatehot eivät riittäneet, päätettiin siirtyä laskennan kannalta helpompiin ratkaisuihin.



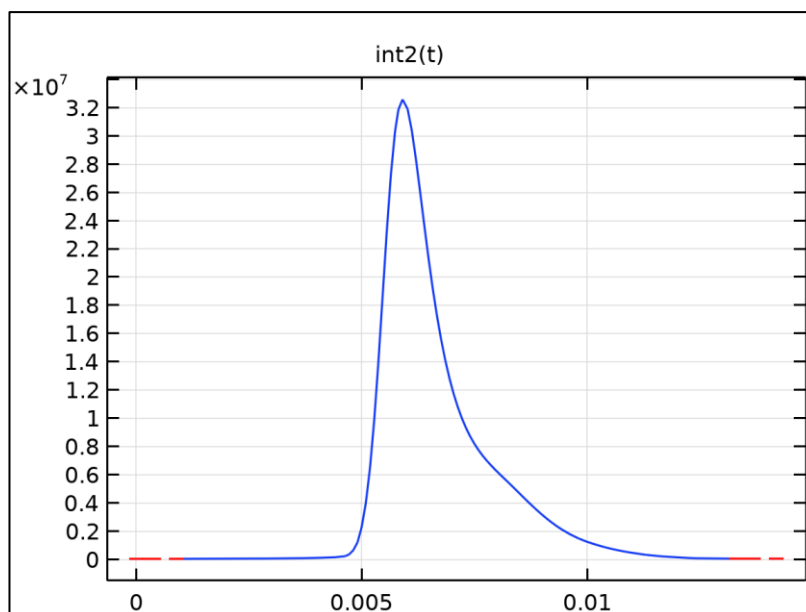
Kuva 16. Muuttujat Comsol Multiphysicsissä.



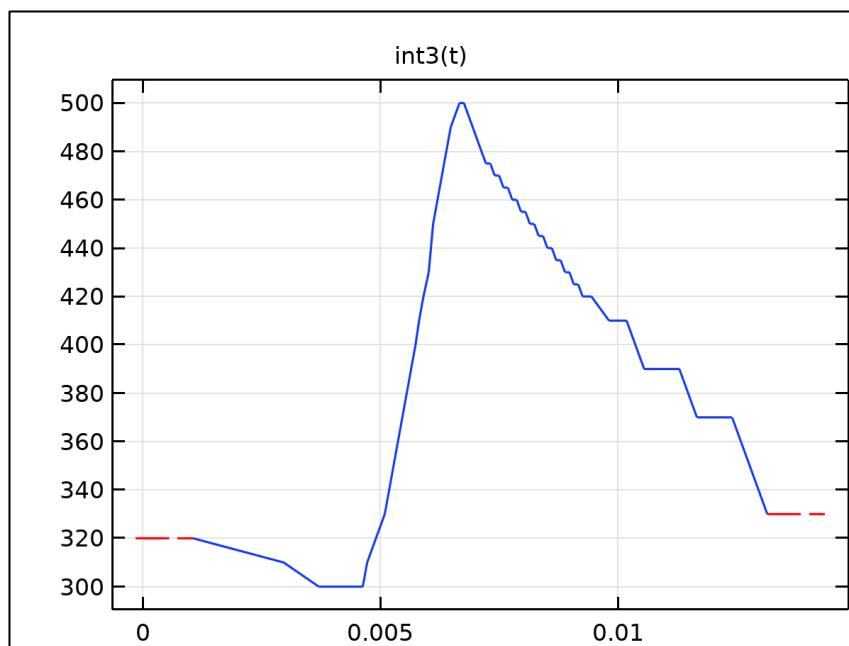
Kuva 17. Paineenmäärittäminen sylinteripinnalle.



Kuva 18. Männänliike ajansuhteen.



Kuva 19. Paine ajansuhteen.



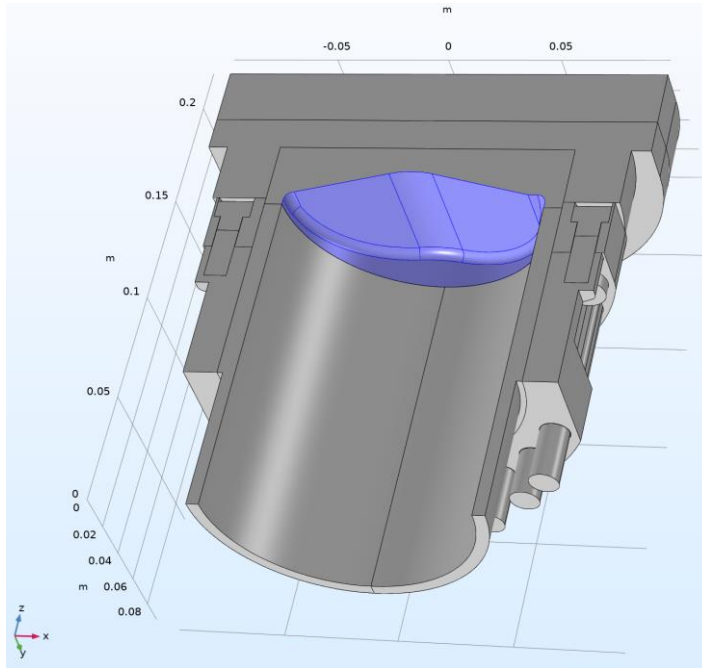
Kuva 20. Muokattu Lämpötila ajansuhteen.

3.3.1 Määritykset ja rajoitteet

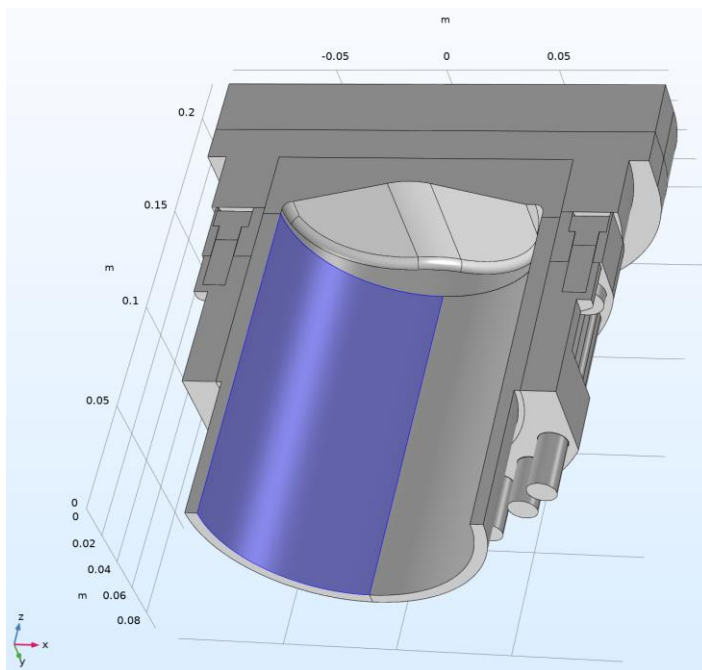
Comsolin Multiphysics -moduuli yhdistää lämmönsiirtymän vaikutukset mekaniisiin vaikutuksiin. Solid Mechanics -määritykset ja rajoitteet rakennettiin Comsolissa määrittämällä ensiksi kuormitukset (Boundary Load). Ensimmäisenä kuormituksena määritettiin palotilan sisäpinnoille paine (Kuva 21), minkä arvoksi annettiin muuttuja P_v . Seuraavaksi määritettiin sylinterin seinämiin kohdistuva paine kahdella eri määritteellä sylinteriputken geometrian ollessa jaettuna kahteen domainiin (Kuva 22). Määritteitä tehtiin kaksi siksi, että yhdellä määritteellä tulokset vaikuttivat vaihtelevan välillä epämääräisesti kahden laskennan välillä, vaikka mitään ei muutettu. Kahdella määritteellä ongelmaa ei havaittu. Molempiin määritteisiin asetettiin arvoksi paine- ja tilamuuttuja ilmaisu (Kuva 17).

Seuraavaksi geometrialle määritettiin rajoitteet. Koska mallin kiinnostavin osa on pultit, määritettiin sylinteripulteille ja sylinterinalapulteille kierteen osuudet paikallaan pysyviksi (Fixed Constraint) (Kuva 23). Sylinteri kiinnitettiin myös alasynterinin nurkasta pisterajoitteella paikoilleen, mutta tällä ei oletetusti ollut merkitystä tulosten kannalta ja sillä haluttiinkin alun perin vähentää turhia vapausasteita. Sylinteriputken alaosan ulkopinnalle määritettiin (Rolled) liukupinta (Kuva 24).

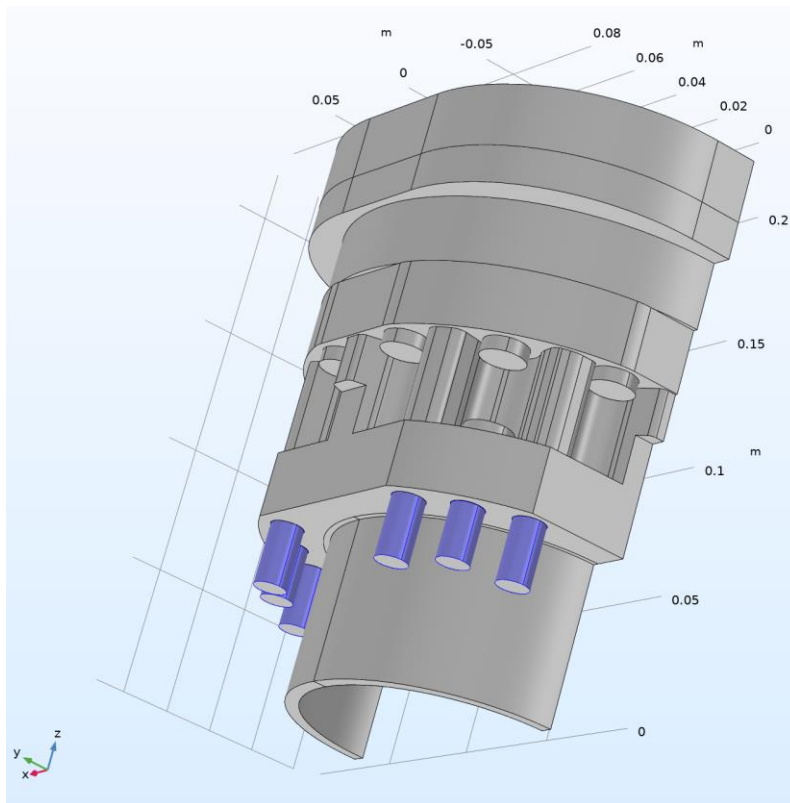
Kontaktipinnat määritettiin kiinteillä kontakteilla (Rigid Connector) ja näissä määrittelyissä kontaktipinnoille annettiin mahdollisuus liikkua (Kuva 25–27).



