LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma

Olli Raki

MEESAUUNIN KANNATUKSIEN SUUNNITTELUTYÖKALUN KEHITYS

Työn tarkastajat: Professori Timo Björk
DI Mikko Leinonen
Työn ohjaaja: DI Mikko Leinonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma

Olli Raki

Meesauunin kannatuksien suunnittelutyökalun kehitys

Diplomityö

2014

76 sivua, 36 kuvaa, 5 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastajat: Professori Timo Björk
DI Mikko Leinonen

Hakusanat: meesauuni, mitoitusohjelma, lujuuslaskenta, betonirakenteet, kuormituslaskenta.

Meesauunia käytetään sellun tuotantoprosessissa kemiallisessa reaktiossa, jossa kalsiumkarbonaatti muutetaan kalsiumoksidiksi. Reaktio on osa sellutehtaan kemikaalikiertoa, missä sellun valmistamisessa käytettävät kemikaalit kierrätetään uusiokäyttöön.

Tässä diplomityössä on kehitetty meesauunin kannatusten automatisoitu suunnittelutyökalu vanhan AutoLispillä kehitetyn ohjelman perusteella. Kehitetyn suunnittelutyökalun tärkeimmät osat ovat Excelissä tehdyt kuormituslaskenta ja mitoituslaskenta. Näillä ohjataan Autodeskin Inventoriin kehitettyä cad-mallia ja valmistuspiirustusta. Laskentaohjelmat ja cad-malli on kehitetty mahdollistamaan uusien uunikokojen helpon lisäämisen ohjelmaan.

Diplomityössä on perehdytty kuormituslaskentaan standardien mukaisesti. Käytettyjä standardeja ovat esimerkiksi Eurokoodi ja Uniform Building Code. Epätavallisten tilanteiden kuormituslaskennassa käytettiin apuna FE-analyysilla kehitettyjä laskentamalleja. Näitä käytettiin uunin taipumisesta aiheutuvien voimien laskennassa ja lovetun kannatinpyörän aiheuttamien impulssivoimien suuruuden määrittämisessä. Lisäksi diplomityössä perehdyttiin suunnitteluautomaatin kehittämiseen Exceliä apuna käyttäen.

Suunnittelutyökalun toimivuutta on verifioitu suunnittelemalla kehitetyllä suunnittelutyökalulla standardiuuneja ja verrattu tuloksia ja valmistuspiirustuksia vanhalla ohjelmalla tulostettuihin tuloksiin. Tulosten perusteella uutta suunnittelutyökalua voidaan käyttää meesauunin kannatuksien suunnitteluun.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Mechanical Engineering

Olli Raki

Development of a Designing Program for Lime Kiln Foundations

Master's thesis

2014

76 pages, 36 figures, 5 tables and 4 appendixes

Examiners: Professor Timo Björk
M.Sc. Mikko Leinonen

Keywords: lime kiln, dimensioning, program, loading calculation, concrete structures

Lime Kiln is a part of pulp production process. It is used in a chemical reaction where calcium carbonate becomes calcium oxide. The reaction is part of pulp factory's chemical recycling where used chemicals are processed to be reused.

Result of this master's thesis is automated design tool for lime kiln foundations to replace old program made with AutoLisp. The most essential parts of developed design tool are loadings and dimensioning calculations made in Excel. These calculations are used in generating the cad model and manufacturing drawings. Calculation programs and cad model are made to allow new kiln sizes to be added in the future.

Close attention has been paid in this thesis to standardized loadings calculation, FE-analysis and automated design features. Standards such as Eurocode and Uniform Building Code were used in loadings calculation. Loadings in special situations were examined with FE-analysis. These situations were bending of the kiln and impact forces to foundations from notched support rollers.

New automated design tool has been verified designing standard size kilns with the new tool and compare the results to the old results from AutoLisp. According to the verifications the new design tool can be used to design lime kiln foundations.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Andritz Oy:lle. Työssä kehitettiin meesauunin kannatuksien suunnitteluautomaatti Inventor ja Excel ympäristöön, kun se oli aiemmin toteutettu AutoCadin AutoLispillä. Haluan kiittää Andritzia mielenkiintoisesta ja opettavaisesta diplomityöaiheesta, joustavasta työympäristöstä ja rahoituksen järjestämisestä.

Kiitokset Professori Timo Björkille työn ohjaamisesta ja tarkastamisesta. Lisäksi ohjaajina toimineita Mikko Leinosta, Mika Mussaloa ja Mika Karttusta haluan kiittää asiantuntevasta otteesta työhön ja lujuuslaskentaan, mallinnukseen ja koneensuunnitteluun liittyvästä opetuksesta sekä ajatusten vaihtamisesta.

Helsingissä 01.12.2014

Olli Raki

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- ja lyhenneLUETTELO 7
1 JOHDANTO 9
2 MEESAUUNI 10
2.1 Selluloosan tuotantoprosessi 10
2.1.1 Kemikaalikierto 11
2.1.2 Haihduttamo 12
2.1.3 Soodakattila 13
2.1.4 Valkolipeän valmistus 15
2.2 Meesauunin mekaaninen rakenne 17
2.2.1 Vaippa 17
2.2.2 Kannatinpyörästö ja käyttö 18
2.2.3 Perustukset 20
3 PERUSTUKSIEN KUORMITUS 21
3.1 Aksiaalikuorma 21
3.2 Tuulikuorma 21
3.3 Seisminen kuorma 24
3.4 Käytön kuormitukset 26
3.5 Jäähdyttimen säteilysuojan kuormitus 28
3.6 Peruspulttien mitoitus 28
3.7 Poikkeustilannetarkastelut 31
3.7.1 Taipunut uuni 31
3.7.2 Impulssivoimat 36
3.7.3 Tunkkivoima 39
4 SUUNNITTELUOHJELMA 43
4.1 Suunnitteluohjelman rakenne 43

4.2 Mitoitusohjelmat 46
4.2.1 Lämpölaajeneminen 46
4.2.2 Korkeus 48
4.2.3 Toiminnalliset mitat 49
5 CAD -MALLI 51
5.1 Rakenne 51
5.2 Parametrisointi 52
5.3 iLogic 54
6 TULOSTEN TARKASTELU 57
6.1 Asetetut vaatimukset 57
6.2 Tulosten verifiointi 57
6.3 Uuden suunnittelutyökalun hyödyt 58
6.4 Jatkokehityskohteet 59
7 YHTEENVETO 61
LÄHTEET 62
LIITTEET 63

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

α	Kulma [°]
c_0	Pinnanmuotokerroin
c_r	Rosoisuuskerroin
c_{net}	Painekerroin
c_{fr}	Tuulen kitkakerroin
$C_{v\,\&\,a}$	Maaperän ja seismisyyden kerroin
$c_s c_d$	Rakennekerroin
D	Halkaisija [mm]
F	Voima [N]
g	Maan Painovoima [m/s^2]
h	Korkeus [m]
I_V	Puuskien intensiteetti
K	Nut factor
L	Pituus [m]
m	Massa [kg]
N_{1-5}	Kannatuksien kuormitus [N]
v	Nopeus [m/s]
W_e	Tuulenpaine
q_p	Puuskanopeuspaine
R	Jäykkyyskerroin
S	Maaperäluokka
T	Lämpötila [C°]
T_P	Rakenteen ominaisperiodi
t	Vääntömomentti [Nm]
s	Matka [m]
z	Korkeus [m]
Z	Seisminen alue
$\propto_{th}$	Lämpölaajanemiskerroin [1/°C]
σ_v	Tuulen keskihajonta

ρ	Tiheys [kg/m^3]
η	Varmuuskerroin
γ	Käyttökerroin
AMI	Akselimitta [mm]
TE	Tukietäisyys [mm]

1 JOHDANTO

Meesauuni on tärkeä yksittäinen komponentti sellutehtaan kemikaalikierrossa. Se kierrättää selluntuotantoprosessissa käytetyn kalkkioksidin uudelleen käytettäväksi, jolloin kalkkihäviö jää pieneksi. Moderneissa sellutehtaissa pidetään tärkeänä ympäristö- ja taloudellisista syistä kierrättää kemikaaleja, jolloin kemikaalikierron laitteiden luotettavuus korostuu. Tässä työssä tutkitaan meesauunista aiheutuvia kuormituksia meesauunin perustuspilareille. Näitä ovat esimerkiksi massan jakautuminen kannatinpyörästöille, uunin aksiaalinen kuormitus ja tuulikuorma. Lisäksi kehitetään automaattinen mitoitusohjelma, joka mitoittaa perustuspilarien toiminnalliset mitat ja piirtää Autodesk Inventor CAD-mallin ja valmistuspiirustuksen mitoitusohjelman antamien parametrien mukaan. Alla olevassa kuvassa on esitelty meesauuni.

Kuva 1. Östrandin sellutehtaan meesauuni. (Steuler-KCH, 2012.)

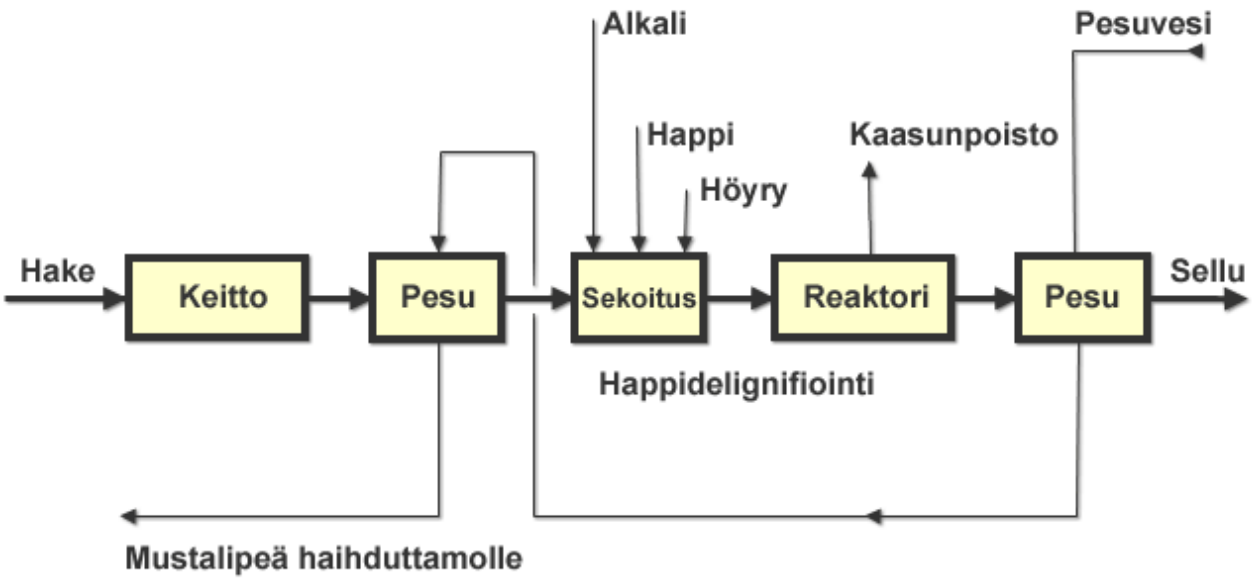
Työn tavoitteena on tarkentaa jo olemassa olevaa laskentaa, lisätä meesauunin kuormitusten laskemisen perusteita ja automatisoida suunnitteluprosessia. Laitesuunnittelun tulevaisuutta on CAD-mallien ja piirustuksien automatisointi suunnittelukustannuksien alentamiseksi, mihin tämäkin työ pyrkii. Työ rajataan koskemaan perustuspilarien mitoitusta ja kuormituksia. CAD-mallin kehittäminen on rajattu koskemaan perustuskuvaan tarvittavien komponenttien mallinnusta ja valmistuspiirustuksen tekemistä.

2 MEESAUUNI

Tässä kappaleessa käsitellään selluloosan valmistusprosessia ja tarkemmin meesauuniin liittyvää kemikaalikiertoa. Lisäksi omana osionaan on selvitetty meesauunin mekaanista rakennetta.

2.1 Selluloosan tuotantoprosessi

Sulfaattiselluloosan valmistus alkaa puiden kuorimisella ja niiden hienontamisella hakkeeksi, josta monen eri vaiheen ja prosessin kautta saadaan sellua alla olevan kuvan 2 mukaisesti.



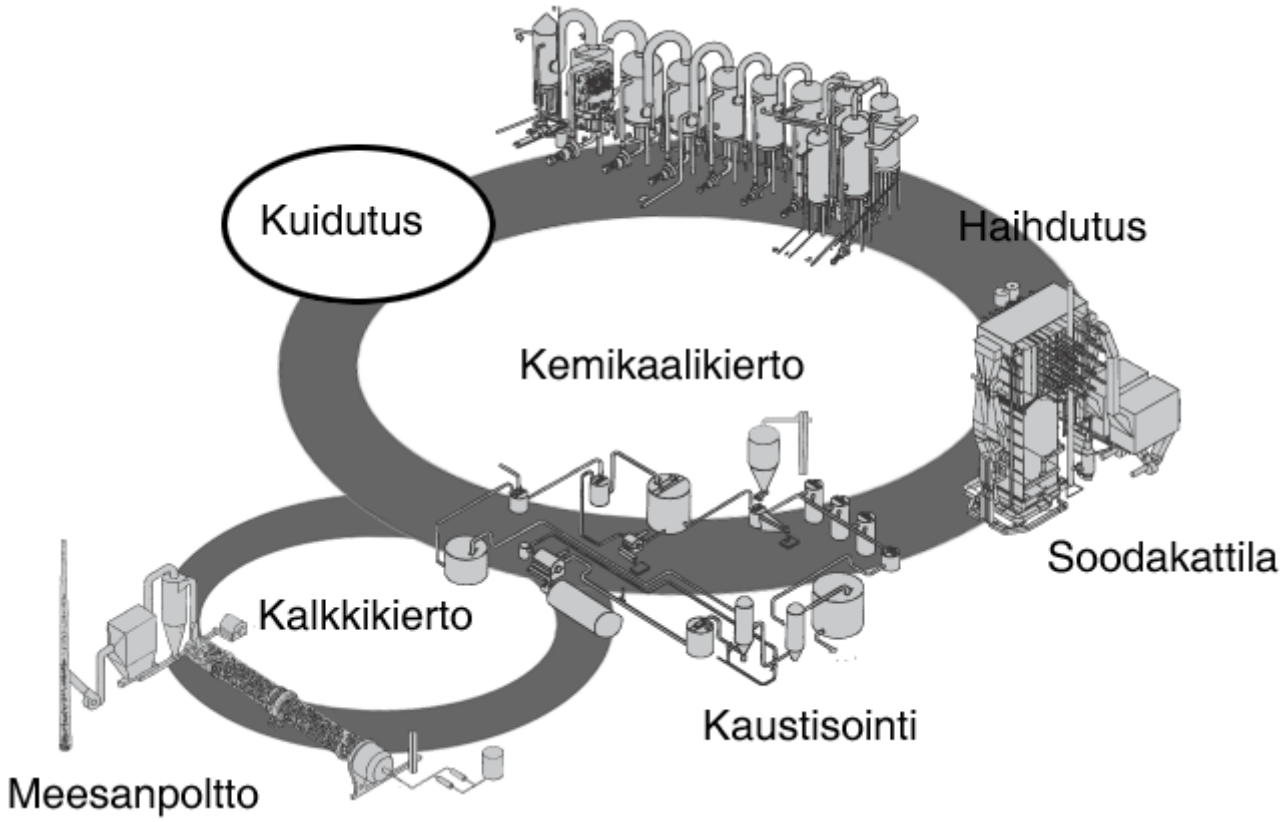
Kuva 2. Sellun tuotantoprosessi. (KnowPulp, 2011.)