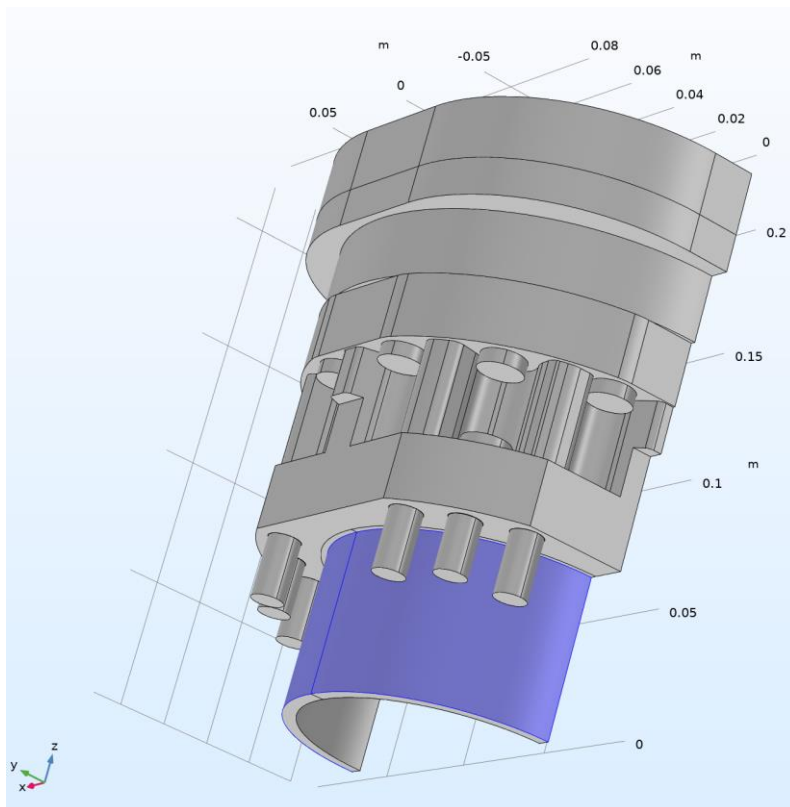
Kuva 21. Palotilan sisäpinnat.



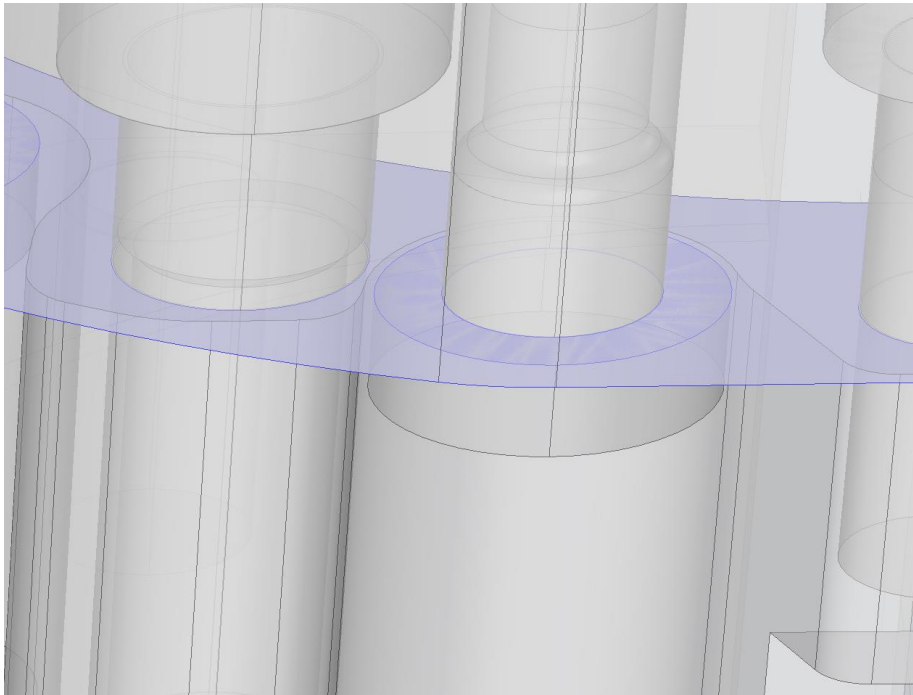
Kuva 22. Sylinteriputken sisäpinta valittuna kuormitukselle.



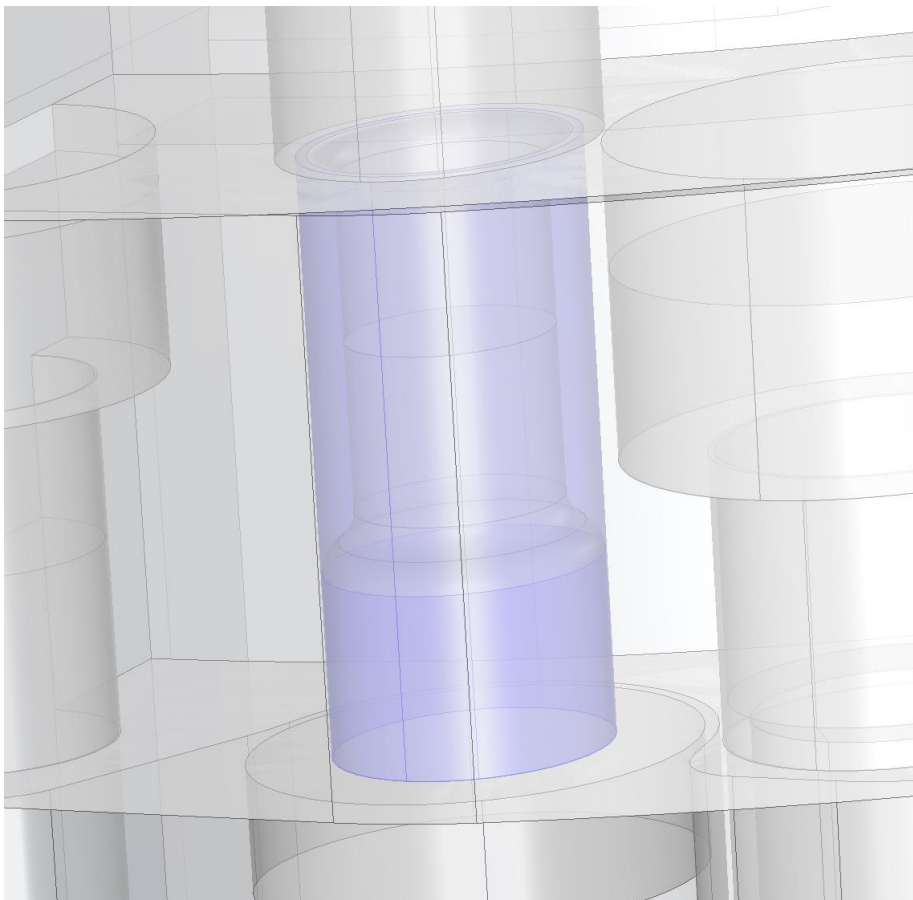
Kuva 23. Sylinteripulttien ja sylinterialapulttien kierre osuudet valittuna.



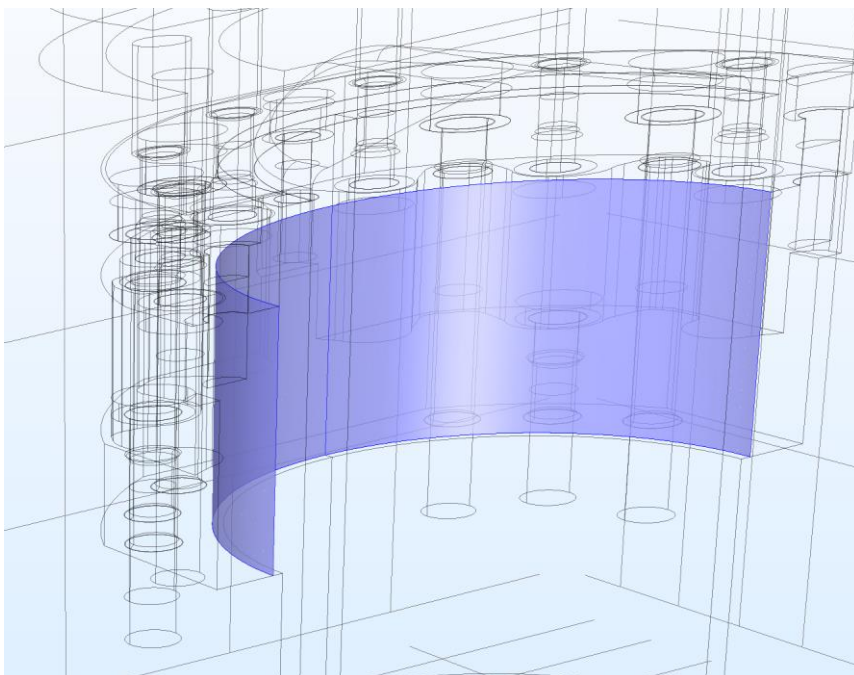
Kuva 24. Sylinteriputken alaosan ulkoseinä valittuna.



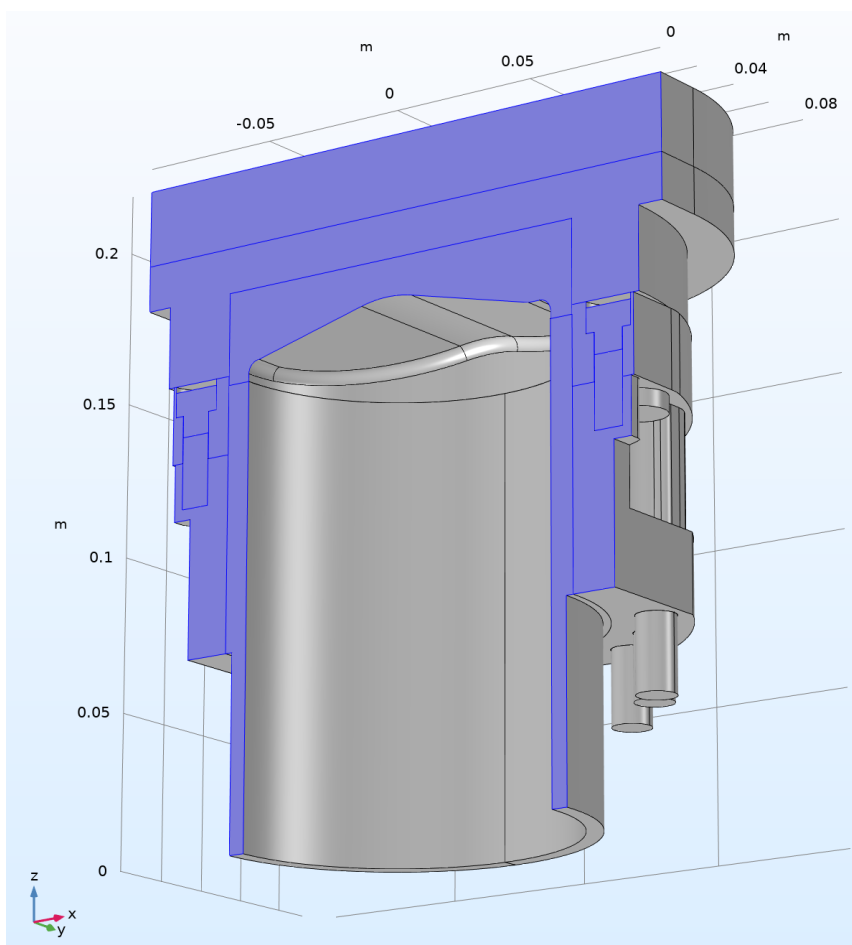
Kuva 25. Mutterin kontakti yläsylinterin kanssa.



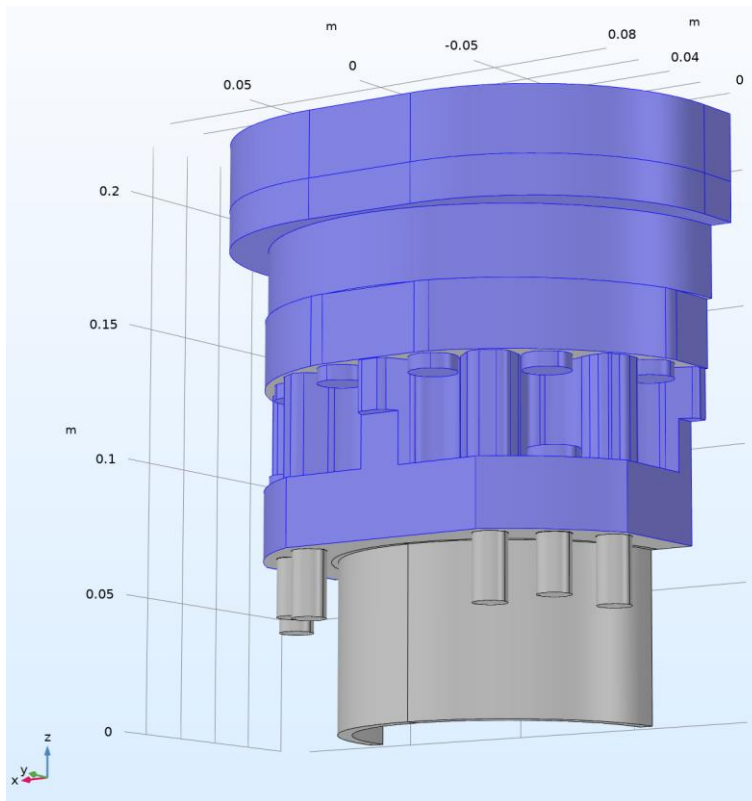
Kuva 26. Pultin ja seinämän kontaktitaso.



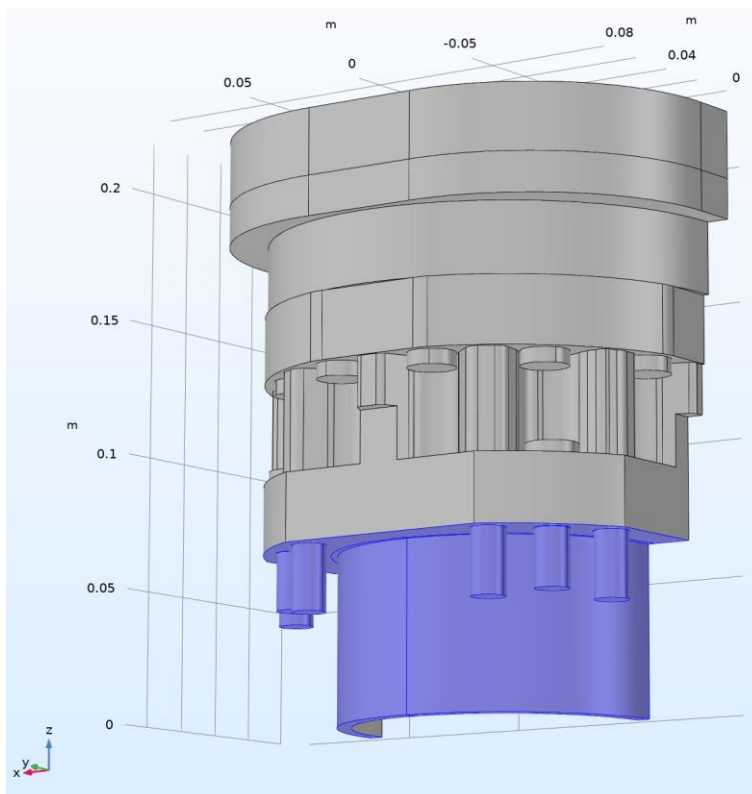
Kuva 27. Sylinteriputken ja alasynterin kontaktitaso.



Kuva 28. Mallin symmetriataso.

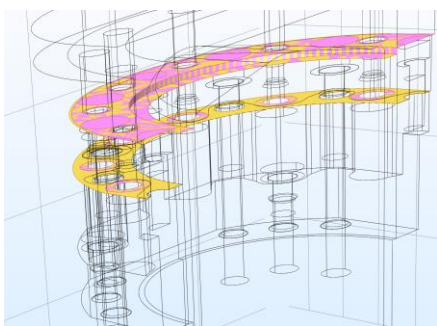


Kuva 29. Suurin osa ilmaviiran kanssa kohtaavista ulkopinnoista.



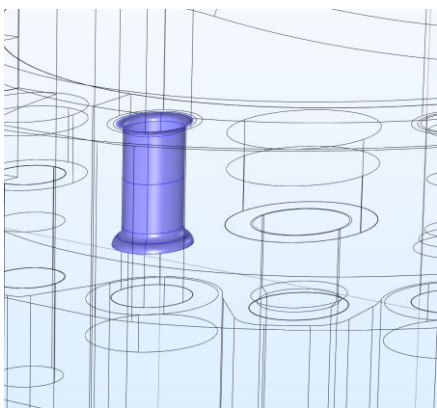
Kuva 30. Lohkon sisälle jäävät ulkopinnat.

Symmetriamääritys lisättiin geometrian halkaisutasolle (Kuva 28). Lämmön siirtymisen määritteiksi asetettiin tiedetyt lämpötilat sylinterin ja palotilan sisäpinnoille samalla tavalla, kuin paineille (Kuva 20). Erona tietysti eri muuttuja ja sylinterin pinnan liike jätettiin pois sylinteriputken lämmönjohtavuuden takia. Ilmavirran kanssa tekemissä oleville pinnoille määritettiin 10 m/s ilmavirralla pakotettu konvektio (Heat Flux) (Kuva 29). Moottorilohkoa vasten ja sen sisälle jääville alueille määritettiin toimeksiantajan kokemusten perusteella 330 kelvinin lämpötila (Kuva 30). Komponenttien rajoille määritettiin (Continuity) jatkuvuuspari (Kuva 31).



Kuva 31. Esimerkkejä jatkuvuus tasoista.

Väsymisen tutkimiseen määritettiin kokeilujen perusteella yhden kannenpultin kriittisimmät pinnat (Kuva 32). Väsymisen S/N-käyrä on arvio ja lähinnä tehty havainnollistamaan tilannetta mahdollisten tarkempien analyysien takia.

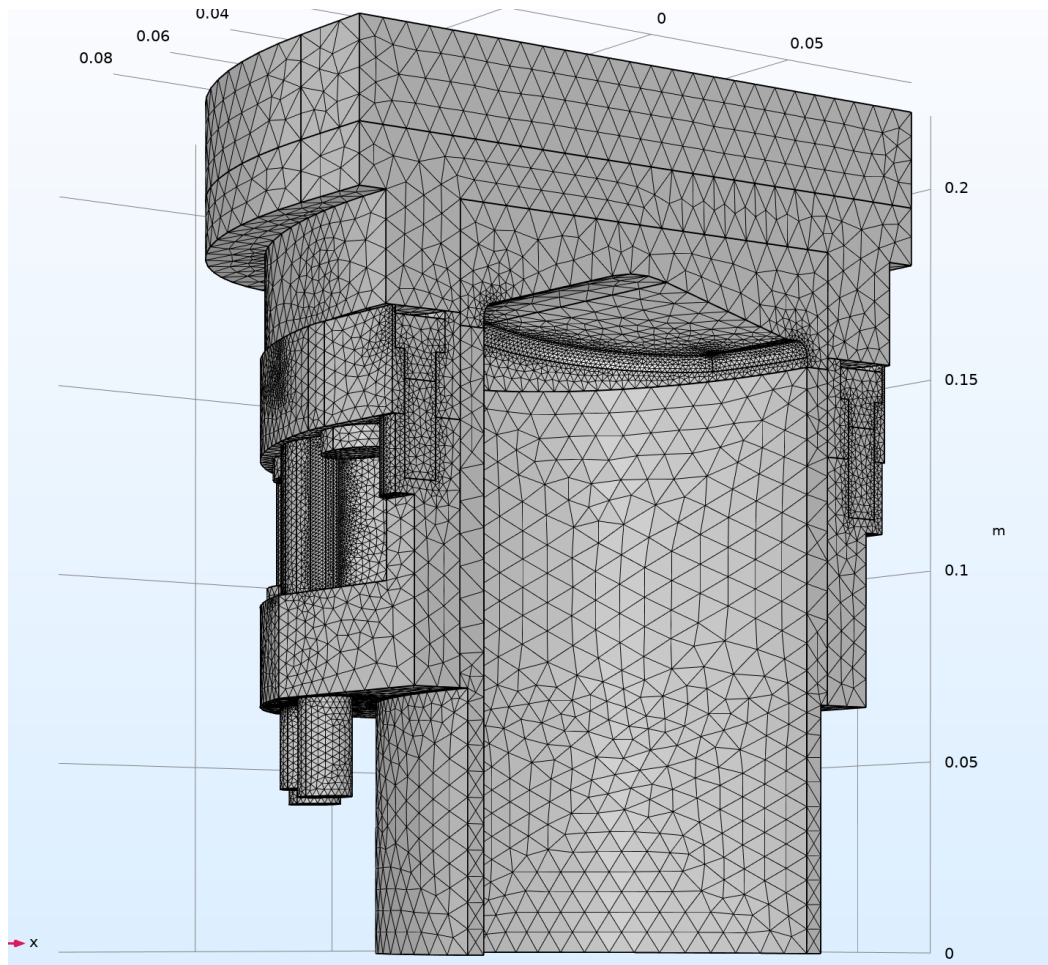


Kuva 32. Pultin pinnat väsymisanalyysiin.

3.3.2 Elementtiverkko

Työn analyysiä varten verkotus suoritettiin kahdella eri tavalla. Ensimmäisenä luotiin Comsolin automaattinen, fysiikan mukaan rakentuva verkko (Kuva 33).

Toiseksi verkoksi luotiin manuaalisesti verkko, missä otettiin huomioon eri tyyppiiset kokonaisuudet ja ominaisuudet eri komponenteille ja geometrioille (kuva 34).