Kemiallisessa menetelmässä puuhake keitetään isoissa säiliöissä keittohapossa, johon on esimerkiksi sulfaattimenetelmässä lisätty natriumhydroksidin ja natriumsulfidin seosta. Tavoitteena on erottaa ligniini ja kuidut toisistaan kuitujen pysyessä ehjinä. Mekaaninen kuitujen erotus tapahtuu usein joko hiomalla tai hiertämällä. Näin saadaan jäykkiä ja sileäpintaisia kuituja. (Gullichsen & Fogelholm, 1999, s. A14.)

Saadut kuidut pestään, näin erotetaan siihen liuenneita aineita. Näitä ovat esimerkiksi ligniini ja keittokemikaalit, jotka pyritään saamaan talteen mahdollisimman hyvin. Pesun jälkeen massa siirtyy lajittamolle, jossa poistetaan epäpuhtaudet massasta, jotta ne eivät vahingoita prosessilaitteita tai heikennä lopputuotteen laatua. Epäpuhtauksia ovat mm. kuoret, oksat, hiekka ja metalli. Seuraavassa vaiheessa, happidelignifioinnissa, epäpuhtaudet vähenevät entisestään ja lisäksi ligniini hapettuu alkaliin liukenevaksi. Viimeinen varsinainen prosessivaihe on massan valkaisu. Sellun keittotapa määrää valkaistaanko massa ligniiniä säästävällä tai poistavalla menetelmällä. Ligniini, jota ei saatu poistettua aikaisemmissa prosessin vaiheissa, poistetaan nyt käyttäen selektiivisempiä kemikaaleja. Tavoitteena on saada mahdollisimman valkoista ja valkoisena pysyvää sellua sekä vähentää pihkapitoisuutta. Usein tähän tavoitteeseen päästään vasta useamman valkaisun jälkeen. (KnowPulp, 2011.)

2.1.1 Kemikaalikierto

Kemikaalikierto on oleellinen osa modernia sellun tuotantoprosessia. Kemikaalikierrossa otetaan talteen uudelleen käytettäviksi soveltuvat kemikaalit, kuten esimerkiksi kalkki. Samalla kemikaalikierron mustalipeän poltossa vapautuu runsaasti energiaa, jota käytetään esimerkiksi sähköntuotantoon. Tämä on ympäristöystävällistä ja usein taloudellisesti välttämätöntä. Kemikaalikierto voidaan jakaa karkeasti kolmeen osa-alueeseen: haihdutus, soodakattilassa tapahtuva mustalipeän poltto ja valkolipeän valmistus, joka voidaan edelleen jakaa kaustisointiin ja meesanpolttoon. Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu kemikaalikierron kulkua. (Gullichsen & Fogelholm, 1999, s. B7.)



Kuva 3. Sulfaattiprosessin kemikaalikierto. (KnowPulp, 2011.)

2.1.2 Haihduttamo

Kemikaalikierron ensimmäisessä vaiheessa pesuosastolla erotettu ja talteen otettu mustalipeä tuodaan haihduttamolle. Haihduttamon tehtävänä on nostaa mustalipeän konsentraatio mahdollisimman korkeaksi haihduttamalla siitä vettä. Vettä poistamalla mustalipeän energiatiheys kasvaa, ja siitä voidaan polttamalla saada enemmän energiaa kuin polttamiseen kuluisi energiaa. Tyypillinen haihduttamolle tulevan mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on n. 15..20% ja väkevöinnin jälkeen jopa 85 %. Kuiva-ainepitoisuuden tulee kuitenkin olla vähintään 58% sularäjähdyksen vaaran takia. Tarpeeksi väkeviin mustalipeän konsentraatioihin pääsemiseksi haihdutettava vesimäärä on tyypillisesti 8-10 m^3/ts. Haihduttamon sivutuotteena syntyy tärpättiä, metanolia ja suopaa. (Häggblom & Ranta, 1971, s194-196) (Gullichsen & Fogelholm, 1999, s. B7-B9.)

Haihdutus tapahtuu yksivaihehaihdutuksella tai sarjahaihdutuksella, joista jälkimmäinen on yleisemmin käytetty. Yksivaihehaihdutuksessa mustalipeä lämmitetään kiehumispisteeseen avonaisessa astiassa, jolloin siitä poistuu vesihöyryä. Tehdasmittakaavassa tämänlainen

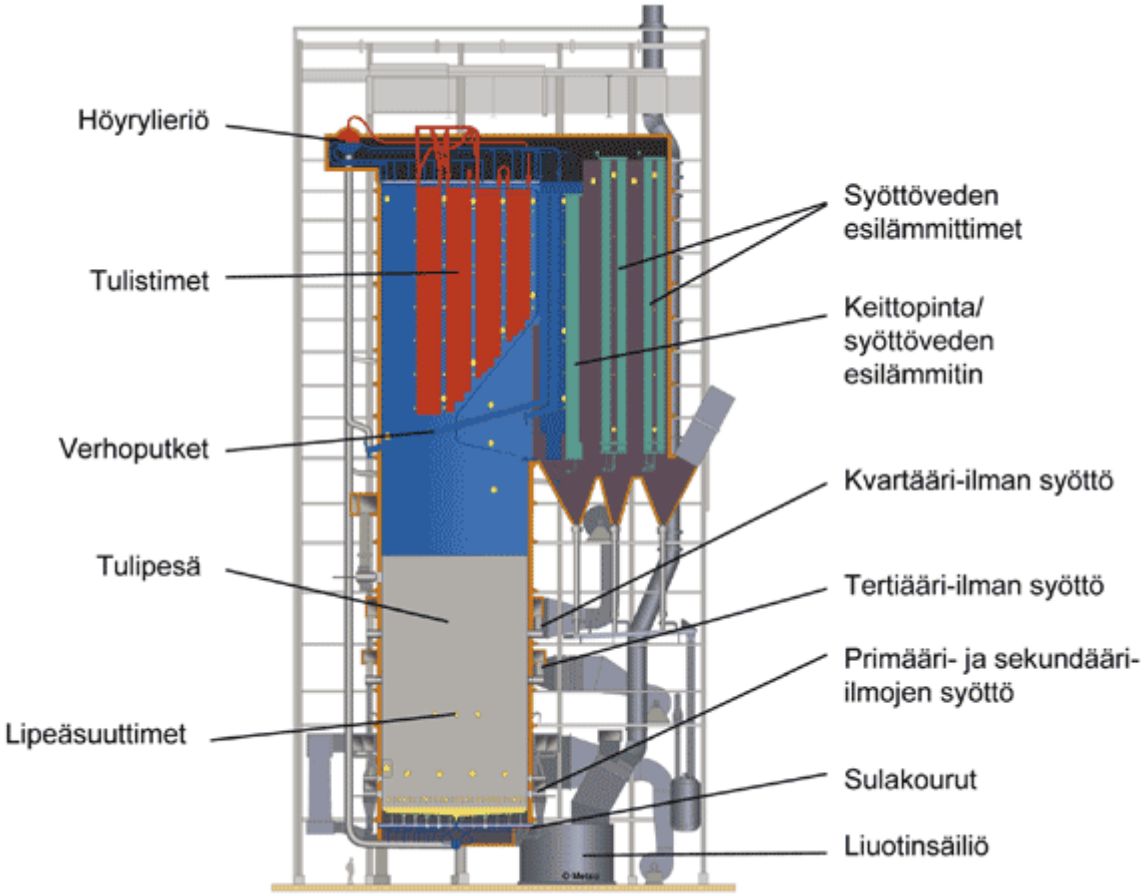
haihdutus on erittäin epätaloudellista, eikä menetelmää ole sovellettu tehdaskäyttöön enää vuosikymmeniin. Yksivaihehaihdutusta käytetään kuitenkin vielä jossakin määrin savukaasujen jätelämmön hyväksikäytössä. Savukaasujen jätelämpöä voidaan käyttää esimerkiksi skrubbereissa ja ruiskutustorneissa. (Häggblom & Ranta, 1971, s. 196.)

Nykyisin käytetty sarjahaihdutus perustuu monivaihehaihdutukseen. Tässä menetelmässä useita yksikköjä on kytketty yhteen, ja haihdutettava mustalipeä kulkee jokaisen yksikön läpi. Ensimmäisessä vaiheessa haihduttimeen syötetään 120 C -asteista höyryä, joka nostaa lipeän lämpötilan vähintään 100 C asteeseen ja veden haihdutus käynnistyy. Haihduttimien painetta lasketaan sarjan edetessä, jolloin veden höyrystymislämpötila laskee. Lipeästä haihdutettu vesihöyry siirretään aina seuraavaan vaiheeseen, jossa vallitsee edellistä yksikköä pienempi paine, jolloin haihdutettu vesihöyry riittää haihduttamaan lisää. Esimerkiksi ensimmäisestä vaiheesta siirretty 100 C -asteinen höyry pystyy lämmittämään lipeän 80 C -asteen lämpötilaan, joten painetta on laskettava kyseisen kiehumislämpötilan edellyttämä määrä. Yleisin monivaihdehaihdutinjärjestelmä on 5-vaiheinen, mutta myös 4- ja 6-vaiheisia järjestelmiä käytetään. Tyypillisin käyttötapa on syöttää ensimmäiseen vaiheeseen ylipaine, joka alenee vaiheittain alipaineeseen haihdutuksen edetessä. Muita käytettyjä tapoja on käyttää ensimmäisessä vaiheessa normaalipainetta, joka alenee vaiheittain tai pitää kaikissa yksiköissä ylipaine. (Häggblom & Ranta, 1971, s. 196-198.)

2.1.3 Soodakattila

Haihduttamossa konsentroitu mustalipeä tuodaan soodakattilaan ja poltetaan. Mustalipeässä olevat epäorgaaniset ainekset (mm. puu) tuottavat palamisessa paineistettua kaasua, jolla valmistetaan mm. sähköä, jota käytetään prosessin eri vaiheissa. Mustalipeän epäorgaaninen aines sulaa ja poistuu soodakattilan pohjassa olevan yhteen kautta. Soodakattilan tärkeimmät tehtävät ovatkin kemikaalien talteenotto, orgaanisen aineksen poltto ja lämmön talteenotto. Palamisprosessissa vapautuu yhdisteinä sellunkeiton kemikaaleja, kuten rikkiä ja natriumia, jotka otetaan talteen jatkokäsittelyä varten. Polttoaineena mustalipeä on varsin huonoa matalan lämpöarvonsa takia, mutta sellutehtaan tuottama suuri mustalipeän määrä tasapainottaa siitä saatavaa hyötyä. Lisäksi soodakattilaprosessiin vaikuttaa huomattavasti mustalipeän konsentraatio. (Häggblom & Ranta, , s. 205-206) (Gullichsen & Fogelholm, 1999, s. B11-B10.)

Soodakattilan rakenne on varsin monimutkainen sen suorittamien prosessien takia. Soodakattiloiden kehitystä ohjaavat pääasiassa hinta, koko, energiatehokkuus ja ympäristövaatimukset. Ensimmäisissä soodakattiloissa ei varsinaisesti tuotettu höyryä, vaan kaikki lämpöenergia käytettiin heikkomustalipeän väkevöintiin, joka tehtiin usein tehottomalla yksivaihemenetelmällä. Nykyisen kaltaiset soodakattilatyypit, ns. Tomlinsonin kattilat, otettiin käyttöön sotien jälkeen. Toinen nykyisin käytössä oleva tyyppi on Combustion Engineering (CE) –rakenne. Alla olevassa kuvassa on esitelty nykyaikaisen soodakattilan päärakenne. (Häggblom & Ranta, 1971, s. 206-207.)



Kuva 4. Soodakattilan rakenne. (KnowPulp, 2011)

Soodakattilan palamiskammion seinät on peitetty vedenkiertoon liitetyillä putkilla. Nämä putket sitovat lämpöenergiaa palamisprosessista, ja sitä voidaan käyttää mm. kiertovesilämmittimessä. Palamisprosessissa vapautuvat kemikaalit otetaan talteen sähkösaostimella ja skrubberilla. Pohjassa sijaitsevat sulakourut, joita pitkin sula massa kulkee liuotinsäiliöön, jossa se sekoittuu veteen. Tulipesän sivussa on keittopinta, joka on

ns. höyrykattilaosa. Syöttöveden esilämmitys tehdään savukaasuilla. Vesi kulkee pystyputkissa, ja savukaasut kulkevat vastakkaiseen suuntaan. Lisäksi tulipesään johdetaan primääri-, tertiääri ja kvartääri-ilmaa, joiden määriä optimoimalla pyritään täydelliseen palamiseen. (Häggblom & Ranta, 1971, s. 207-217) (KnowPulp, 2011.)

2.1.4 Valkolipeän valmistus

Soodakattilasta saatava soodalipeä sisältää natriumkarbonaattia ja natriumsulfidia. Soodalipeää käsiteltäessä kalsiumhydroksidilla muuttuu siinä oleva natriumkarbonaatti natriumhydroksidiksi, ja lisäksi jäljelle jää kalsiumkarbonaattia. Tätä sakkaa kutsutaan meesaksi. Meesasta erotetaan lipeä, jota kutsutaan valkolipeäksi sen kirkkaan olomuodon takia. Tämän jälkeen meesa poltetaan meesauunissa. Poltossa kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi, ja syntynyt kalkki voidaan jälleenkäyttää prosessissa. Kalkkihäviötä syntyy kuitenkin aina vähän, ja se korvataan lisäämällä meesauunissa valmistettuun kalkkiin uutta kalkkia. Lisäksi syntyvän keittolipeän tulisi olla mahdollisimman väkevää, ja reaktion tasapainon tulisi siirtyä mahdollisimman paljon oikealle. Prosessi onkin optimointitehtävä, sillä tavoitteet ovat osittain vastakkaisia. Valkolipeän valmistus voidaan jakaa karkeasti seitsemään eri osa-alueeseen: viherlipeän käsittely, sakan pesu, kalkin sammutus, kaustisointi, valkolipeän erotus meesasta, meesan pesu, kuivaus ja poltto. (Gullichsen & Fogelholm, 1999, B135-B137.)

Viherlipeän käsittelyssä poistetaan siinä oleva sakka, mikä on vaatimuksena kaustisoinnin ja meesauunin tehokkaalle toimimiselle. Tyypillinen viherlipeän käsittely tapahtuu selkeyttimessä, johon se pumpataan tasaussäiliöstä. Selkeyttimen yläosaan syötetään viherlipeää varastointiin, josta se siirretään selkeyttimeen. Selkeyttimessä sakka erottautuu lipeästä, ja pohjalla olevat harat keräävät sakan pumppauskaivoon sakkasuotimelle pumppausta varten. Sakkasuodin on tyypillisesti alipaineohjattu rumpusuodin. Sakka ohjataan suotimeen, jossa sen neste ohjautuu alipaineen vaikutuksesta suotimen läpi. Suotimen päälle jäänyt sakka poistetaan kaavarilla. (KnowPulp, 2011.)

Kalkin sammutuksen tarkoitus on muuntaa poltettu kalkki kalsiumhydroksidiksi. Sammutus-reaktiossa kalsiumoksidi reagoi viherlipeään jääneen veden kanssa. Kalsium annostellaan jatkuvalla syötöllä, ja viherlipeä pumpataan sammuttimen sammutusosaan,

missä ne reagoivat keskenään. Sammumaton kalkki ja epäpuhtaudet (esimerkiksi hiekka) poistetaan lajitinkoneiston avulla. (KnowPulp, 2011.)

Kaustisoinnin päätehtävä on muuttaa natriumkarbonaatti natriumhydroksidiksi sammuttamalla saadun kalkin avulla seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti:

$$Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 = 2NaOH + CaCO_3 \quad (1)$$

Kuten yhtälöstä huomataan, natriumsulfidi ei osallistu reaktioon eikä kaikki natriumkarbonaattikaan reagoi, vaan reagoimisaste määräytyy lipeän konsentraatiosta eli tasapainotilasta. Olosuhteet pyritään kuitenkin valitsemaan niin, että meesan kalkkipitoisuus ei ole liian suuri ja meesa on suurikiteistä. Itse kaustisointi tapahtuu sarjaan kytketyissä ns. kaustisointisäiliöissä. Ne sisältävät monia kerroksia, joissa kalkkimaito virtaa sekä sekoittimia, jotka estävät meesan laskeutumisen säiliön pohjalle. (Häggblom, 1971, s. 228.)

Kaustisointiastioista pumpataan kalkkimaito valkolipeäsuotimelle. Suotimella kalkkimaidosta erotetaan valkolipeä ja meesa toisistaan, jolloin lipeän meesapitoisuudeksi jää maksimissaan 20-30 mg/l. Samalla meesa pestään suotimessa. Suodatukseen käytettyjä keinoja ovat selkeytys, paineistetut sukka- ja kiekkosuotimet sekä paine- ja imurumpusuodattimet. (KnowPulp, 2011.)

Lopuksi saatu meesa poltetaan, jolloin saadaan meesan sisältämä kalkki takaisin kemikaalikiertoon. Polttoreaktiolla saadaan tyypillisesti 90..95 % valkolipeän valmistukseen käytetystä kalkista. Meesan poltossa polttoreaktio hajottaa kalsiumkarbonaatin kalsiumoksidiksi seuraavan yhtälön mukaan:

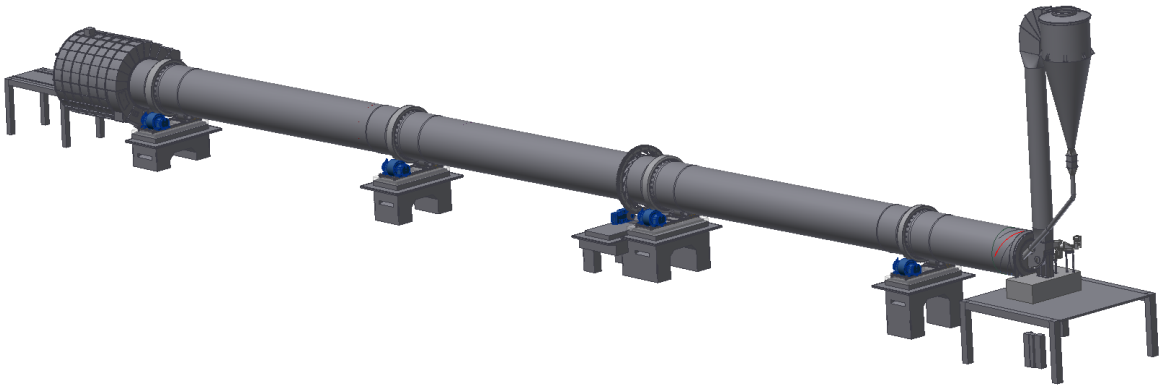
$$CaCO_3 = CaO + CO_2 \quad (2)$$

Reaktiolämpötila pidetään meesauuneissa 1100..1400 °C kalsiumkarbonaatin hajoamisen optimoimiseksi. Meesasta haihdutetaan mahdollisimman paljon vettä ennen syöttämistä meesauuniin. Optimaalinen meesan kuiva-ainepitoisuus on 60..67 %. Meesa liikkuu uunin sisällä kohti polttopäätä, josta kalkki kerätään jatkokäsittelyä varten. Meesan kulkeutuessa uunissa vastakkaiseen suuntaan kulkevat savukaasut haihduttavat siitä vettä. Samalla

meesan lämpötila nousee ja se saavuttaa reaktiolämpötilan, jolloin polttoreaktio alkaa. (Häggblom, 1971, s. 235-240.)

2.2 Meesauunin mekaaninen rakenne

Meesauuni on polttouuni, joka pyörii akselinsa ympäri. Tästä tulee myös nimitys kiertouuni. Uunin kaltevuus on tyypillisesti 1,5-2,5 % polttopäätä kohden laskeva ja pyörimisnopeus 0,5-1,5 kierrosta minuutissa, jolloin meesan läpäisyaika on 2,5-4 tuntia. Uunien pituudet vaihtelevat muutamista kymmenistä metreistä jopa yli kahteensataan metriin ja niiden halkaisijatkin välillä 2.5-5.5 metriä. Meesauunin halkaisijasta ja sen pituudesta määräytyen meesauuni pyörii 2-5 kannatuksen eli perustuksen varassa. Kannatusalustoille on asennettu laakeroidut kannatinpyörästöt, jotka mahdollistavat uunin pyörimisen. Yhden perustuspilarin yhteydessä on käytön kannatusalusta ja uunin koon mukaan käyttöjä on yksi tai kaksi. Polttopäässä on poltin ja jäähdytin, joka meesan jäähdyttämisen lisäksi kierrättää meesasta haihtuvan lämmön takaisin uuniin. Alla olevassa kuvassa on esitetty yleiskuva meesauunin rakenteesta. (Gullichsen, 1999, s. B181-B184.)



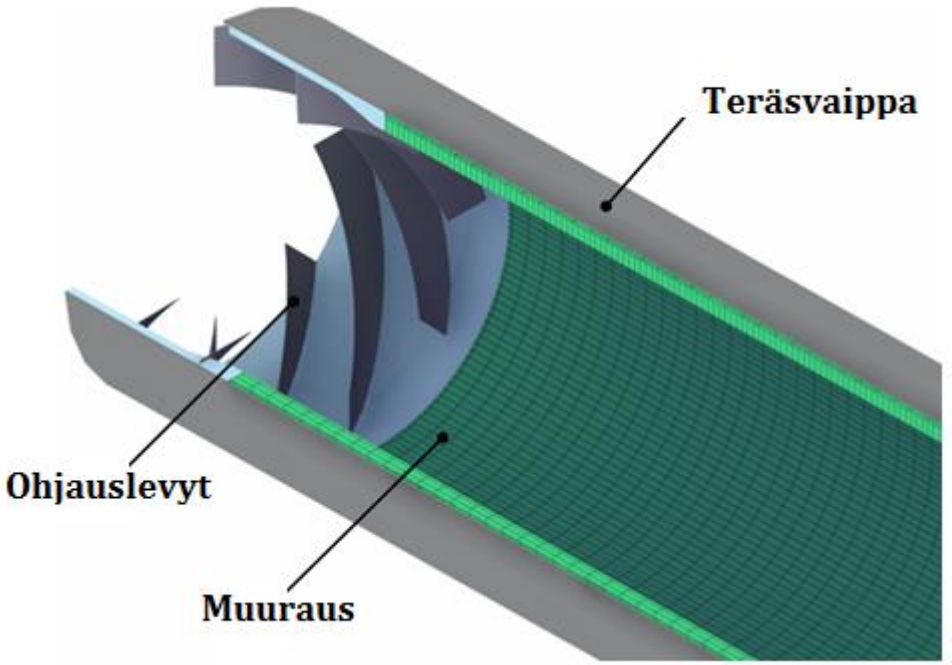
Kuva 5. Meesauuni.

2.2.1 Vaippa

Meesauunin vaippa koostuu kuudesta vyöhykkeestä: ketjualue, lämmitysalue, välivyöhyke, polttoalue, pato ja purkuvyöhyke. Ketjualueella uunin pintaan on kiinnitetty ketjuja, joiden tehtävä on kuivattaa meesaa entisestään. Ketjut kuumenevat poistuvien savukaasujen ja ilman ansiosta. Tärkein ominaisuus ketjuilla onkin mahdollisimman suuri pinta-ala, jolloin lämmön sitoutuminen on tehokkainta. Tyypillisesti ketjualue kattaa n. 20 % uunin

kokonaispituudesta. Ketjut asetellaan garland-tyylillä tai verhomallin mukaisesti. Ketjutuksen jälkeen tulee lämmitysalue ja välivyöhyke, joissa meesa lämmitetään reaktiolämpötilaan. Polttoalueessa tapahtuu polttoreaktio (ks. kaava 2), jossa kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi. Patovyöhykkeessä kuivunut meesa patoutuu ennen sen putoamista purkuvyöhykkeen kautta kuljettimelle. (Gullichsen, 1999, s. B181-B183.)

Vaippa on valmistettu eripaksuisista teräslevyistä, jotka on hitsattu yhteen. Vaippa on paksuinta kannatustukien kohdalla niiden aiheuttaman kuormituksen vuoksi. Vaipan sisäpintaan on muurattu tiiliskiviä. Tiiliskivien materiaali vaihtelee vyöhykkeiden välillä, mutta yleisin materiaali on piimaa, ja polttovyöhykkeessä käytetään myös paljon andalusiitti- ja sillimaniittipitoisia materiaaleja (Gullichsen, 1999, s. B184). Syöttöpäässä ovat myös meesan ohjauslevyt alla olevan kuvan mukaisesti.



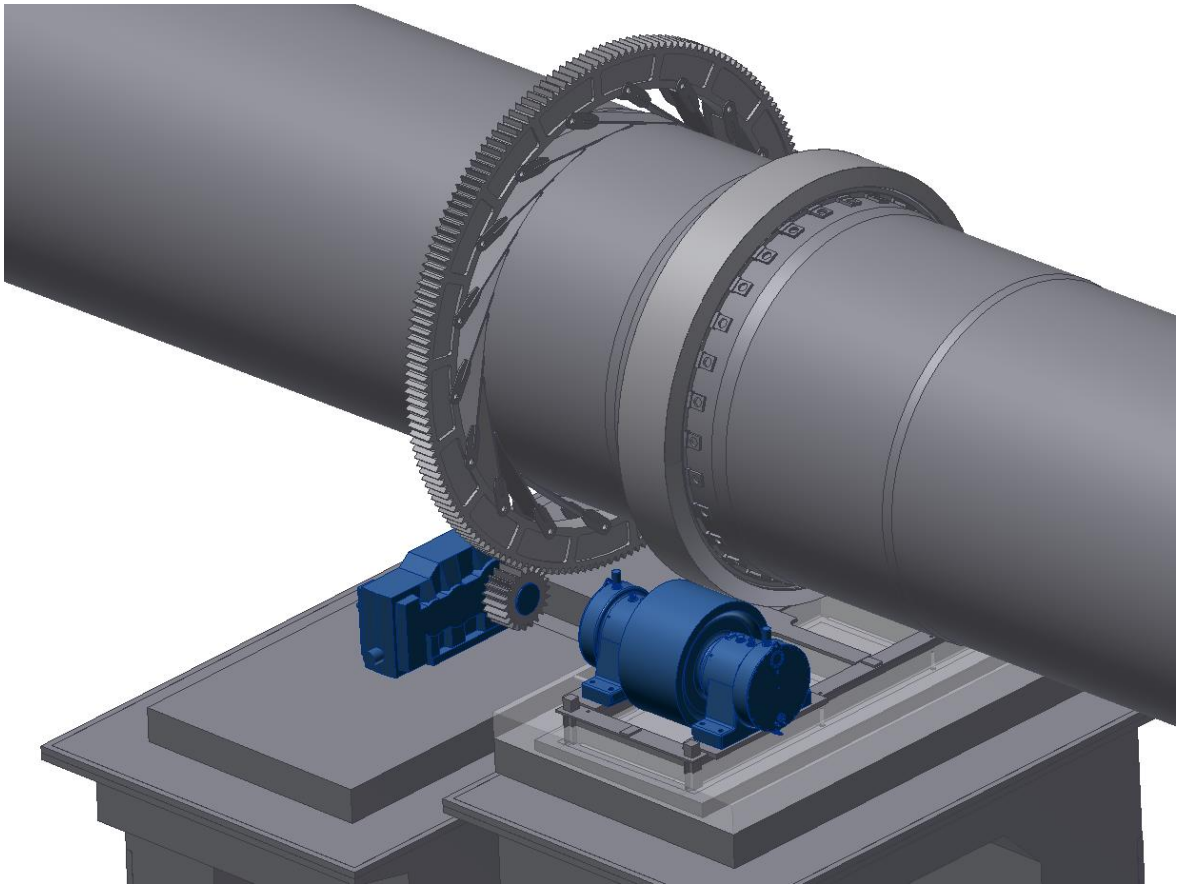
Kuva 6. Meesauunin vaippa ja ohjauslevyt.