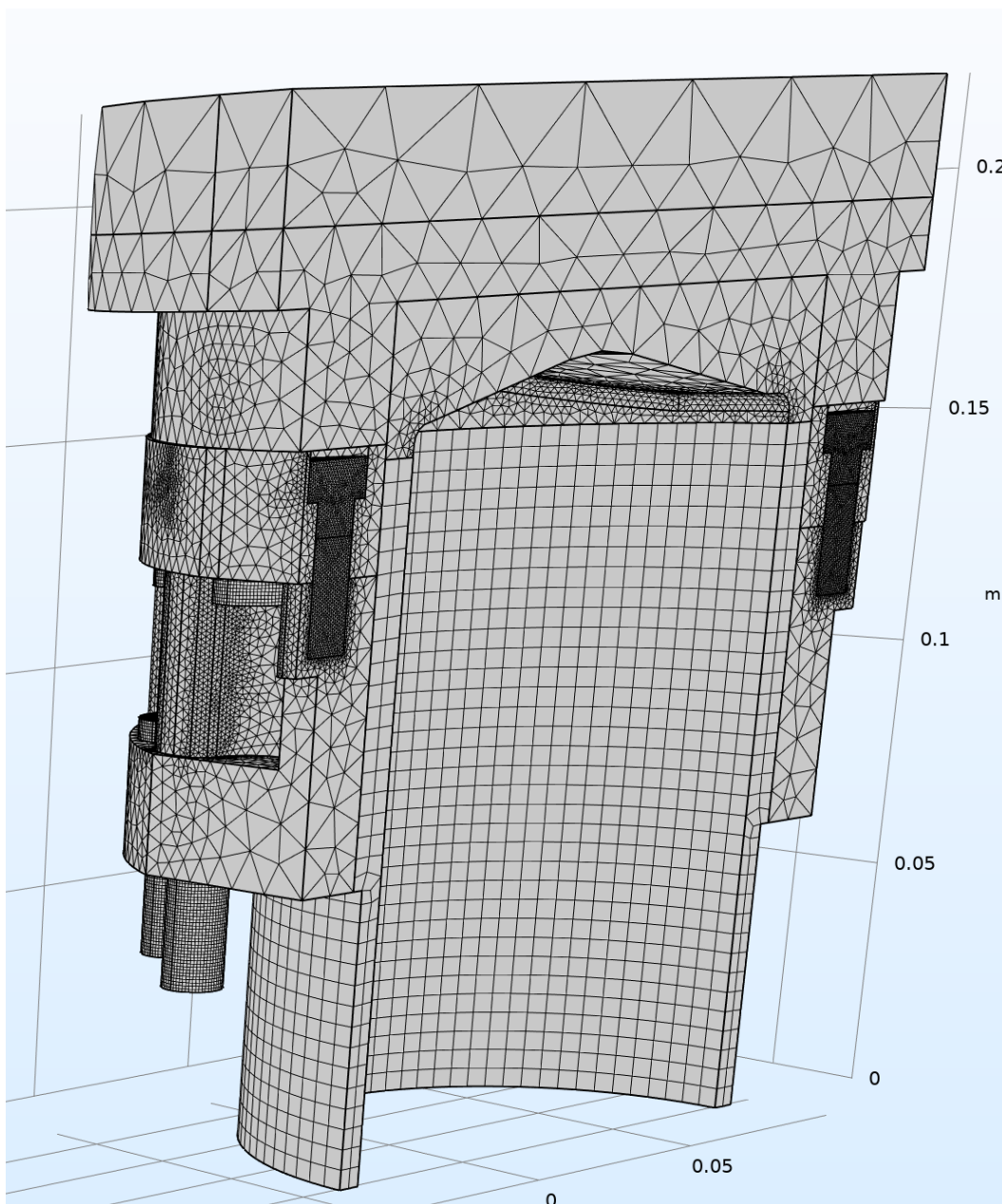


Kuva 33. Extra Fine, automaattisen fysiikan mukaan rakennettu verkko.

Automaattisen fysiikan mukaan rakentuvan verkon luominen on sinänsä helppo prosessi, missä ainoat määritettävät asiat ovat verkon tiheys ja verkotettavat komponentit. Automaattiverkko luo valituille komponenteille vapaan tetraedri-verkon. Comsol prosessoi fysiikan mukaan verkon tiheämmäksi siellä, missä komponentin geometriassa tapahtuu muutoksia, kuten seinämien kohtaaminen, pyöristykset tai kapeat pinnat (Kuva 35–37). Verkon kooksi määritettiin toiseksi tihein (Extra Fine) verkko.

Manuaalisen verkon (Mesh 2) luonti aloitettiin määrittämällä tiilimäinen verkko sylinteriputkelle ja pulteille (Kuva 38). Pulttien verkon maksimi elementtien kooksi määritettiin 0.7 mm (Kuva 39 ja 40). Muuten komponenttien koot määritettiin

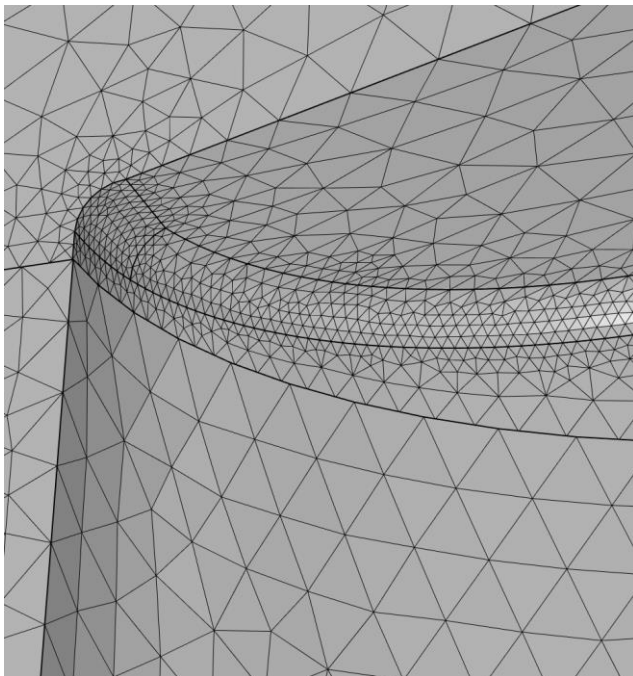
Comsolin antamien fysiikan mukaan käyttäytyvien vaihtoehtojen mukaan. Sylinteriputkelle tihein (Extremely Fine) ja sylinterin kannelle (Coarse) ja (Fine).



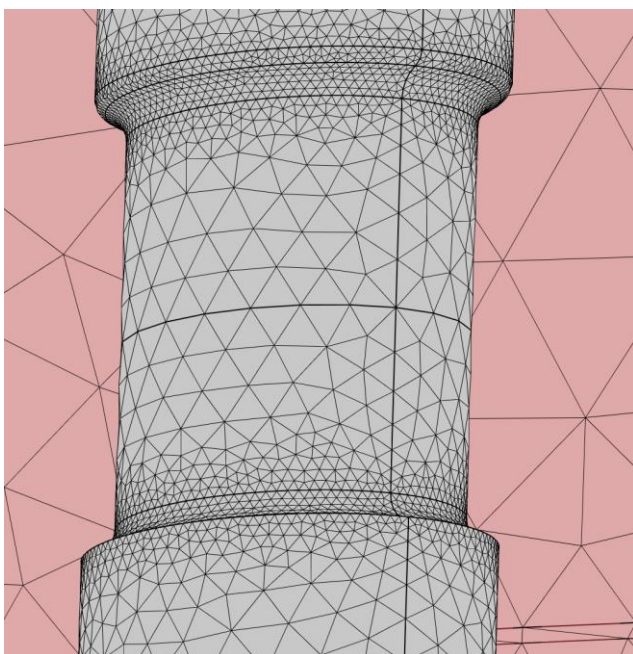
Kuva 34. Manuaalinen verkko Mesh 2.

Muille, kuin pulteille ja sylinteriputkelle pyöreät pinnat ovat vapaita kiilaelementtejä kaikilla tasoilla. Loppujen osien verkon koko vaihtelee normaalista tiheimpään. Verkkoa tehdessä pidettiin huoli, että seinämille tulee vähintään kaksi elementtiä. Manuaalinen verkko tehtiin vertailukohdaksi automaattiselle. Manuaalisessa verkossa kokeiltiin kriittisillä paikoilla tiheämpää verkkoa, kuin automaattisessa

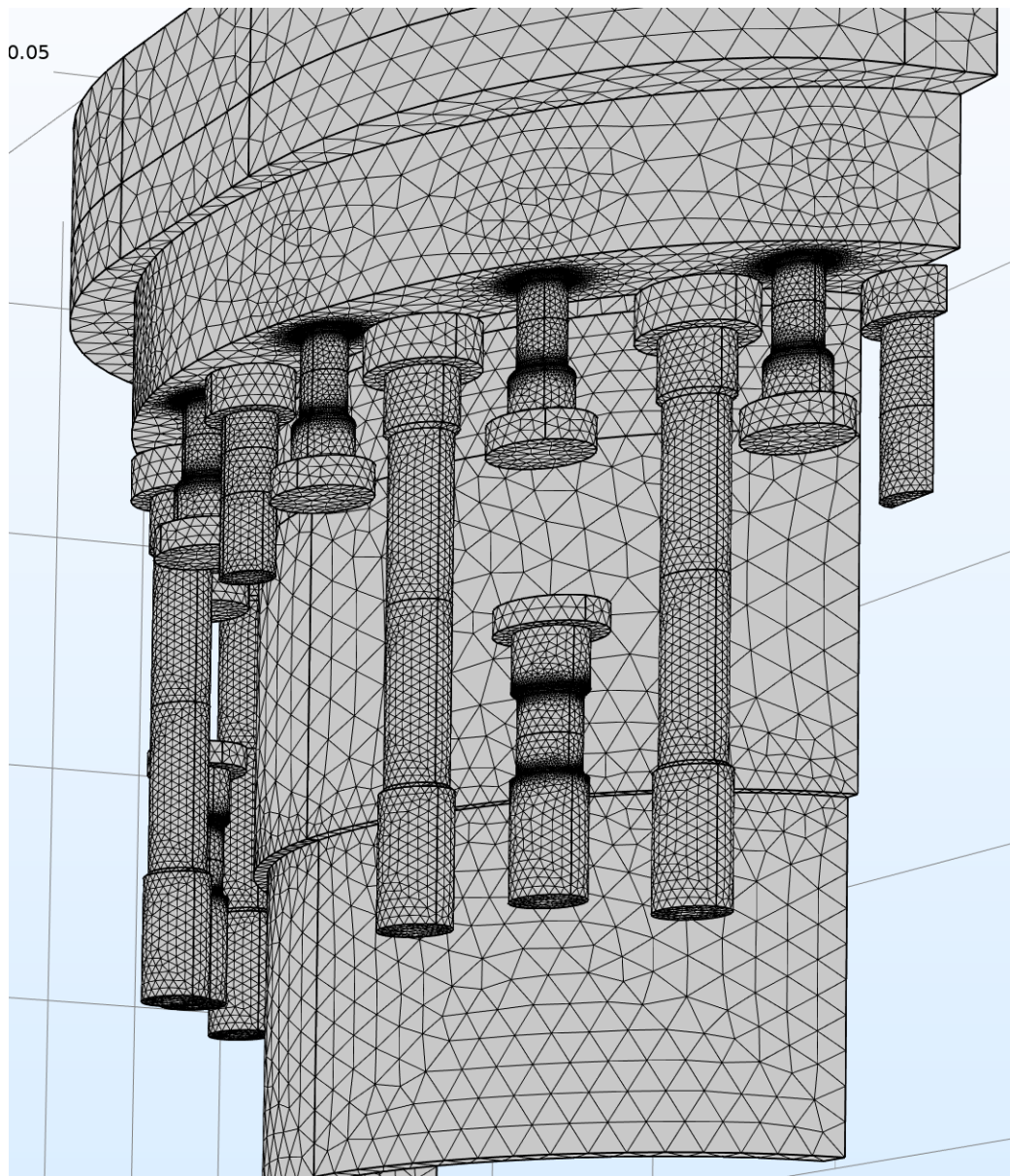
verkossa ja harvempaa verkkoa paikoissa, missä todettiin testien tuloksista päätellen olevan vähiten merkitystä, kuten sylinterikannen päällä (kuva 41).