2.2.2 Kannatinpyörästö ja käyttö

Kannatinpyörästö mahdollistaa uunin pyörimisen pituusakselinsa ympäri. Pyörästö koostuu kummaltakin puolelta uunia tukevista pyöristä, jotka ovat tyypillisesti 35 asteen kulmassa uunin keskilinjaan nähden. Pyörästö on laakeroitu kannatuksen yläpinnalla olevaan

teräskehikkoon. Pyörästöt asennetaan hieman vinoon uunin akselin mukaisesti, jolloin kannatuspyörät koskettavat tasaisesti kannatusrenkaan pintaan. Ohjaavalle kannatukselle asennetaan lisäksi aksiaalitukirulla, joka pitää uunin paikallaan. Vaipan ulkopinnalla on kannatusrengas kannatuspyörille. Kannatusrenkaiden tarkoitus on tukea pyörivää uunia. Kannatusrenkaiden ulkopinta, joka on kontaktissa kannatuspyörästön kanssa, pidetään voideltuna grafiitilla.

Ohjaavan kannatinpyörästön yhteyteen asennetaan käyttö, jolla pyöritetään uunia. Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu käyttöä ja kannatinpyörästöä.



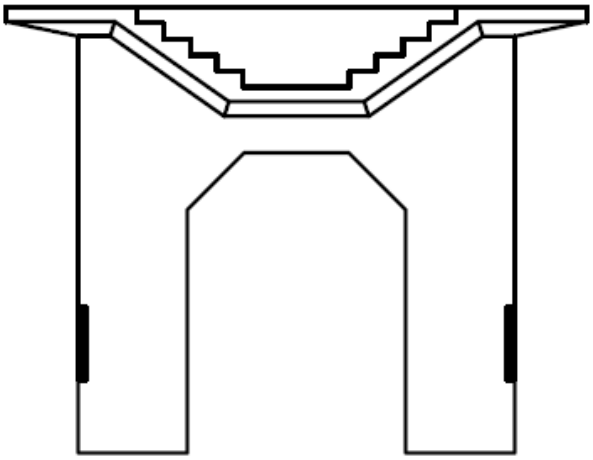
Kuva 7. Kannatinpyörästö ja käyttö.

Uunia pyöritetään tehokkaaseen moottoriin ja vaihteistoon kiinnitetyn hammasrattaan ja uunin vaippaan kiinnitetyn hammaskehän avulla. Moottorien tehot vaihtelevat kymmenistä kilowateista satoihin kilowatteihin, ja käyttöjä on uunin koon mukaan yksi tai kaksi. Yhden käytön uunissa käyttö sijoitetaan uunin kiertosuuntaan nähden vetävälle puolelle, jolloin

vaakasuuntainen kuormitus on hallitumpi, ja samalla käytön puolelle kerääntynyt meesa jäähdyttää käyttöä. Kahden käytön uuneissa käytöt sijoitetaan kummallekin puolelle uunia.

2.2.3 Perustukset

Uunia kannattelevat kannatinpyörästöjen alla olevat perustuspilarit, jotka kantavat meesauunista aiheutuvan kuorman. Perustuspilarit tehdään betonista ja siihen upotetusta teräsraudoituksesta. Uunin koon mukaan perustuspilareita tarvitaan 2-5 kappaletta, ja yhden perustuspilarin yhteyteen tulee lisäksi käytön perustuspilari. Meesauunin perustuspilarit muotoillaan U-muotoisiksi alla olevan kuvan mukaan.



Kuva 8. Perustuspilari.

Perustukset koostuu perusvalusta, joka kattaa suurimman osan rakenteesta. Perusvalun lisäksi valetaan pultti-, jälki- ja pintavalu. Pulttivalun sisään jäävät peruspultit, jotka ovat yksi perustuspilarin tärkeimmistä osista, sillä ne siirtävät kannatuspyörästön aiheuttamat kuormat perustuspilareille kannatinalustan kautta. Jälkivalun sisälle jää perusvaluun upotettuun teräslevyyn hitsattu korkeudensäätöruuvi. Osittain pintavalun sisään jää kannatinalusta, joka on tyypillisesti I –palkeista hitsattu teräskehikko. Kannatinalustaan kiinnitetään kannatinpyörästö, peruspultit ja säätöruuvi.

3 PERUSTUKSIEN KUORMITUS

Tässä kappaleessa käsitellään kannatuspyörästön ja käytön perustuspilarien mitoituksessa huomioitavia kuormia ja muita kuormitustapauksia, kuten peruspulttien laskenta. Perustuksille aiheutuvat kuormat on jaettu karkeasti 9 eri osa-alueeseen. Kuormitukset on yksinkertaistettu laskennassa vertikaalisiin ja horisontaalisiin voimiin.

Monen kuormituslaskennan perustana toimii erillisestä numeerista elementtimenetelmää käyttävä laskentaohjelma. Tästä tuodaan uunista aiheutuvat kuormitustiedot kannatuksille tässä työssä kehitettyyn laskentaohjelmaan. Näitä tietoja on esimerkiksi uunin vaipasta tulevan kokonaisvoiman jakautuminen eri kannatuksille.

3.1 Aksiaalikuorma

Uunin kaltevuudesta johtuen uunille syntyy aksiaalikuormaa, kun sitä pidetään paikallaan sekä kannatinpyörien ja kannatinrenkaan välisestä kitkasta. Uunin pidetävät paikallaan aksiaaliohjausrullat, jotka sijaitsevat aina käytön kanssa samalla tukipisteellä. Meesauuneissa käytetään myös hydraulista aksiaaliohjausta, mikä lisää aksiaalikuormitusta. Aksiaalikuormitus lasketaan seuraavasti

$$F_a = 0.2 * N_1 + 0.01 * \alpha_{kiln} \sum_{i=1}^{n} N_i \tag{3}$$

missä α_{kiln} on uunin kaltevuus ja N_i tukipilareiden tukikuormat. Jos aksiaaliohjauksessa käytetään hydraulista aksiaaliohjausta, kerrotaan kuormitus 1.5 kertoimella.

3.2 Tuulikuorma

Tuulen aiheuttama kuormitus lasketaan Eurokoodi 1991-1-4 mukaisesti. Lähtöarvona ohjelmassa käytetään tuulennopeuden suunnitteluarvoa, joten laskennassa esiintyvät muut muuttujat on valittu yleisimmän tapauksen mukaan. Tuulikuormat luokitellaan horisontaalisiin dynaamisiin kuormiin, sillä ne vaihtelevat ajan mukana. Meesauunin tapauksessa tuulipaine vaikuttaa vain ulkopintoihin, jolloin sisäpintoihin vaikuttavaa painetta ei tarvitse ottaa huomioon.

Laskenta aloitetaan määrittämällä tuulennopeuden modifioitu perusarvo uunin korkeudella seuraavalla kaavalla

$$v_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b \tag{4}$$

missä c_r on rosoisuuskerroin, c_0 on pinnanmuotokerroin ja v_b tuulennopeuden suunnitteluarvo. Pinnanmuotokerroin on perustapauksessa 1. Rosoisuuskerroin määritellään kaavalla

$$c_r(z) = 0{,}19 * (\frac{z_0}{z_{0,11}})^{0{,}07} * \ln(\frac{z}{z_0}) \tag{5}$$

missä z_0 on rosoisuusmitta, $z_{0,11}$ rosoisuusmitta maastoluokan II mukaan ja z on uunin korkeus. Rosoisuusmitta määritellään alla olevasta taulukosta maastoluokan mukaan. (Eurokoodi 1991-1-4, 2011, s. 34.)

Taulukko 1. Maastoluokat. (Eurokoodi 1991-1-4, 2011, s. 36.)

Maastoluokka	z_0 [m]
0 Avomeri tai merelle avoin rannikko	0,003
I Järvet tai tasanko, jolla on enintään vähäistä kasvillisuutta	0,01
II Alue, jolla on matalaa heinää ja siihen verrattavissa olevaa kasvillisuutta ja erillisiä esteitä (puita, rakennuksia), joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus.	0,05
III Alueet, joilla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillisiä tuuliesteitä, joiden keskinäinen etäisyys on enintään 20 kertaa esteen korkeus.	0,3
IV Alueet, joiden pinta-alasta vähintään 15 % on rakennusten peitossa ja niiden keskimääräinen korkeus ylittää 15 m.	1

Seuraavaksi lasketaan tuulenpuuskien intensiteetti, joka määrittää tuulen turbulenssin sen keskihajontana.

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) * \ln(\frac{z}{z_o})} \tag{6}$$

missä $\sigma_v$on turbulenssin keskihajonta ja k_I pyörteisyyskerroin, jonka suositusarvo on 1. Tämän jälkeen on mahdollista määrittää puuskanopeuspaine, joka ottaa huomioon lyhytaikaiset nopeusvaihtelut seuravaalla kaavalla

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * ½ * \rho * v_m^2(z) \tag{7}$$

missä ρ on ilman tiheys. Suositusarvona käytetään 1,25 kg/m^3. (Eurokoodi 1991-1-4, 2011, s. 39-40.)

Perusarvojen määrittämisen jälkeen voidaan siirtyä tuulikuormien laskentaan. Laskenta aloitetaan ulkopintoihin vaikuttavan tuulenpaineen laskennalla:

$$W_e = q_p(z) * c_{net} \tag{8}$$

missä c_{net} on ulkopintaan vaikuttavan paineen painekertoimen ja sisäpintaan vaikuttavan painekertoimen summa. Painekertoimet voitiin summata, sillä tuuli ei läpäise meesauunin vaippaa, jolloin sisäpintoihin ei muodostu painetta. Tuulen paineesta saadaan ulkopintaan vaikuttava tuulikuorma seuraavanlaisesti

$$F_e = W_e * A * c_s c_d \tag{9}$$

missä A on uunin projektiopinta-ala ja $c_s c_d$ on rakennekerroin. Alle 15 m korkeille rakennuksille rakennekerroin saa arvon 1. Lisäksi täytyy ottaa huomioon tuulesta aiheutuva kitkavoima uunin vaippaan. Se lasketaan seuraavalla kaavalla

$$F_{fr} = c_{fr} * A_{fr} * q_p(z) \tag{10}$$

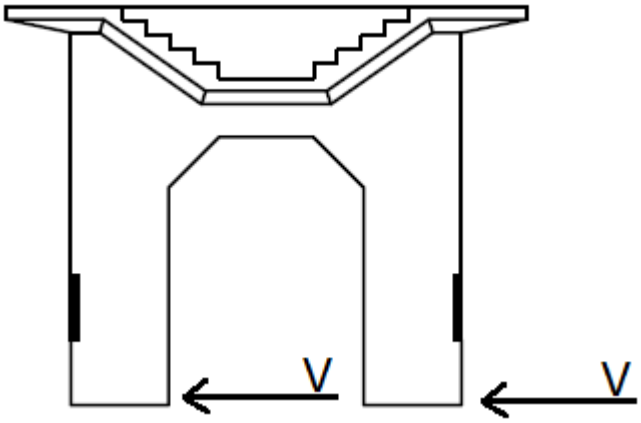
missä A_{fr} on kitkaan vaikuttava pinta-ala ja c_{fr} kitkakerroin, joka on teräkselle 0,01 (Eurokoodi 1991-1-4, 2011, s. 110). Kokonaistuulikuorma on siis

$$F_w = F_{fr} * F_e \tag{11}$$

(Eurokoodi 1991-1-4, 2011, s. 42-46)

3.3 Seisminen kuorma

Maanjäristyksistä aiheutuva seisminen kuormitus on syytä ottaa huomioon maanjäristyksille alttiina oleville alueille rakennettaessa. Maanjäristyksen huomioonottaminen on tässä tapauksessa laskettu UBC-97 –standardin mukaisesti staattisen voiman menetelmällä. Maanjäristyskuormasta on laskettu horisontaalinen ja vertikaalinen komponentti. Lisäksi horisontaaliseen maanjäristyskuormaan on laskentaohjelmassa lisätty perustuulennopeudesta aiheutuva kuormitus Eurokoodin 1991-1-4 mukaisesti, kuten todellisessakin tilanteessa tapahtuu. Horisontaalinen seisminen kuormitus on kannakkeeseen aiheutuvaa leikkauskuormitusta alla olevan kuvan mukaisesti.



Kuva 9. Horisontaalinen seisminen leikkausvoima.

Horisontaalinen leikkauskuormitus lasketaan kaavalla

$$V = \frac{C_v * I * m}{R * T_P} \tag{12}$$

missä m on tuella oleva massa, I seisminen tärkeyskerroin, R jäykkyyskerroin, C_v maaperän ja seismisyyden kerroin ja T_P rakenteen ominaisperiodi. Seisminen tärkeyskerroin saadaan alla olevasta taulukosta.

Taulukko 2. Seisminen tärkeyskerroin. (UBC-97, 1997, s. 30.)

Rakennusluokka	Seisminen tärkeyskerroin, I
1. Tärkeät rakennukset	1.25

Sisältää mm. sairaalat, paloasemat, poliisiasemat ja muita tärkeitä maanjäristyksen jälkeen tarvittavia rakennuksia.	
2. Vaaralliset rakennukset Rakennukset, jotka pitävät sisällään tai kannattelevat mm. kemikaaleja tai räjähteitä	1.25
3. Erikoisrakennukset Rakennukset, joissa on normaalisti paljon ihmisiä.	1
4. Normaalit rakennukset. Rakennukset, mitkä eivät kuulu yllä oleviin luokkiin.	1

Jäykkyyskerroin R on määritetty raudoitetuille betonirakennuksille arvolla 5.6. Maaperän ja seismisyyden kerroin C_v määritetään alla olevasta taulukosta maaperän S, seismisen alueen Z ja maanjäristyskeskuksen sijainnin N_V mukaan.

Taulukko 3. Maaperän ja seismisyyden kerroin $\boldsymbol{C_v}$. Suluissa olevat arvot ovat $\boldsymbol{C_a}$ arvoja. (UBC-97, 1997, s. 30 & 34-35.)

Maaperä	*Z1* = 0,075	*Z2* = 0,15	*Z3* = 0,2	*Z4* = 0,3	*Z5* = 0,4
S_A (Kova kivi)	0,06	0,12	0,16	0,24	0,32*N_V
S_B (Kivi)	0,08	0,15	0,20	0,30	0,40*N_V
S_C (Tiheä maa)	0,13 (0,09)	0,25 (0,18)	0,32 (0,24)	0,45 (0,33)	0,56*N_V
S_D (Tukeva maa)	0,18 (0,12)	0,32 (0,22)	0,40 (0,28)	0,54 (0,36)	0,64*N_V
S_E (Pehmeä maa)	0,26 (0,19)	0,50 (0,30)	0,64 (0,34)	0,84 (0,36)	0,96*N_V

Ominaisperiodi T_P määritetään kaavasta

$$T = C_t(h_n)^{3/4} \tag{13}$$

missä C_t on 0,030 raudoitetuille betonirakennuksille ja h on rakennuksen korkeus. Leikkausvoimalle on asetettu reunaehtoja seuraavanlaisesti:

$$0{,}11\, C_a * I * m < V < \frac{2{,}5 * C_a * I}{R} m \tag{14}$$

missä $C_a$on maaperän ja seismisyyden kerroin ja se määritellään taulukon 3 mukaisesti. Lisäksi seismisellä alueelle 5 leikkausvoiman on oltava vähintään

$$V = \frac{0{,}8 * Z * N_V * I}{R} m \tag{15}$$

(UBC-97, 1997, s. 14.)

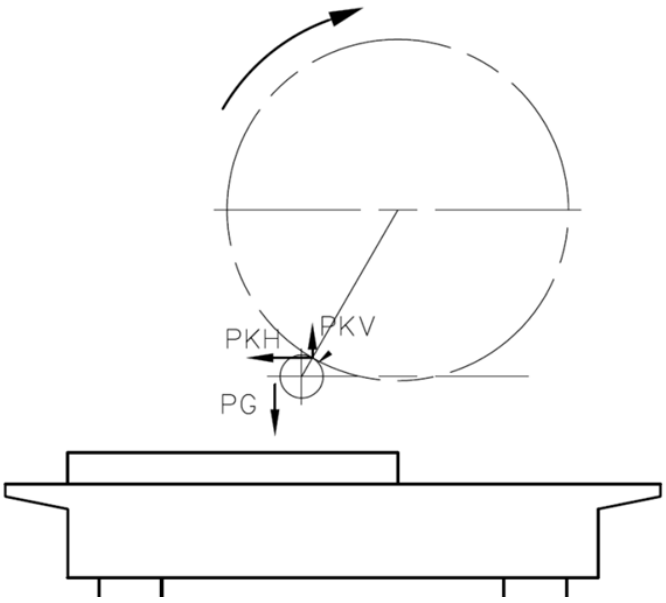
Vertikaalinen voimakomponentti lasketaan horisontaalisesta voimasta. Tyypillisesti se lasketaan horisontaalisesta voimasta kertoimella seuraavan kaavan mukaisesti:

$$V_v = 0{,}3 * V \tag{16}$$

(Kerttula, 2014)

3.4 Käytön kuormitukset

Meesauunia pyörittää hammasratas, joka on yhteydessä uunin kiertävään hammaskehään. Uuni pyörii hitaasti, mutta käytöstä aiheutuvat kuormitukset ovat kuitenkin merkittäviä, ja ne on otettava huomioon laskennassa. Uunilla voi olla yksi tai kaksi käyttömoottoria. Kummassakin tapauksessa laskenta on samanlainen: lasketaan käytöstä aiheutuvat kehävoiman vaaka- ja pystykomponentit. Kahden käytön tapauksessa on otettava erityisesti huomioon vaakavoimien resultantti, sillä tarpeeksi suureksi noustessaan se voi liikuttaa uunia. Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu yhden käytön periaatetta.



Kuva 10. Käytön kuormitukset. PKH on vaakavoima, PKV on pystyvoima, ja PG on käytön painosta aiheutuva voima.

Kuormitusten laskentaan tarvitaan vääntömomentti ja kehävoima. Lopuksi kehävoima jaetaan pysty- ja vaakakomponentteihin.

Uunin tehosta ja pyörimisnopeudesta laskettava vääntömomentti uunin keskilinjalla lasketaan seuraavasti

$$t = \frac{P * \eta}{n} \tag{17}$$

missä P on uunin teho, n pyörimisnopeus ja η on hyötysuhde. Vääntömomentista saadaan laskettua kehävoima seuraavasti

$$F_{ry} = \frac{\frac{t}{n_k}}{(\frac{d_H}{2}) * \cos \propto} \tag{18}$$

missä n_k on käyttöjen lukumäärä, d_H hammaskehän jakohalkaisija, $\propto$ on ryntökulma. Lopuksi jaetaan voima komponentteihin. Kuvan 10 mukaisesti vetävän puolen käytön pystyvoima lasketaan seuraavasti

$$F_{V1} = \gamma * F_{ry} * \sin (\propto + \beta) \tag{19}$$

missä γ on käyttökerroin ja β käyttökulma. Vastaavasti vaakakomponentille

$$F_{H1} = \gamma * F_{ry} * \cos (\propto + \beta) \tag{20}$$

Kahden käytön tapauksessa toisen työntävän puolen käytön pysty- ja vaakakomponentit lasketaan seuraavasti

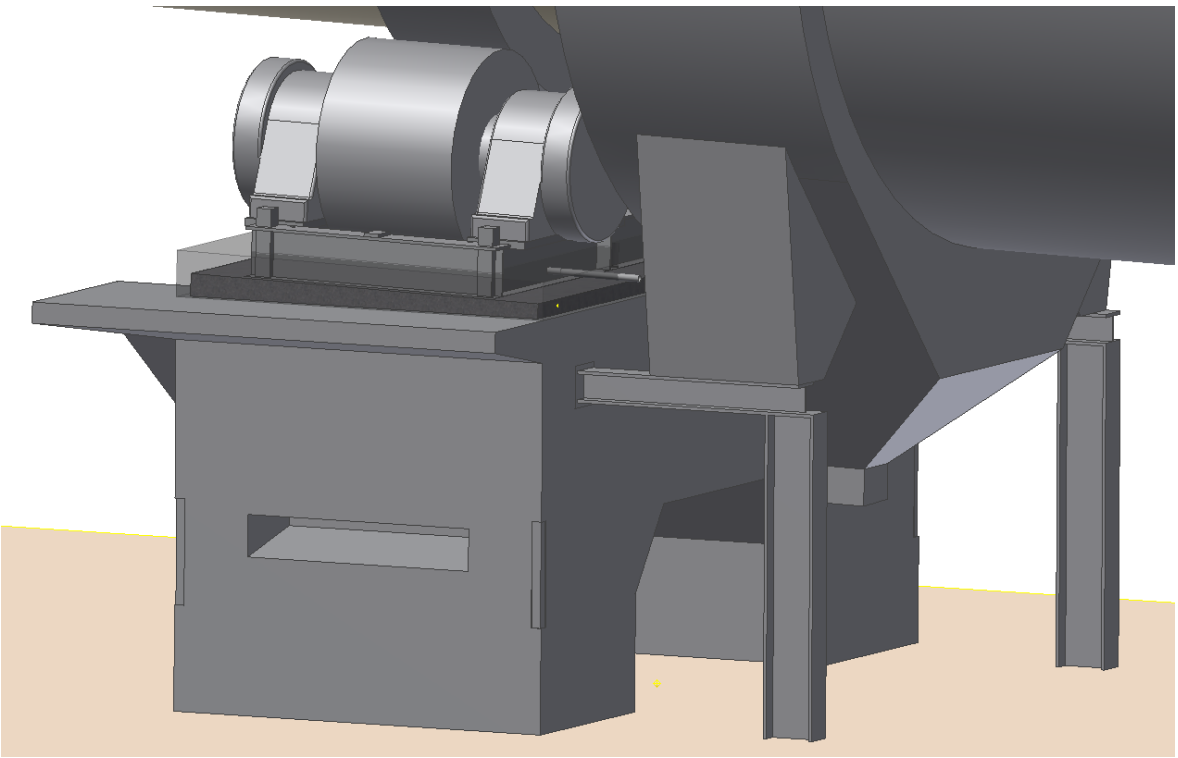
$$F_{V2} = \gamma * F_{ry} * \sin (\propto - \beta) \tag{21}$$

$$F_{H2} = \gamma * F_{ry} * \cos (\propto - \beta) \tag{22}$$

(Airila et. al., 2003, s. 509-511)

3.5 Jäähdyttimen säteilysuojan kuormitus

Meesauunin polttopäässä on jäähdytin ja sen säteilysuoja on hitsattu kahdella I-palkilla viimeisen kannatuspilarin päädyssä oleviin tartuntalevyihin. Osa säteilysuojan massasta on näin siirretty kannatuspilarille ja se on syytä ottaa huomioon kuormituslaskennassa. Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu jäähdyttimen kiinnittämistä.



Kuva 11. Jäähdyttimen kiinnitys.

Kiinnitykseen aiheutuva voima on noin puolet säteilysuojan massasta ja lasketaan kaavalla

$$F_c = m_c * g * 0{,}5 \tag{23}$$

missä m_c on säteilysuojan massa.

3.6 Peruspulttien mitoitus

Uunista aiheutuvat vaakakuormitukset siirretään I-palkeista tehdylle kannatinalustalle perustuspulttien kautta, jolloin peruspulttien kestävyys on avainasemassa laitteen toimivuudelle. Kahdeksan peruspulttia on kiinnitetty muttereilla kannatinalustan

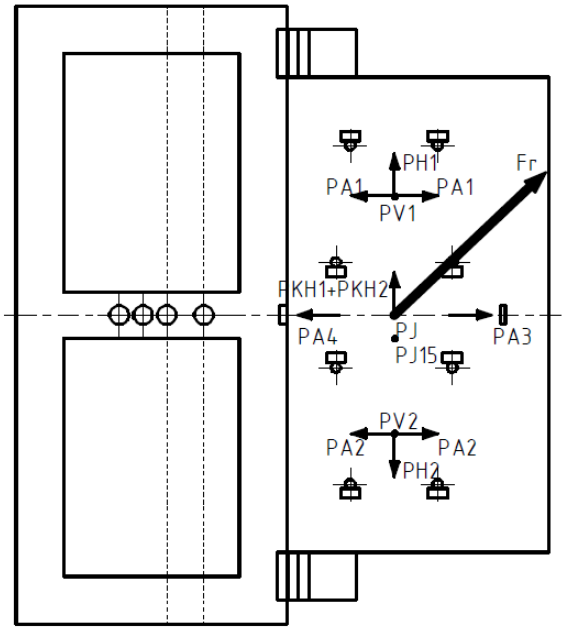
yläpinnalle ja perustuksen alapinnalle n. 2 metrin päähän kannatinalustan yläpinnasta. Perustukseen tehdyt pulttireiät jälkivaletaan peruspulttien kiinnittämisen jälkeen.

Kannatinalustan geometrian ja peruspulttien ominaisuuksien vaihtamisen yksinkertaistamiseksi laskentaperusteeksi valittiin peruspultin koko peruspulttien määrän sijaan. Laskennassa on kolme esivalittua pulttikokoa alla olevan taulukon mukaan.

Taulukko 4. Esivalitut pulttikoot. Materiaalina standardin EN-10025-2 mukainen teräs.

Koko	Jännityspinta-ala [mm^2]	Kiristysmomentti [Nm]
M33	694	1000
M42	1121	1700
M48	1478	2100

Laskennassa otetaan huomioon horisontaaliset leikkauskuormitukset ja pultin esikiristyksestä aiheutuva vetokuormitus. Horisontaaliset leikkauskuormitukset muodostuvat uunista aiheutuvien vaaka- ja aksiaalikuormitusten resultanttina. Resultantin suunta määräytyy uunin pyörimissuunnasta mm. meesan sijoittumisen ja käytön horisontaalisten voimien mukaan. Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu esimerkki kannatuksille aiheutuvista kuormituksista ja resultanttikuormitus.



Kuva 12. Leikkauskuormituksen resultantti. Resultanttivoiman suunta on viitteellinen.