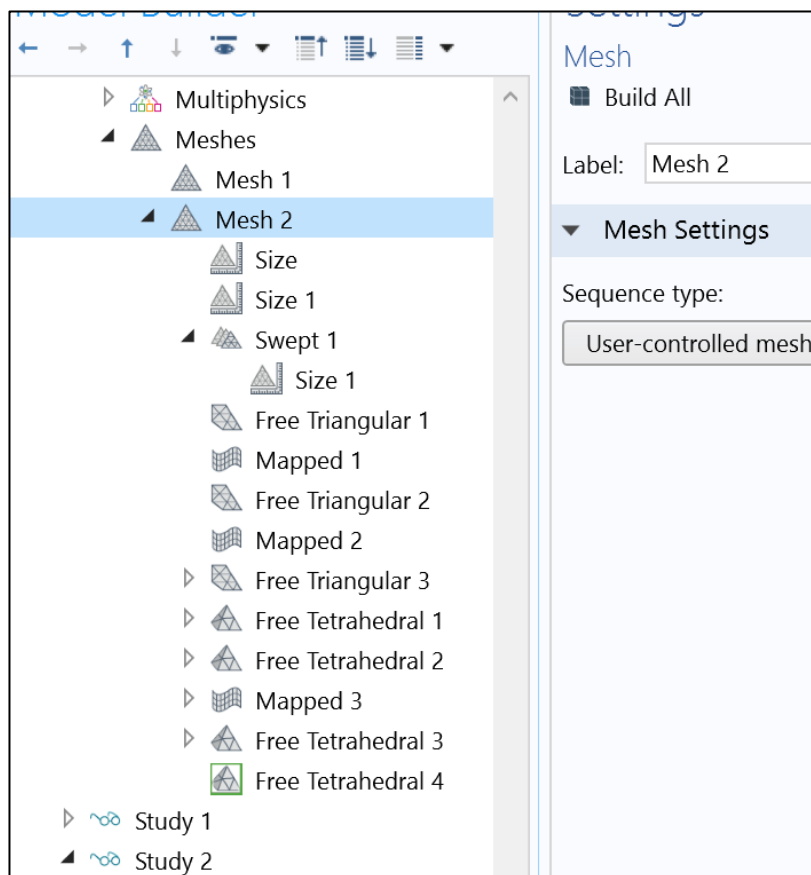
Kuva 35. Verkon tiheyden muuttuminen.



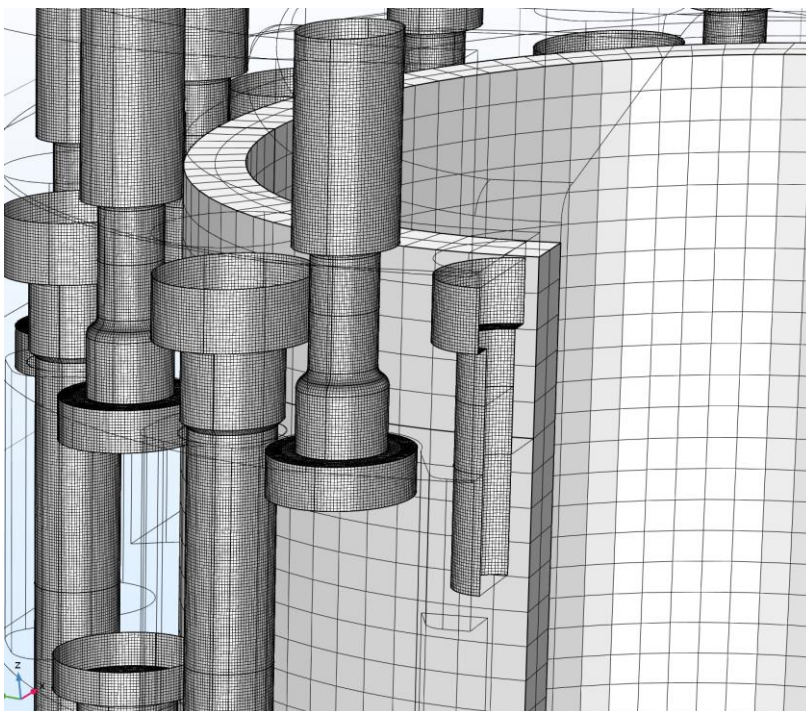
Kuva 36. Verkon tihtyminen pyöristyksissä.



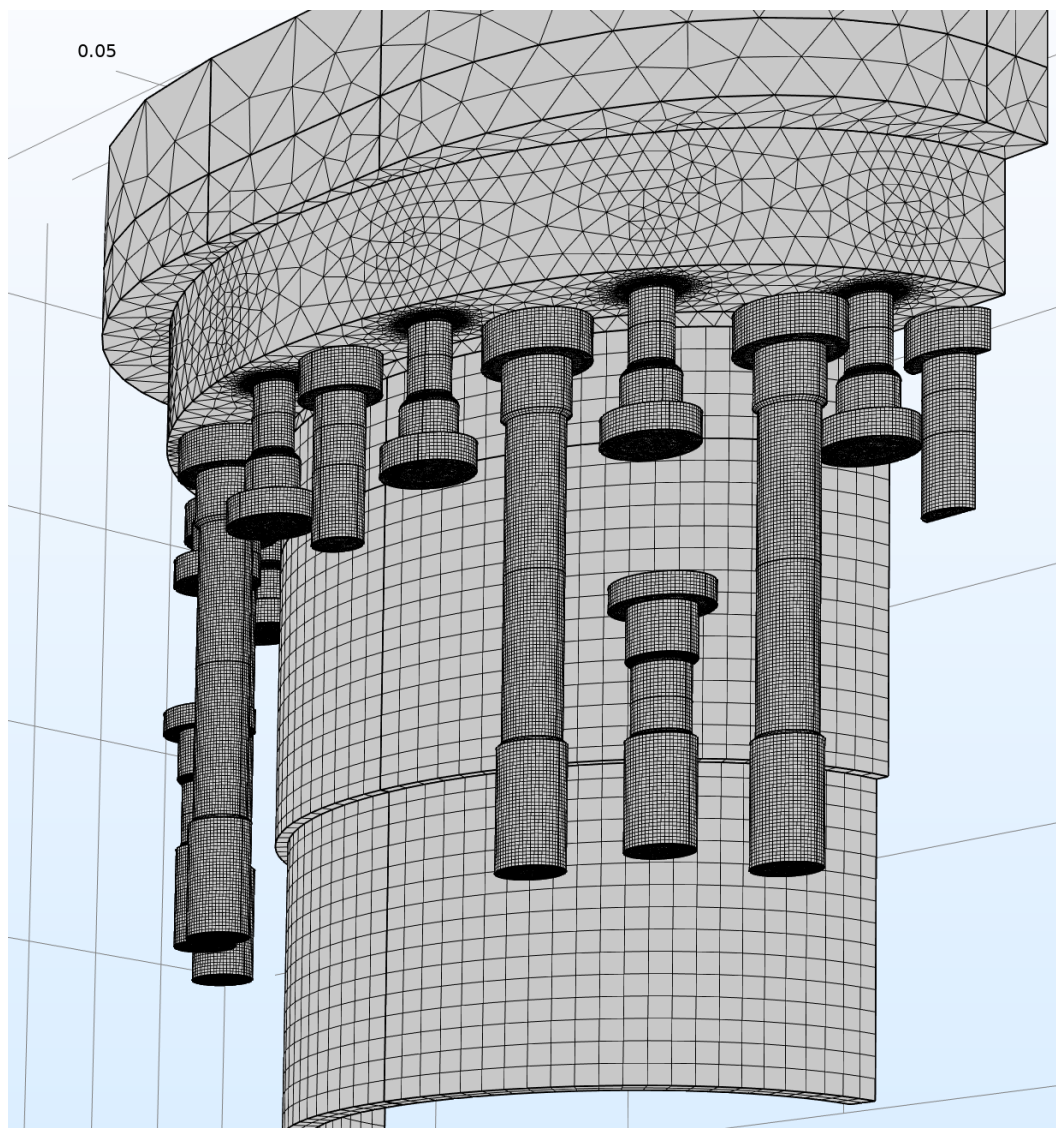
Kuva 37. Pultit automaattisella verkotuksella.



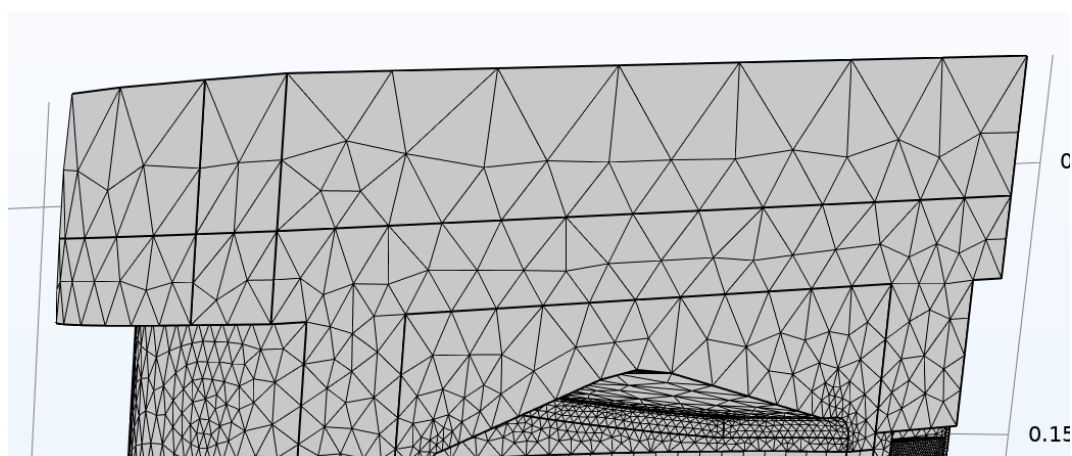
Kuva 38. Manuaalisen verkon määrittely.



Kuva 39. Pultit ja sylinteriputki manuaalisella verkotuksella.



Kuva 40. Pultit verkotettu muita komponentteja tiheämmin.



Kuva 41. Sylinterikannen harva Coarse-verkko.

4 TULOKSET

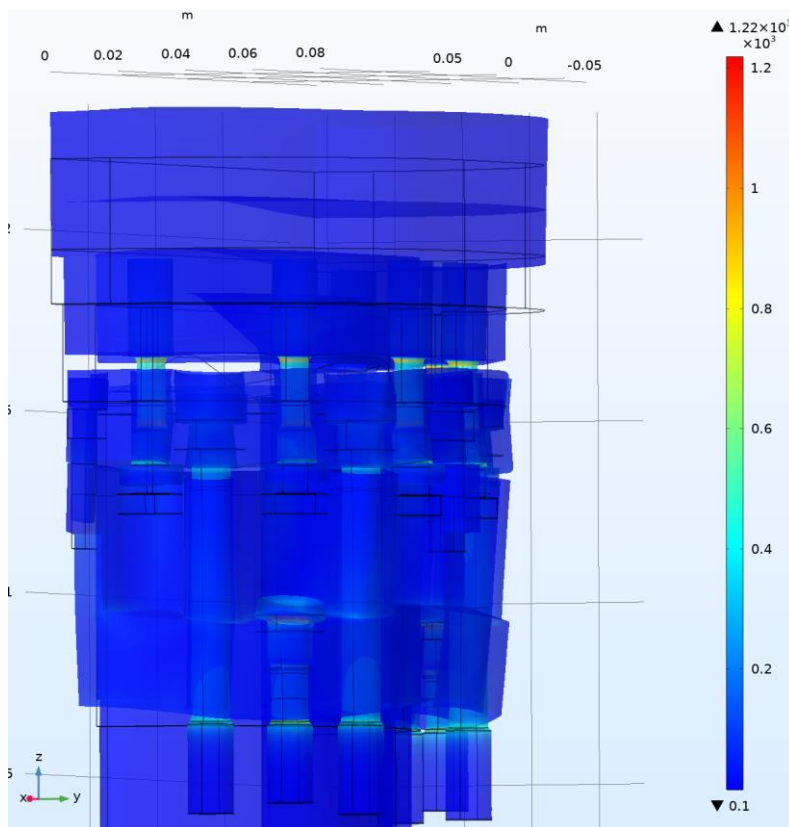
Työn tulokset ovat esitettyinä kahdessa Comsol Multiphysics -tiedostossa (Liite 2 ja 3). Tuloksia simuloitiin eri konfiguraatioilla Comsol Multiphysicsissä, kuten muuttamalla lämpötilakäyrää (Liite 1) ja suorittamalla simulaatioita erilaisilla elementtiverkoilla. Tulokset ovat ilmoitettu Von Mises'n myötöehdon mukaan ja yksikköinä on käytetty megapascalita (MPa).