Kuormitukset ovat suurimpia aina käytön tuella ja horisontaalisen resultanttikuormituksen suuruus lasketaan Pythagoran lausetta soveltaen seuraavasti yllä olevasta kuvasta

$$F_{v,Rd} = \sqrt{(PH1 + PH1d - PH2 + Fn + PKH1 + PKH2)^2 - PA_3^2} \tag{24}$$

Vertikaalinen esikiristysvoima lasketaan esikiristysmomentista seuraavasti

$$F_{pr} = \frac{T}{D * K} \tag{25}$$

missä T on esikiristysmomentti, K Nut Factor ja D ruuvin halkaisija. Lasketuista voimista saadaan mitoitettua pultit jännityspinta-alan A_s mukaan seuraavasti

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A_s}{\gamma_{m2}} \rightarrow A_s = \frac{\frac{F_{v,Rd}}{n}\gamma_{m2}}{\alpha_v * f_{ub}} \tag{26}$$

missä $F_{v,Rd}$ on pulteille aiheutuva leikkauskuormitus, n pulttien lukumäärä, γ_{m2} varmistuskerroin, α_v on 0,6 ja f_{ub} pultin murtolujuus. Vetokestävyys vastaavasti

$$F_{pre} = \frac{k_2 * f_{ub} * A_s}{\gamma_{m2}} \rightarrow A_s = \frac{F_{pre} * \gamma_{m7}}{k_2 * f_{ub}} \tag{27}$$

Saatujen jännityspinta-alojen perusteella valitaan pienin pultti, joka toteuttaa ehdon

$$A_S < A_{SB} \tag{28}$$

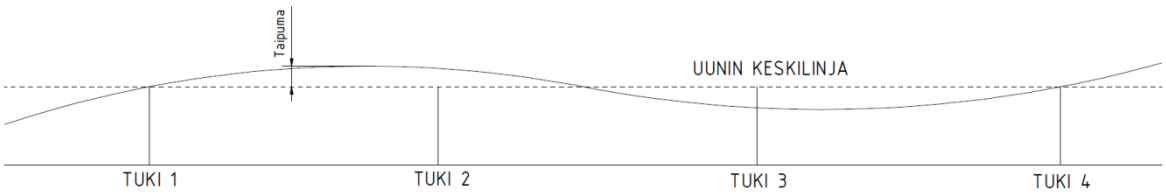
missä A_{SB} tarkasteltavan pultin jännityspinta-ala. (Eurokoodi 1993-1-8, 2005, s. 19-28)

3.7 Poikkeustilannetarkastelut

Normaalien kuormitusten lisäksi meesauuniin kohdistuu poikkeustilanteista aiheutuvia kuormituksia. Nämä kuormitukset voivat olla huomattavia, joten niiden analysoiminen on tarpeen. Tyypillisesti poikkeustilanteet syntyvät vaurioista uunin osissa, valmistusepätarkkuuksista tai huoltotoimenpiteiden aikana tapahtuvista toimenpiteistä. Tässä diplomityössä tutkittiin kannatuspyörän epätasaisuudesta johtuvia impulssivoimia, uunin taipumisesta johtuvia kuormituksia ja uunin nostotunkista aiheutuvaa kuormitusta.

3.7.1 Taipunut uuni

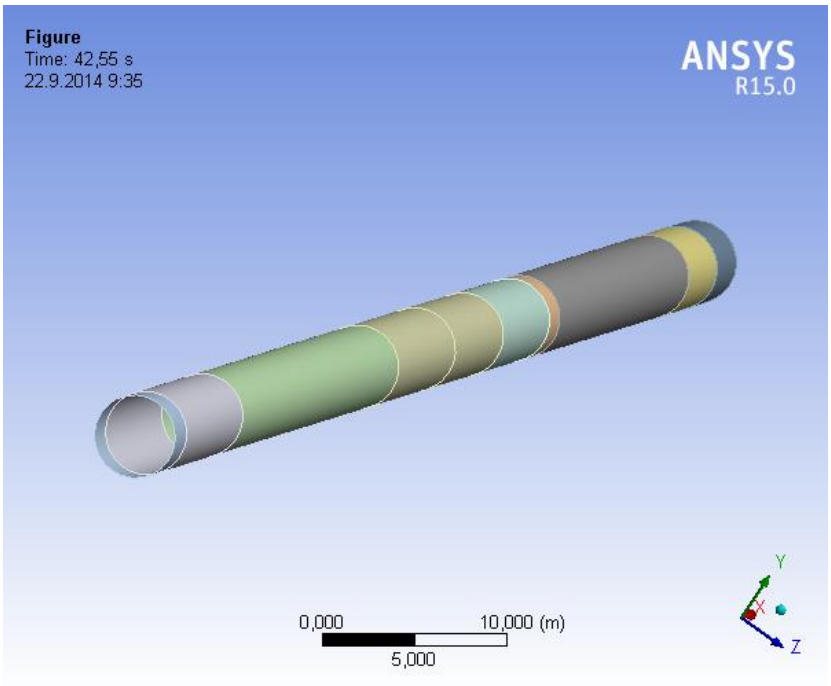
Uunin vaipan valmistuksessa, kokoamisessa ja käytössä vaippaan voi muodostua taipumaa. Tyypilliset taipumat ovat muodoltaan U- tai S-muotoisia ja pituuksiltaan muutamasta millimetristä kymmeniin millimetreihin. Taipumat aiheuttavat uunin kannatuksille kuormitusvaihteluita taipuneen uunin pyöriessä akselinsa ympäri. Tässä diplomityössä uunin vaipan taipumisesta johtuvia kuormituksia tarkasteltiin 3-, 4- ja 5-tukisten uunien tilanteissa, jolloin tarkastellut taipumat olivat muutamista millimetreistä kymmeniin millimetreihin. Erityisesti tarkastelussa kiinnitettiin huomiota siihen, millä taipuman määrällä jokin kannatinpyöristä irtoaa uunista. Alla havainnollistava kuva 4-tukisen uunin S-muotoisesta taipumasta.



Kuva 13. Uunin S-muotoinen taipuminen.

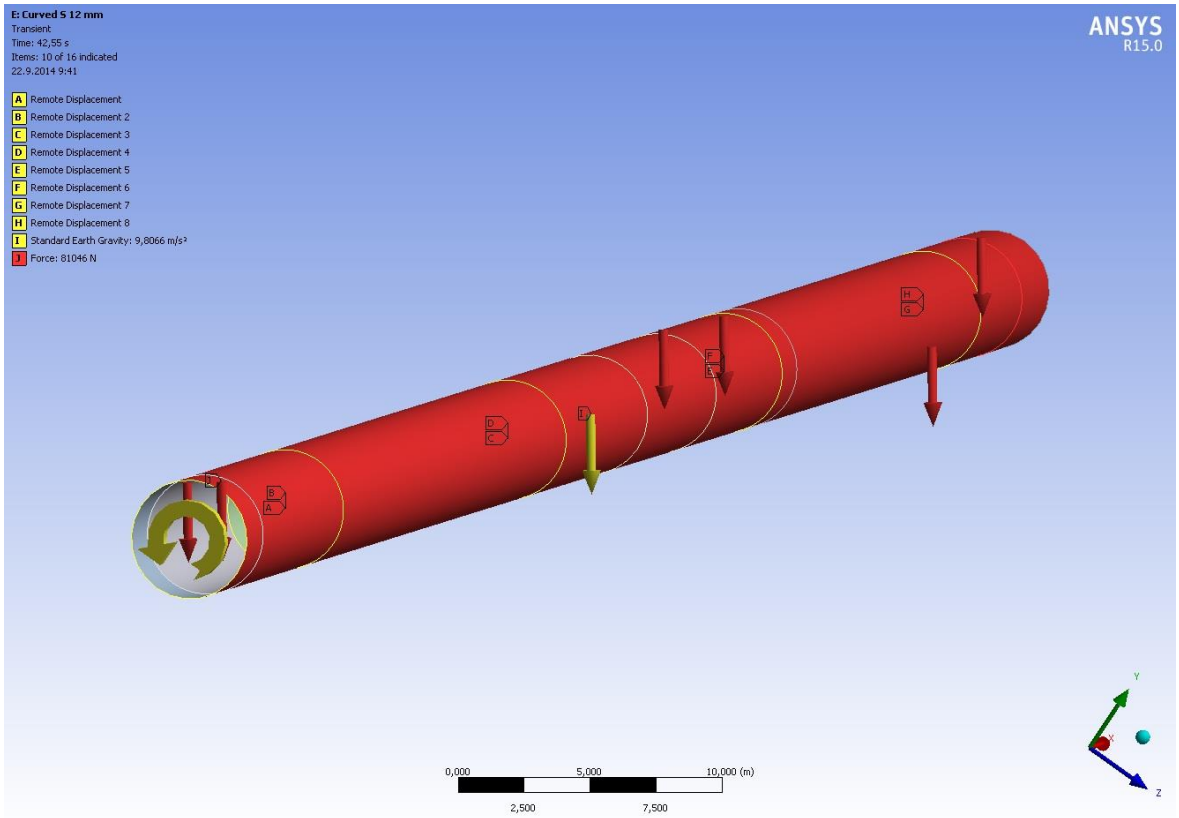
Kuormitustilanteita tarkasteltiin Ansys Workbench v15.0 –FE-analyysiohjelmalla. Uunin vaippa mallinnettiin Ansyksen DesignModeler-ohjelmalla kuorimallina jokaiseen taipumatapaukseen erikseen. Esimerkin neljän tuen uunissa mallissa käytettiin 2657

parabolista neliöelementtiä, joka osoittautui riittäväksi määräksi tämän tyylisen kuorimallin analysoinnissa. Mallinnus ja analyysi suoritettiin Transient Structural – ympäristössä, sillä kyseessä oli dynaaminen analyysi. Transient Structural -analyysi ottaa huomioon kappaleen inertiaominaisuudet ja dynaamisen analyysin avulla saadaan realistiset kuormitusjakaumat. Uuni pyörii analyysissä kokonaan akselinsa ympäri, jolloin analyysi kestää noin 40 sekuntia. Alla on havainnollistava kuva kuorimallista.



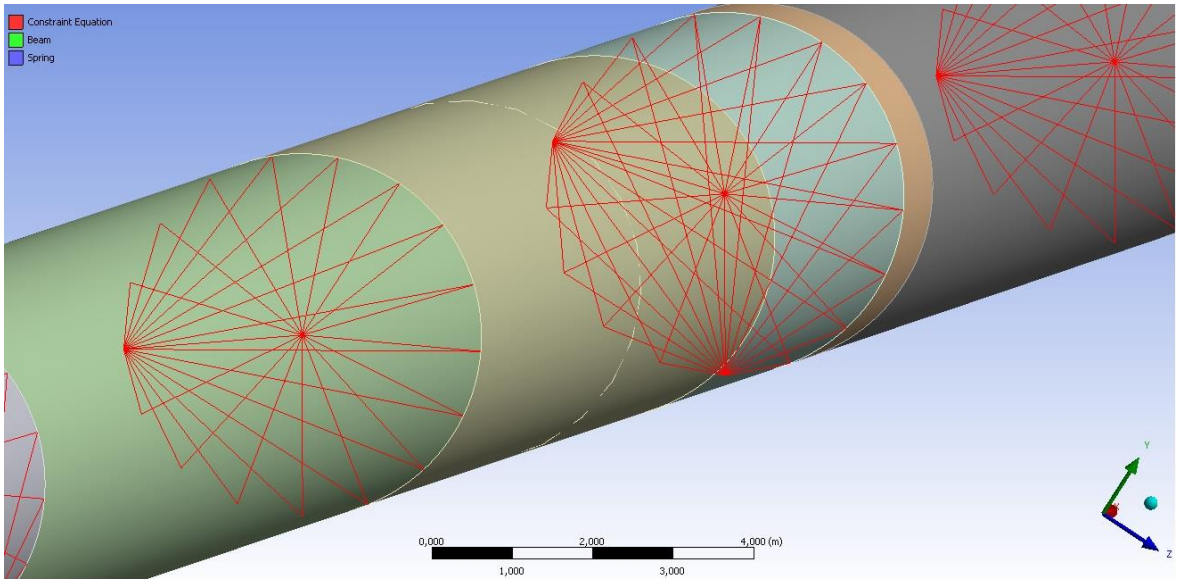
Kuva 14. Ansys kuorimalli neljän tuen uunin vaipasta. Vaippa on jaettu kuormitusten mukaisiin alueisiin.

Uunin vaippa mallinnettiin sektoreista, joihin lisättiin erilaisia kuormituksia ja tukia. Uunin vaipasta kohdistuu tukipyörille painovoiman aiheuttama kuormitus. Vaipan sisäpinnalle mallinnettiin lisäksi meesauunissa käytettävät muuraukset, joiden vaikutus on suuren massan takia huomattava. Lisäksi vaipan päässä on mallinnettu jäähdyttimestä aiheutuva kuormitus. Kuormituksien tarkka mallintaminen on tärkeää, sillä esimerkiksi muurauksista aiheutuvat kuormitukset ovat suuria ja ne vaikuttavat vaipan taipuman määrään. Alla on kuva mallinnetuista kuormituksista ja rajoitteista.