4.1 Vertailu

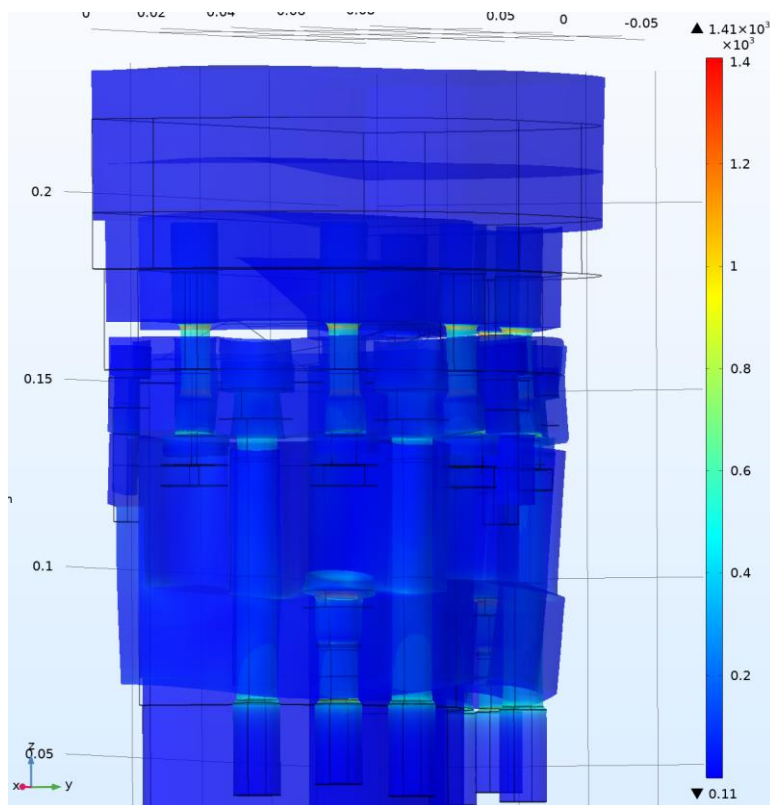
Vertailun vuoksi suoritettiin myös kaksi staattista analyysiä samalla 3D-mallilla. Ensimmäinen staattinen analyysi suoritettiin vanhalla fyysisesti testatulla 28.5 MPa -maksimipaineella (kuva 42). Toinen staattinen analyysi suoritettiin puolestaan nykyisten lähtötietojen (Liite 1) maksimipaineella 32.5 MPa (Kuva 43). Dynaamisen analyysin tulokset ovat saatavissa ennalta määritettyjen aika askelten mukaan 0.0006 sekunnin välein ja kokonaisuudessaan 0.014 sekunnin ajalta. Suurimmat jännitykset muodostuvat 0.006 s kohdalla (Kuva 44 ja 46), missä myös suurin paine esiintyy lähtötietojen (Liite 1) painekäyrässä (Kuva 19). Koko dynaamisen analyysin vaikutukset ovat myös nähtävissä (Liite 4) gif-kuvassa. Väsymisanalyysi on tehty tässä tapauksessa vain havainnollistamiseksi ja Comsolin ominaisuuksien testaamiseksi (Kuva 49).

4.2 Hypoteesi

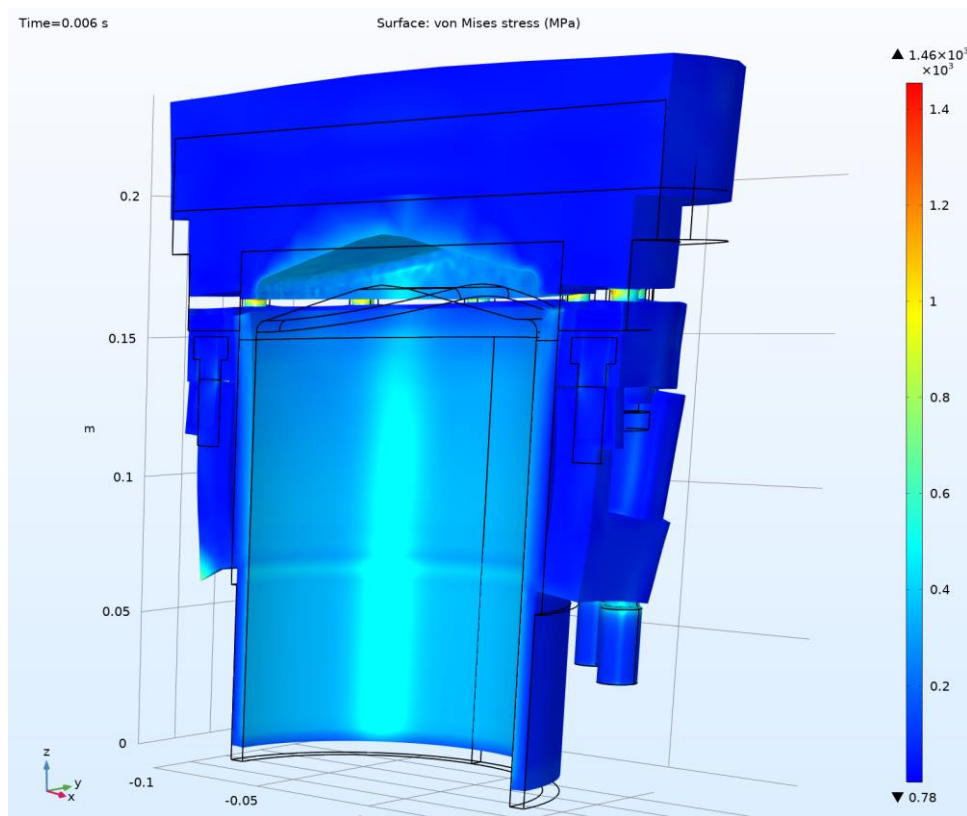
Hypoteesina analyysin tuloksesta pidettiin sitä, että sylinterikannen pultit toimivat rakenteen ”sulakkeena” ja antavat ensimmäisenä periksi. Sylinterin pultit eivät saisi hajota ensimmäisenä, mutta jos näin kävisi sylinteri saattaisi aiheuttaa suurta vahinkoa, koska tässä tilanteessa paineet pääsisivät helpoiten pois liikuttamalla sylinteriä edellään. Kannenpulttien hajotessa paineet pääsevät vapaammin ulos, eikä kannella yksistään ole männän ja sylinterin luomaa johdetta, millä paineet suuntaisivat kannen liikeradan. Hypoteesi perustuu siihen oletukseen, että 12 pienempää kannenpulttia kestää karkeasti lasketun kanteen kohdistuvan voiman heikommin, kuin 8+4 suurempaa sylinteripulttia.



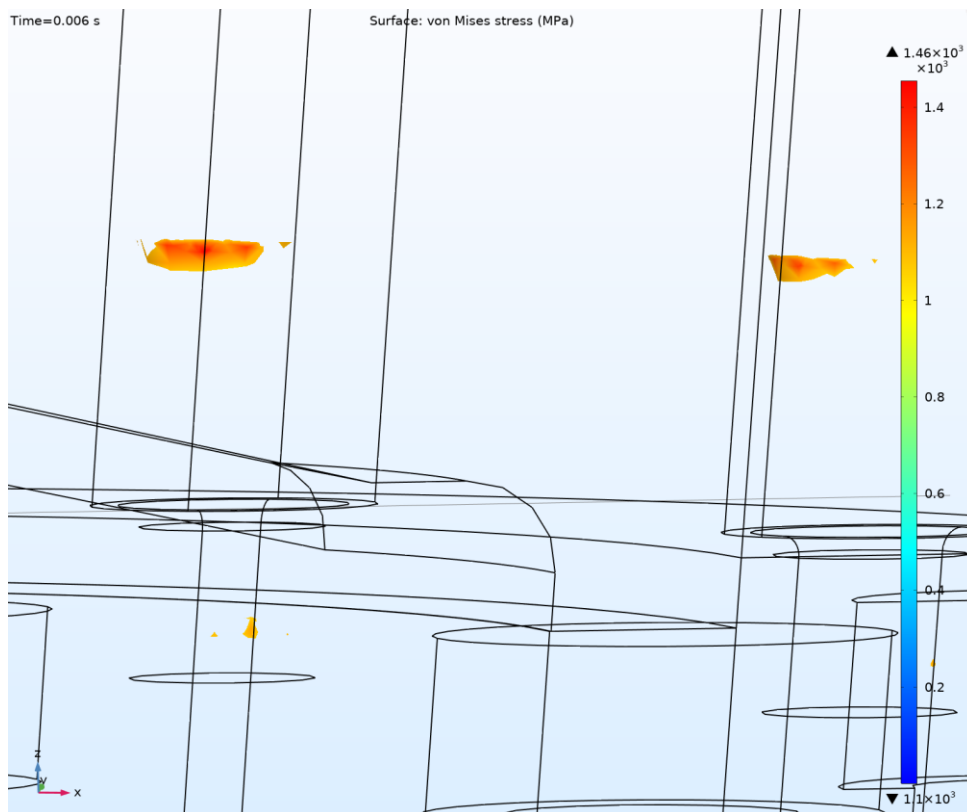
Kuva 42. Staattisen analyysin tulos 28,5 MPa -paineella.



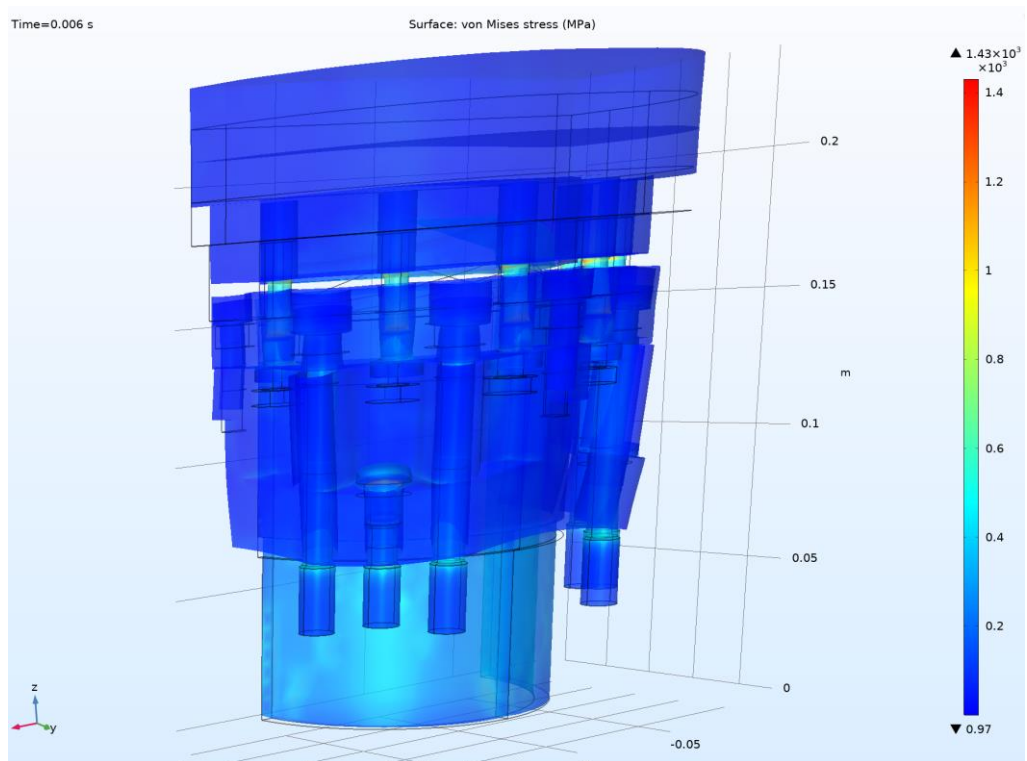
Kuva 43. Staattisen analyysin tulos 32.5 MPa -paineella.



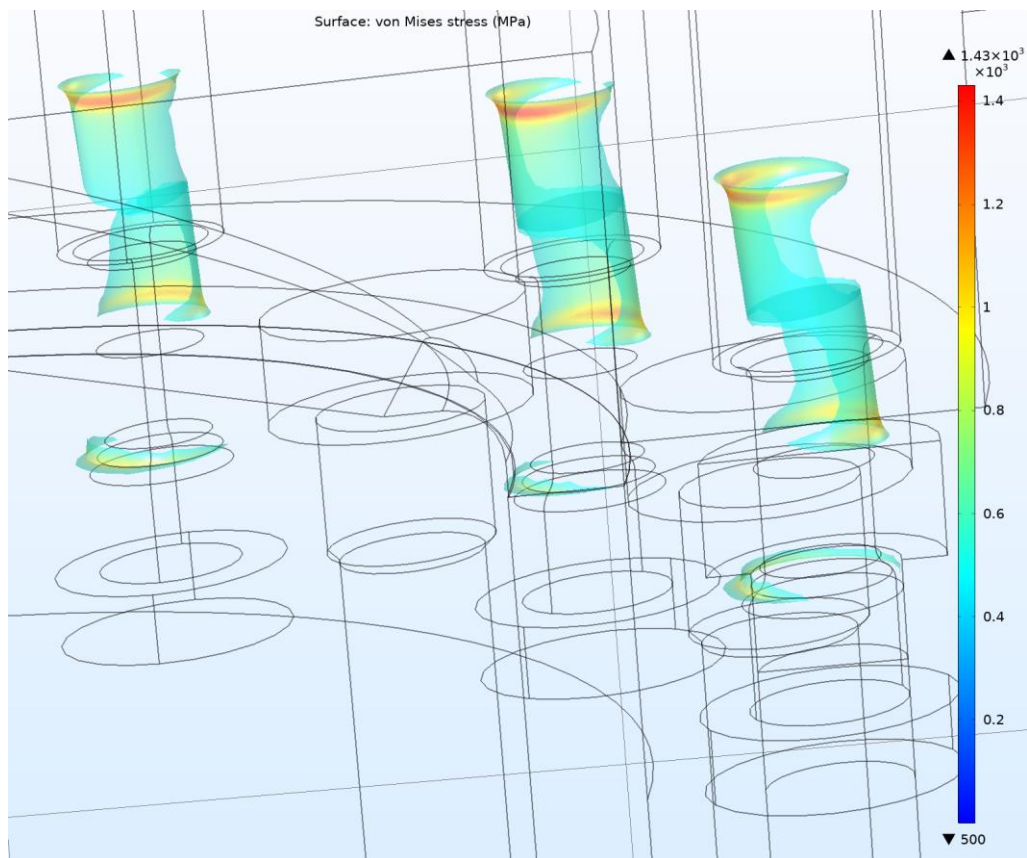
Kuva 44. Manuaalisella verkolla saatu kokonaistulos.



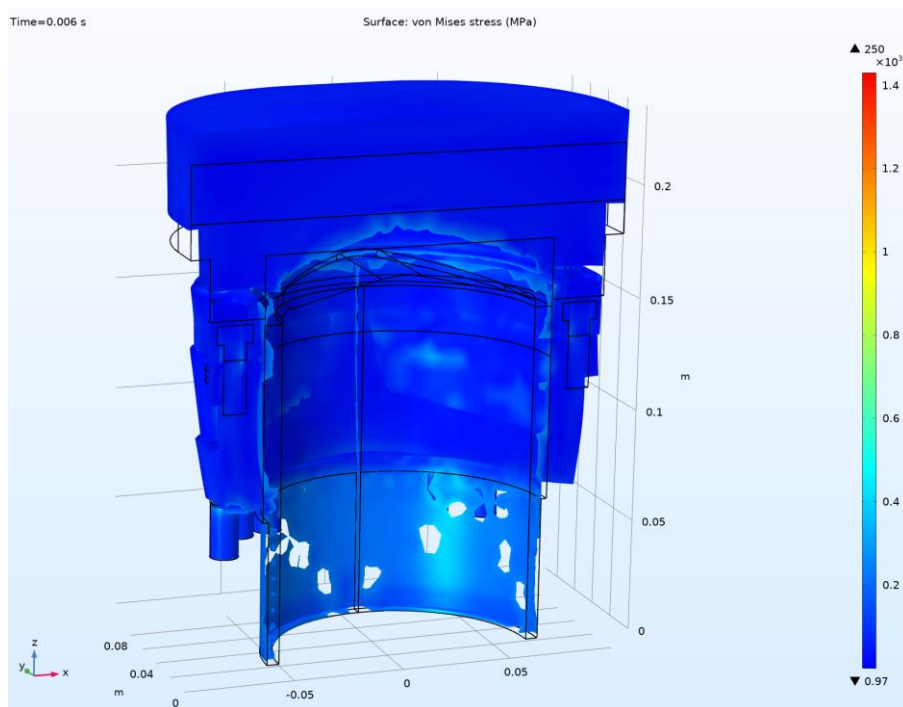
Kuva 45. Manuaalisella verkolla saadut kriittisimmät rasitukset.



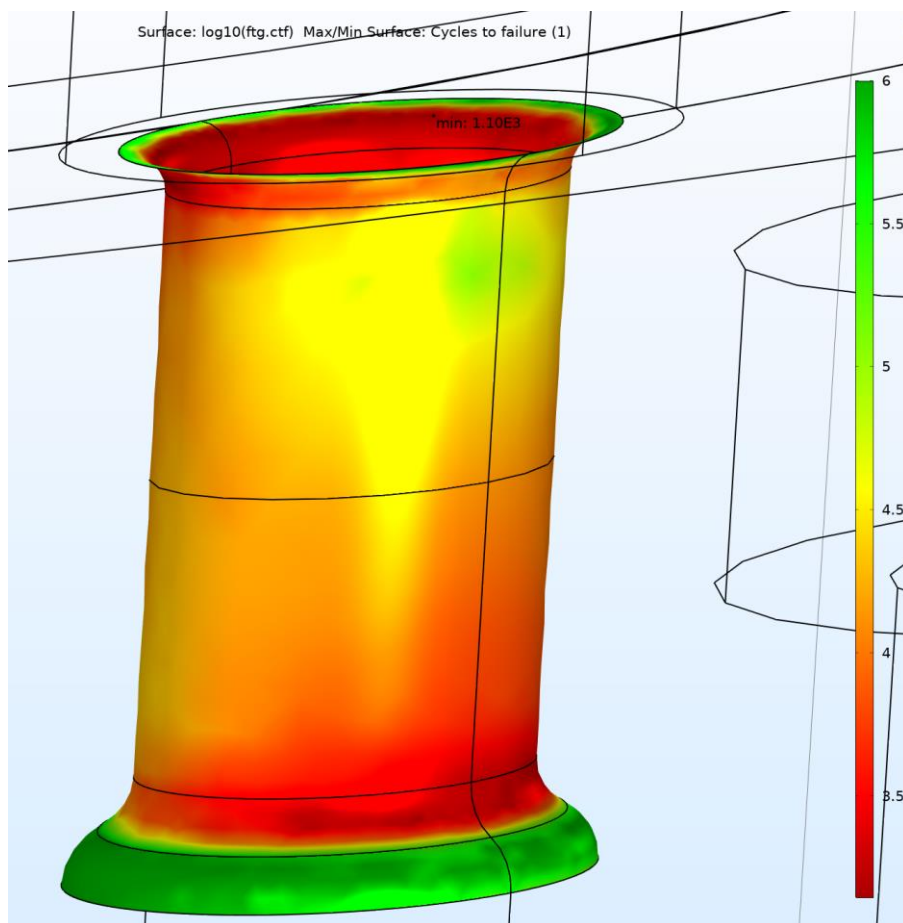
Kuva 46. Automaattisella verkolla saatu kokonaistulos.



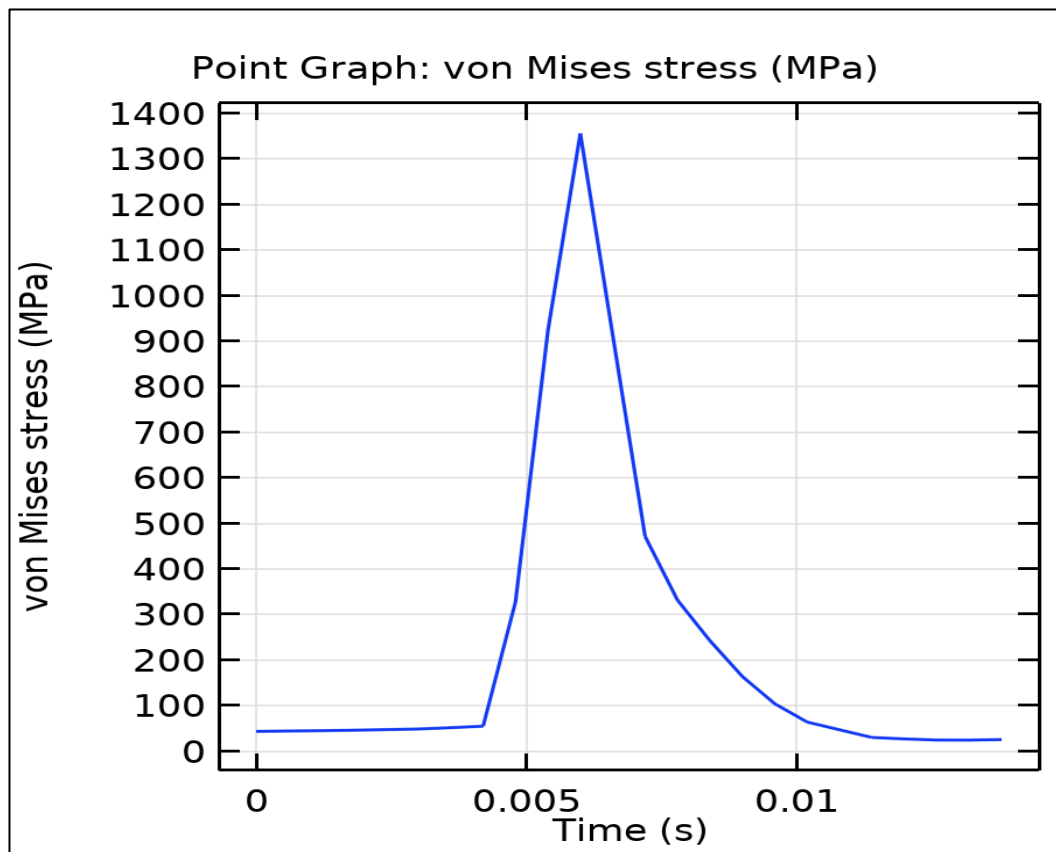
Kuva 47. Automaattisella verkolla saadut kriittisimmät rasitukset.