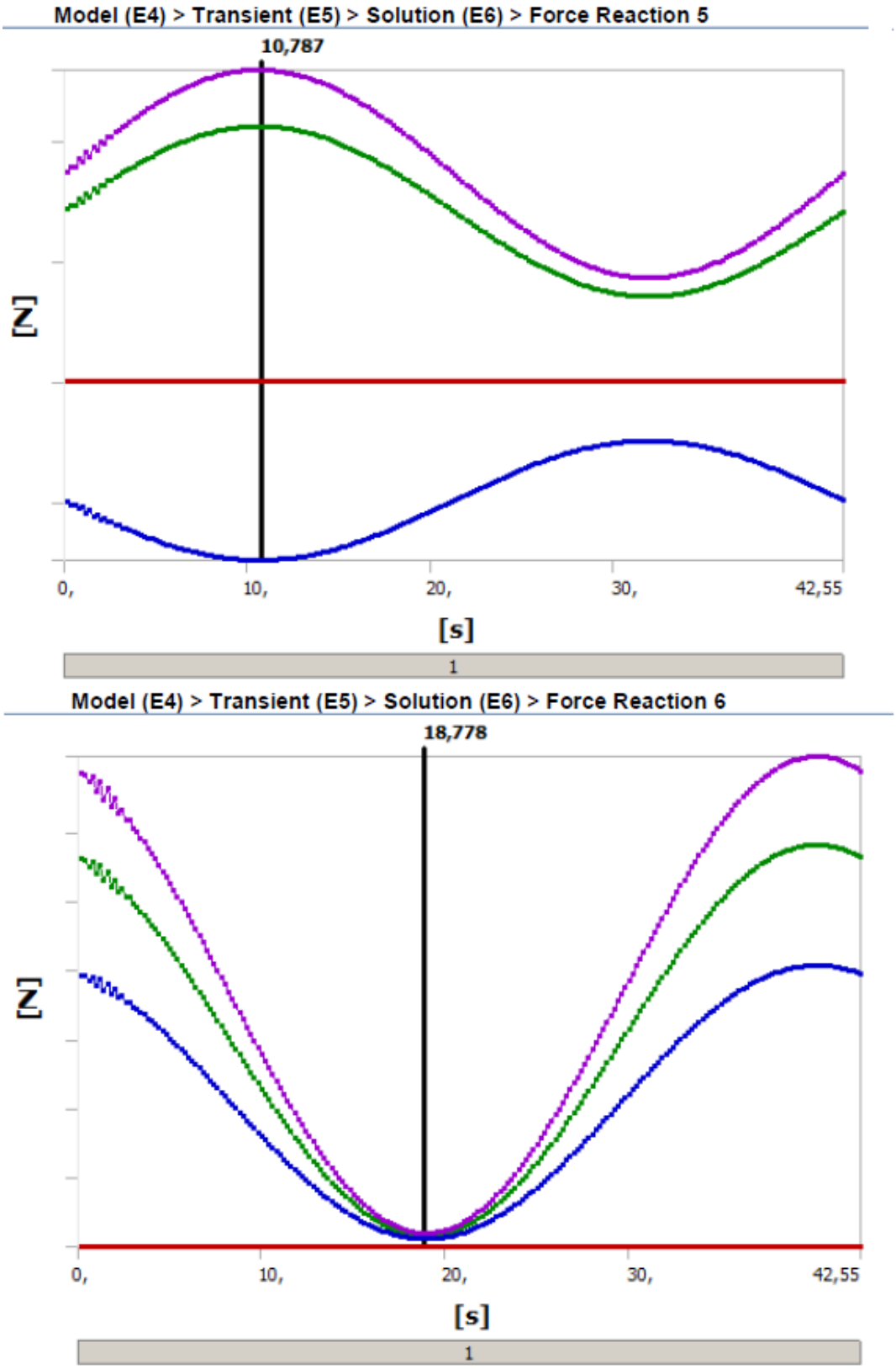
Kuva 15. FE-analyysimallin kuormitukset ja rajoitteet.

Uunin kannatinpyörät mallinnettiin remote displacement –rajoiteyhtälöillä. Malliin tehtiin pääkoordinaatisto ja kaksi lisäkoordinaatistoa, joiden y-akselit määritettiin kannatinpyörien tukikulman mukaan. Rajoiteyhtälöt rajoittavat tukipisteiden liikkeen tukikulman suuntaan (y-akseli) ja jättävät muut vapausasteet vapaiksi. Rajoiteyhtälöt sijoitettiin uunin vaipalla oleville viivoille kannatuskohdille, jolloin uunin keskilinjalle muodostui jokaisen kannatuksen kohdalle pilottisolmu alla olevan kuvan mukaisesti. Pilottisolmusta muodostettiin jäykät elementit uunin vaipan pinnalle, jolloin rajoiteyhtälö seurasi uunin liikettä sen pyöriessään akselinsa ympäri. Ohjaavalle kannatukselle lisättiin lisäksi rajoite uunin aksiaalisessa suunnassa, sillä uunin aksiaalinen liike on rajoitettu ohjaavalla kannatuksella.



Kuva 16. Pilottisolmut.

Tuloksina analyysista saatiin kuormitusjakaumat eri tuille koko kierroksen aikana. Säätämällä taipuman määrää erilaiseksi voitiin havaita erilaisia kuormitusjakaumia. Lisäksi etsittiin raja-arvo taipumalle, jolloin uunin vaippa nousee tai on juuri nousemassa kannatinpyörältä ilmaan. Esimerkin neljän tuen uunissa S-muotoisella taipumalla tämä tapahtui 3. tuella alla olevien kolmannen tuen kuormitusjakaumien mukaan. Muut kuormitusjakaumat on esitetty liitteessä.

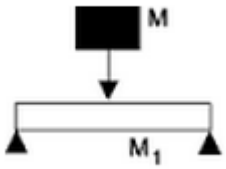


Kuva 17. Kuormitusjakaumat esimerkkitapauksen kolmannella tuella. Ylempi kuvaaja on prosessinsuunnassa oikean puoleinen kannatinpyörä ja alempi vasemman. Violetti kuvaa kokonaistukivoimaa, vihreä viiva pystysuuntaista ja sininen vaakasuuntaista tukivoimaa.

FE-analyysista saatuja kuormitusvaihtelun tuloksia verrattiin suoran vaipan tukivoimiin. Suoran taipumattoman vaipan tukivoimat laskettiin vastaavalla FE-analyysilla. Näiden vertailun tuloksien avulla määritetään dynaamiset kuormituskertoimet perustuskuvan kuormituksiin.

3.7.2 Impulssivoimat

Tässä diplomityössä tutkittiin meesauunin kannatuksille syntyviä impulssivoimia, kun uunia tukevassa kannatinpyörässä on kuoppa. Laskentaohjelman takia impulssivoimat pyrittiin laskemaan ensisijaisesti analyyttisesti. Todellinen tapaus on käytännössä massan pudottaminen nivelellisesti tuetulle taipuvalle palkille, mitä käytettiin hyväksi analyyttisen laskentakaavan kehittämisessä. Alla havainnollistava kuva kuormituksista ja reunoehdoista, joita käytettiin laskennassa.



Kuva 18. Massan putoaminen nivelellisesti tuetulle palkille. M kuvaa massaa, joka on tässä tapauksessa uunin vaippa. M1 kuvaa kannatinpyörää, joka on yksinkertaistettu suoraksi akseliksi.

Oletettiin energiahäviön impulssin aikana olevan nolla, palkki lineaarielastiseksi ja putoavan uunin pysyvän kiinni kannatinpyörässä koko palkin taipumisen ajan. Näillä oletuksilla ja tiedolla, että uunin massa on huomattavasti suurempi kuin palkin (kannatinpyörä) laskettiin analyyttisesti impulssivoiman suuruus. Lisäksi analyyttisestä mallista jätettiin pois kannatinpyörän lieriömäisyys. Kun uuni putoaa kannatinpyörän kuoppaan matkan h ja palkki taipuu matkan δ on tehty työ

$$F_k(h + \delta) \tag{29}$$

missä F_k on uunin painovoima kannatinpyörälle. Palkki taipuu maksimipisteeseen, jolloin kaikki energia on kulunut taipumaan. Saadaan muodonmuutosenergiaksi

$$U = \frac{F\delta}{2} = \frac{24EI\delta^2}{L^3} \tag{30}$$

missä F on taipuman aiheuttava voima, E kimmokerroin, I jäyhyysmomentti ja L palkin pituus (kannatinpyörän laakeriväli). Kun oletetaan kaiken uunin kuoppaan putoamisesta syntyneen energian kuluvan taipumiseen, saadaan yhteys

$$F_k(h + \delta) = \frac{24EI\delta^2}{L^3} \tag{31}$$

Mistä edelleen ratkaisemalla taipuma δ dynaamisessa tapauksessa

$$\delta = \frac{F_k L^3}{48EI} + [(\frac{F_k L^3}{48EI})^2 + 2h(\frac{F_k L^3}{48EI})]^{½} \tag{32}$$

Voidaan huomata, että ratkaisu sisältää staattisen taipuman

$$\delta_{st} = \frac{F_k L^3}{48EI} \tag{33}$$

Tällöin dynaaminen tapaus supistuu muotoon

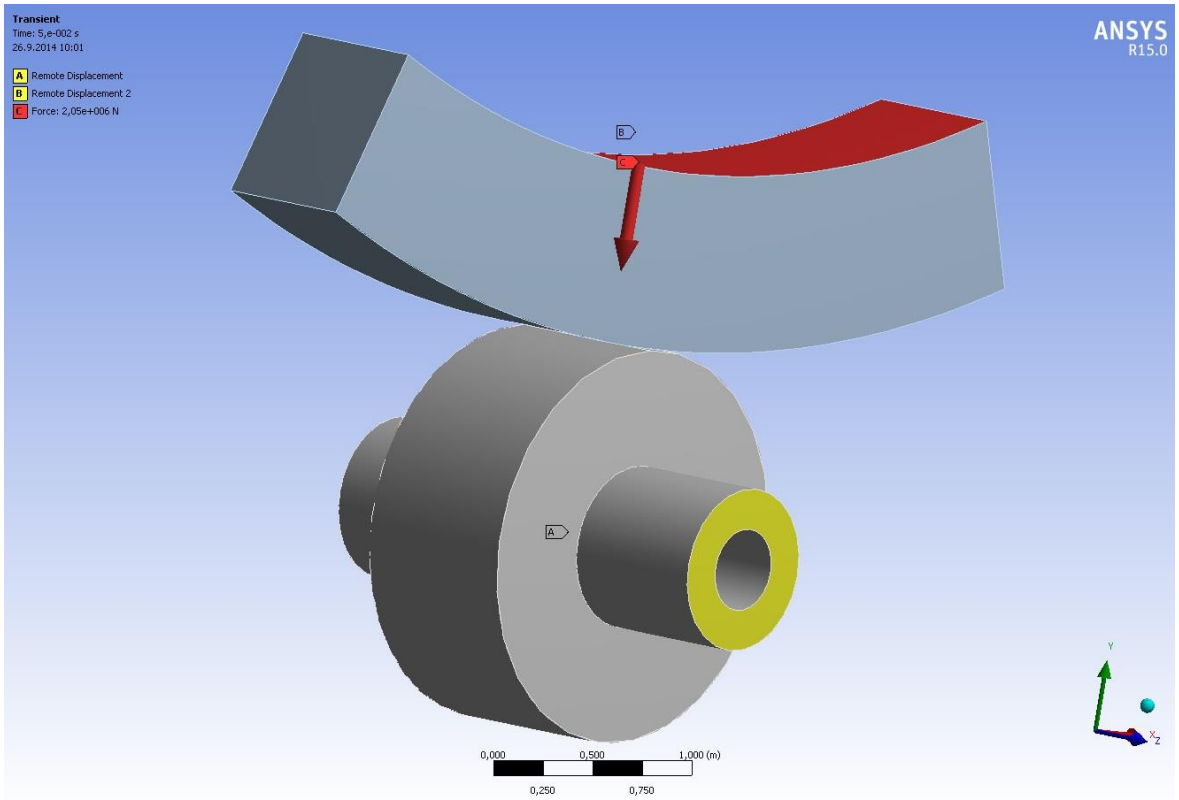
$$\delta = \delta_{st} + [{\delta_{st}}^2 + 2h\delta_{st}]^{½} \tag{34}$$

Impulssivoiman yhtälö saadaan, kun oletetaan tippuvan uunin kaiken kineettisen energian osumahetkellä kuluvan palkin taipumiseen seuraavasti

$$F = \frac{E_k}{\delta} = \frac{½mv^2}{\delta} \tag{35}$$

missä E_k on uunin kineettinen energia. (Gere & Timoshenko, 1991, s. 495-496.)

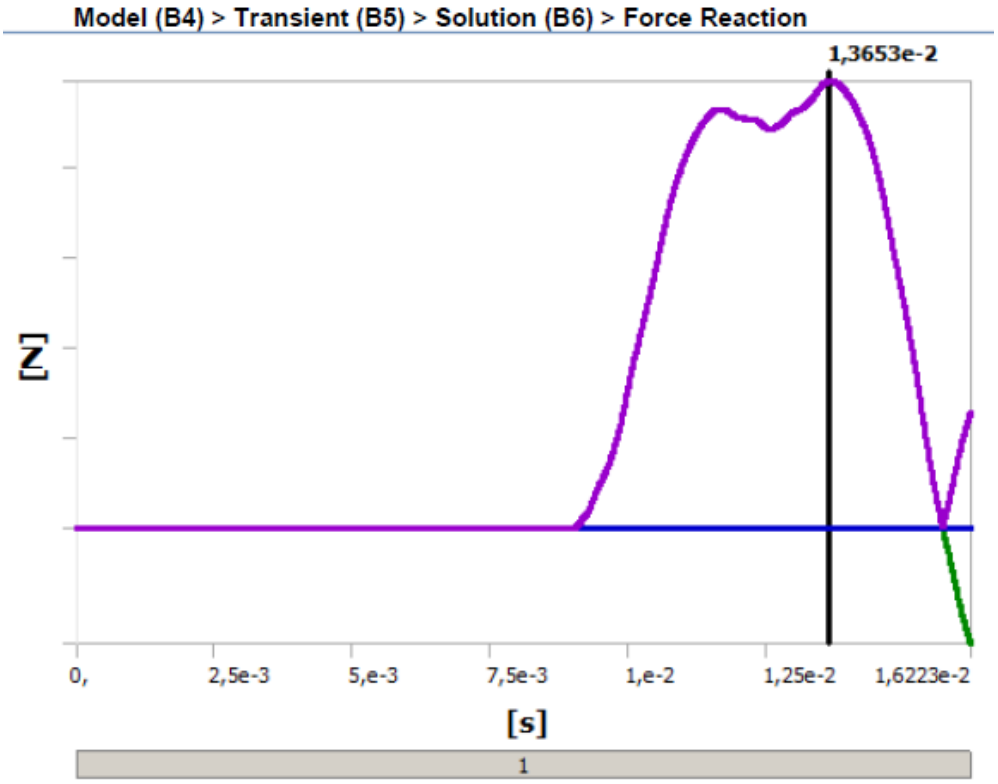
Analyyttinen laskenta koettiin tarpeelliseksi verifioida FE-analyysilla. FE-analyysi tehtiin Ansys Workbench v15.0 –FE-analyysiohjelmalla. FE-malliin mallinnettiin kannatinpyörä onttona akselisena ja sektori kannatinrenkaasta alla olevan kuvan mukaisesti.



Kuva 19. Kannatinpyörä ja kannatinrenkaan sektori.