Kuva 48. Alle 250 MPa -paineiden tasainen jakautuminen.



Kuva 49. Kannenpultin väsymisikä.



Kuva 50. Erään kannenpultin jännitykset 0.014 sekunnin ajalta.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työ saatiin onnistuneesti päätökseen siltä osin, kuin se haluttiin. Tuloksista on nähtävissä turvallisuuden kannalta tärkeä seikka eli sylinteripultteihin kohdistuvat pienemmät jännitykset verrattuna kannenpultteihin. Analyysin tuloksista voidaan todeta, että hypoteesin päätelmä on oikein (Kuva 44 ja 46). Manuaalisen ja automaattisen verkon eroina on 60 MPa (Kuva 44–47). On huomattava, että kaikki yli 1200 MPa -rasitukset ovat hyvin pienillä alueilla kannenpulttien kierteisiin johtavissa pyöristyksissä, missä ne olivat toimeksiantajan mukaan oletettavissa (Kuva 45, 47 ja 50). Muuten jännitykset jakautuivat tasaisesti, kuten suunnittelija oli halunnut ja yllättäviä jännityspiikkejä ei ilmene missään vaiheessa dynaamiselle analyysille määritettyä 0.014 s aikaikkunaa. Ala- ja yläsylinteriin kohdistuvat jännitykset ovat noin 200 MPa (Kuva 48), joten materiaali kestää tämän hyvin /4/. Maksimirasitukset molemmilla verkoilla ovat yli 1400 MPa, eli tiedossa olevilla minimimurtolujuuksilla pultit eivät sellaisenaan kestä. Tosin aiemmin esitetyn 28.5 MPa staattisen analyysin tulokset kertovat, ettei tilanne ole niin yksiselitteinen.

Staattinen vertailuanalyysi käytännössä testatulla 28.5 MPa -paineella ja uudella 32.5 MPa kertoo siitä, että tilanteessa tulee ottaa huomioon pulttien murtolujuus (Kuva 42 ja 43). Jos pulttien murtolujuus on 1220 MPa voidaan olla rajoilla, missä kannen pultit pettävät uusilla paineilla. Voidaan siis olettaa, että materiaaleilla on suuri merkitys. Toinen asia mitä tuloksista saadaan, on mahdolliset selvät kehityskohteet sylinterin rakenteissa. Tulosten varmistamiseksi kokeiltiin myös muuttaa lähtöarvoja ja määritteitä. Erilaiset määrittelyt korreloivat keskenään odotetulla tavalla.

Tulokset jäävät tulkinnanvaraisiksi siltä osin, että tarkkaa sylinterin pintalämpötilatietoa ei ole, eikä väsymisen analyysi ole tarkka, jos huomioidaan jatkuvat olosuhteiden muutokset, eli nopeat kierrosten vaihtelut ja moottorin jäähtymiset sammutusten aikana. Oikeanlaisen väsymisanalyysin luomiseen tarvittaisiin testejä oikean S/N-käyrän luomiseen. Kuten aiemmin on todettu, että materiaalien tarkat ominaisuudet varsinkaan pulttien osalta eivät ole tiedossa, on vaikea päätellä mitään lopputulosten tarkkuudesta. Työn tavoitteena kuitenkin on antaa suuntaa sille, mitä

kyseinen moottori voisi kestää vai kestääkö laisinkaan. Tulosten vertaaminen kuitenkin tähän asti käytettyihin paineisiin ja rakenteiden kestävyYTEEN, voidaan todeta, että tulokset ovat mahdollisia. Väsymisanalyysin mukaan 9000 1/min nopeudella moottori kestäisi noin neljä kappaletta viiden sekunnin ajoa. Täytyy kuitenkin muistaa S/N käyrän todenperäisyyden kyseenalaisuus. Tulosten perusteella kannenpultin kriittiset kohdat kestävät noin 1100 rasitusykyliä (Kuva 49). Yksi sykli on kaksi kierrosta.

5.1 Muita huomioita

Työn tekijän kannalta hyvä oppi tämänkaltaisesta analyysiprosessista edesauttaa tulevaisuudessa varmempiin tuloksiin. Tuloksissa on siis hyvä ottaa huomioon tekijän kokemattomuus monimutkaisissa analyyseissä. Jälkeenpäin todettakoon, että vastaavan analyysin pystyy pääpiirteittäin suorittamaan yksinkertaisemminkin menetelmillä käyttämällä hyväksi jonkin tyyppistä dynaamista liikesimulaatiota ja staattista elementtianalyysiä. Tämä olikin oletettavissa, mutta työn tekijä halusi tähän varmuuden ja sulkea pois mahdolliset odottamattomat ilmiöt liittyen männän liikkeeseen ja sytytysennakkoon. Ottaen huomioon mahdollisuudet Comsol Multiphysicsillä voitaisiin tämän kaltainen analyysi viedä pidemmälle siten, että tutkittaisiin palotapahtumasta johtuvaa lämmön siirtymistä tarkemmin ja ottamalla huomioon pakokaasujen ja sisään tulevan seoksen virtaukset. Todelliset lämpövaikutukset jäävätkin taka-alalle, koska se vaatisi tarkemman tutkimuksen palotapahtumasta. Lämmön siirtymien tulosten oikeellisuuteen vaikuttaa myös se, että jokaisella syklillä siirtymät ovat hieman erilaiset /4/.

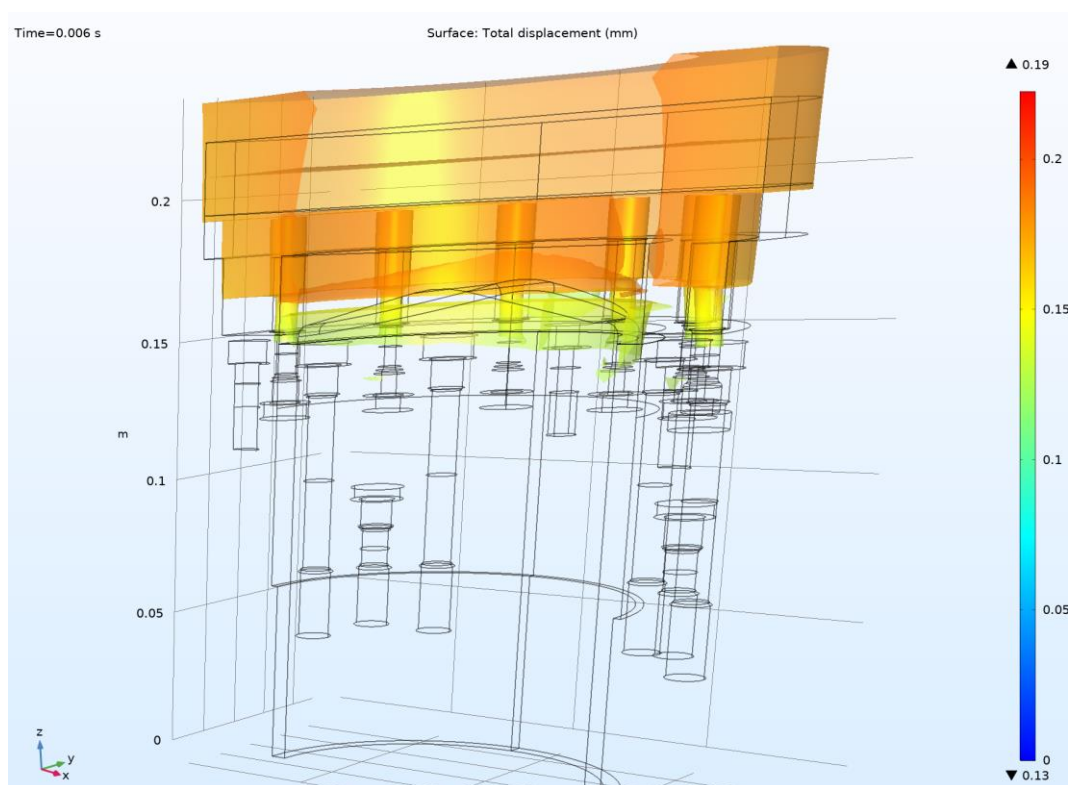
Mielenkiintoista oli myös huomata, kuinka paljon esimerkiksi kansi liikkuu z-akselilla irti muusta geometriasta, noin 0.2 mm (Kuva 50). Tämä selittää toimeksiantajan toteamaa nokeamaa kannen ja sylinterin ulkorajalla.

5.2 Jatkokehitys

Siinä vaiheessa, jos laskentaresursseja olisi käytössä huomattavasti enemmän, voitaisiin Comsol Multiphysicsillä luoda kattavampi kuva koko moottorista

palotapahtumineen. Tällä tavoin pystyttäisiin tutkimaan lämmön siirtymiäkin huomattavasti tarkemmin.

Materiaalitutkimusta pitäisi tehdä varsinkin pulttien osalta ja jos halutaan varmuutta kestämisestä ja väsymisestä. Uusien materiaalitietojen kanssa voisi olla järkevää suorittaa tarkemmat analyysit etenkin lämmön siirtymiseen liittyen. Tästä eteenpäin on kuitenkin mahdollista tehdä yksinkertaisempia staattisia simulointeja ja voida tämän työn perusteella luottaa tuloksiin.



Kuva 51. Kannen alueella tapahtuva suurin muutos tilavuudessa.

LÄHTEET

/1/ Lähteenmäki, M. 2012. Elementtimenetelmän perusteet, Viitattu 1.2.2019.
<https://docplayer.fi/9408815-1-johdanto-1-1-yleista.html>.

/2/ Finite Element Analysis (FEA) Software. 2017. Comsol Inc. Viitattu 1.2.2019.
<https://www.comsol.com/multiphysics/fea-software>.

/3/ Rabb, R. 2013. Todennäköisyysteoriaan pohjautuva väsymisanalyysi. 1. painos. Helsinki. BoD.

/4/ Salminen, H. 2019. CTO, Finno Energy Oy. Vaasan yliopisto. Haastattelu 7.2.2019.

/5/ Darton Tech Center. Viitattu 28.4.2019. https://dartonsleeves.com/tech_ctr.html.

/6/ Uddeholm Coolmould. Viitattu 28.4.2019. <https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/46/2017/09/coolmould-eng-p-1709-e2.pdf>.

/7/ The Finite Element Method (FEM). Comsol Inc. Viitattu 28.4.2019.
<https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>.