Kannatinpyörä tuettiin laakerointikohdista, jotka ovat tässä mallissa kannatinpyörän akselin päädyt. Laakerointikohtien rajoiteyhtälöissä estettiin translaatiot, mutta rotaatiot jätettiin vapaiksi. Kannatinrenkaalle jätettiin vapausasteeksi translaatio tuentakulman suunnassa, joka on siis sama kuin uunista aiheutuvan voiman suunta. Uunista aiheutuva voima mallinnettiin kannatinrenkaan sisäpinnalle vastaamaan todellista tilannetta. Kannatinpyörän ja –renkaan välille mallinnettiin kitkaton kontakti. Kontaktikappaleeksi asetettiin rengas ja kohdekappaleeksi pyörä. Kontakti asetettiin asymmetriseksi, jolloin analyysi on kevyempi, koska laskijan ei tarvitse muodostaa kumpaankin kappaleeseen sekä kontakti- että kohde-elementtejä.

Dynaamisessa Transient Structural -analyysissä kappaleet asetettiin kuopan syvyyden verran irralleen toisistaan. Lopullisen viimeisen analyysin kestoksi määritettiin epätarkempien aiempien analyysien perusteella 0,0162 s ja aika-askeleeksi 0.000001 s tarpeeksi tarkan kontaktin laskemiseksi. Tuloksena saatiin voimakuvaaja ajan suhteen, joka on esitetty kuvassa alla.



Kuva 20. Impulssivoima-analyysin voiman kuvaaja.

Saadut FE-analyysin tulokset vastaavat analyyttisellä kaavalla saatuja impulssivoiman tuloksia, jolloin analyyttisen kaavan antamia tuloksia voidaan käyttää perustuskuvan kuormitustaulukossa.

3.7.3 Tunkkivoima

Uunin huolto- ja korjaustoimenpiteissä joudutaan usein nostamaan uunia esimerkiksi laakereiden käsittelyä varten. Uunin nosto tapahtuu tyypillisesti nosturilla tai hydraulisilla tunkeilla. Tunkeilla nostettaessa aiheutuu perustuksille ylimääräistä kuormitusta, kun uuni irtoaa kannatinpyöristä. Hydrauliset tunkit asetetaan kannatinalustan keskelle, joka on valettu kannatinalustan yläpintaan asti. Tunkkien alle laitetaan teräslevy jakamaan muodostuva kuorma tasaisesti perustukselle ja uunin vaippaan asetetaan kaareva tukilevy alla olevan kuvan mukaisesti.

Kuva 21. Uunin nostaminen hydraulisilla tunkeilla.

Poikkeustapauksissa uunia voidaan myös nostaa vain yhdellä tunkilla. Tällöin tunkki sijoitetaan n. 15 asteen kulmaan uunin keskilinjasta ja uuni pysyy kannateltuna toisella kannatinpyörällä.

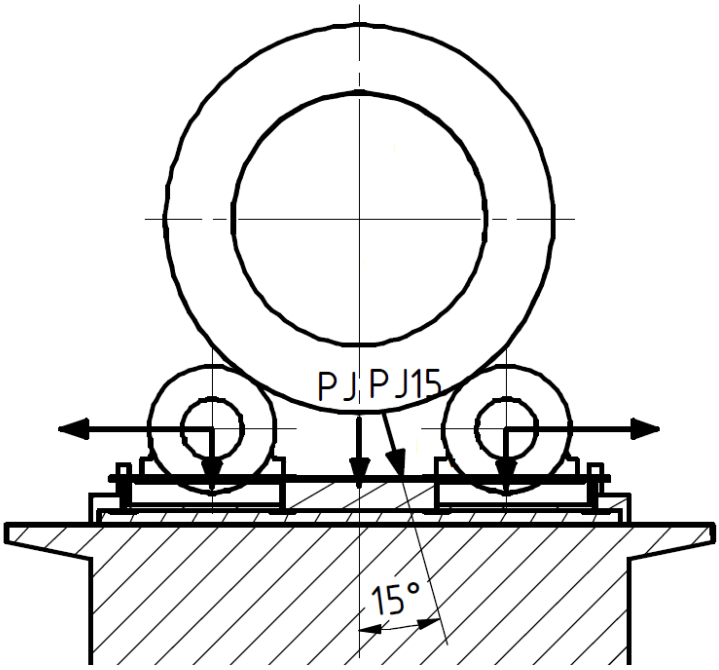
Kahdella tunkilla nostettaessa muodostuva tunkkikuorma on uunin tuelle aiheutuva kokonaiskuormitus. Kokonaiskuormituksen lisäksi tarvitaan varmuuskerroin, sillä uuni voi olla esimerkiksi taipunut huomaamattomasti. Jos uuni on taipunut nostettavan tuen kohdalta, voi uunin irrottamiseen kannatinpyöriltä tarvittava voima olla huomattavasti normaalia tuelle aiheutuvaa kokonaisvoimaa suurempi. Alla on esitetty käytetyt varmuuskertoimet.

Kahdella tunkilla nostettaessa tunkkivoima on siis

$$F_J = \gamma * PV0 \tag{36}$$

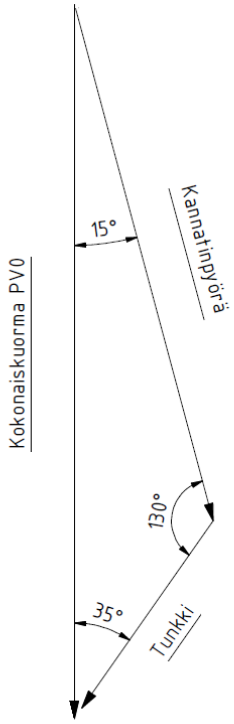
missä γ on varmuuskerroin ja PV0 tuelle aiheutuva kokonaisvertikaalivoima.

Yhdellä tunkilla nostettaessa on kuormitustapaus alla olevan kuvan mukainen.



Kuva 22. Yhden tunkin kuormitustapaus. Vasen kannatinpyörä jää tukemaan uunia tunkin kanssa.

Tämän tyyppisessä tapauksessa tunkkivoima lasketaan vektorisummana alla olevan kuvan mukaan ja ratkaistaan sinilauseella.



Kuva 23. Vektorisumma tunkkivoiman ratkaisemiseen.

Tunkkivoima saadaan sinilauseella seuraavasti

$$F_{J15} = \frac{PV0 * sin\ 15°}{sin\ 130°} \tag{37}$$

4 SUUNNITTELUOHJELMA

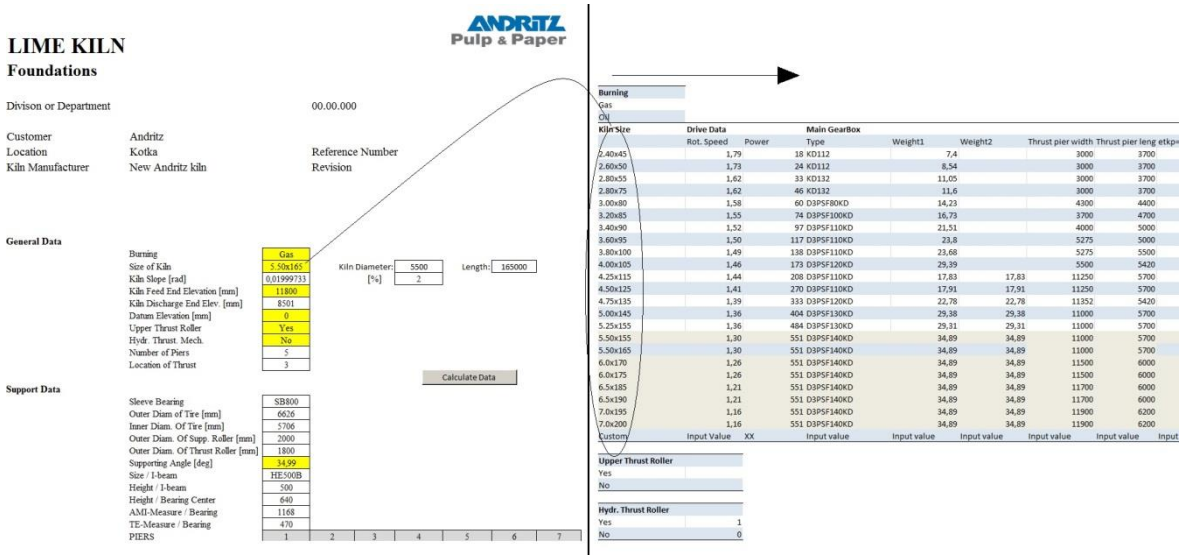
Tässä työssä laadittiin meesauunin kannatuksien suunnitteluohjelma. Ohjelma soveltuu Andritzin meesauunien kannatuksien mitoitukseen ja suunnitteluun, eikä sitä ole tarkoitettu käytettäväksi muihin kiertouuneihin. Ohjelman laatimat valmistuspiirustuksen mitat on tarkoitettu tukipilarien asetteluun, korkeudensäätöön ja toiminnallisten mittojen esitykseen. Varsinaiseen tukipilarien lujuusmitoitukseen valmistuspiirustus ottaa kantaa kuormitustaulukolla, jossa esitetään tukipilareille aiheutuvat kuormitukset. Näiden kuormitusten perusteella suunnittelijat laskevat tukipilareiden ulkomitat ja raudoituksen tapauskohtaisesti, sillä niiden laskentaan liittyy paljon yksityiskohtia, eikä niihin ole mahdollista suunnittelutyökalussa ottaa kantaa. Ohjelman tarkoituksena on luoda parametrit CAD-mallin ohjausta varten sekä tuottaa tietoa valmistuspiirustukseen. Ohjelman käyttö on normaalisti standardiuunien valmistuspiirustusten luominen, mutta mitoitusohjelma on rakennettu sallimaan laajat muokkaukset parametreihin ja uunin eri komponenttien tietoihin.

Mitoitusohjelman toteutukseen valittiin Microsoft Excel taulukkolaskentaohjelma. Ohjelman valinnan perusteena on sen laaja levinneisyys yritysmaailmassa ja lähes kaikkien nykyisten CAD-ohjelmien tuki, jolloin CAD-ohjelman mahdollinen vaihto tulevaisuudessa olisi helpompi. Lisäksi suunnitteluohjelman käyttämät numeerisen elementtimenetelmän tulokset ovat Excel –muodossa, jolloin niiden linkitys ohjelmaan on helppoa. Mitoituksen ja kuormituslaskennan monimutkaisempia laskentoja varten hyödynnettiin Excelin VBA (Visual Basic for Applications)- ohjelmointiympäristöä, sillä laskennoissa esiintyviä ehtoja ja iterointeja ei olisi voitu toteuttaa normaalilla taulukkolaskennalla. Yksinkertaisemmat laskennat suoritettiin taulukoissa. VBA –ohjelmointiympäristön lisäksi CAD-mallin automatisoinnissa käytettiin Autodesk Inventorin iLogic –ohjelmointiympäristöä. iLogic on Inventorin sisäänrakennettu ohjelmointiympäristö, joka mahdollistaa CAD-mallin varsin laajan makroihin perustuvan muokkauksen ja automatisoinnin.

4.1 Suunnitteluohjelman rakenne

Suunnitteluohjelma on rakennettu yhden Excel –sivun ympärille, johon kaikki tärkeä lähtötieto kerätään. Tämä sivu on nimetty Input –sivuksi. Input –sivulle syötetään

suunnittelun pakolliset lähtöarvot, joiden perusteella Excel täyttää loput tarvittavat tiedot, jotka on tallennettu Data Entry -sivulla alla olevan kuvan mukaisesti.



LIME KILN
Foundations

Divison or Department 00.00.000

Customer Andritz
Location Kotka Reference Number
Kiln Manufacturer New Andritz kiln Revision

General Data

Burning	Gas
Size of Kiln	5.50x165
Kiln Slope [rad]	0,01999733
Kiln Feed End Elevation [mm]	11800
Kiln Discharge End Elev. [mm]	8501
Datum Elevation [mm]	0
Upper Thrust Roller	Yes
Hydr. Thrust. Mech.	No
Number of Piers	5
Location of Thrust	3

Kiln Diameter: 5500 [%] 2 Length: 165000

Calculate Data

Support Data

Sleeve Bearing	SB800
Outer Diam of Tire [mm]	6626
Inner Diam. Of Tire [mm]	5706
Outer Diam. Of Supp. Roller [mm]	2000
Outer Diam. Of Thrust Roller [mm]	1800
Supporting Angle [deg]	34,99
Size / I-beam	HE500B
Height / I-beam	500
Height / Bearing Center	640
AMI-Measure / Bearing	1168
TE-Measure / Bearing	470
PIERS	1 2 3 4 5 6 7

Burning
Gas
Oil

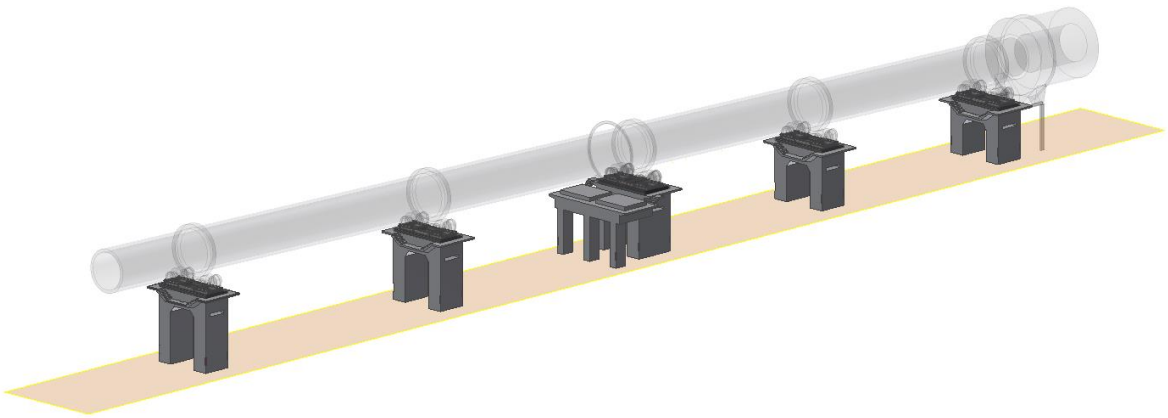
Kiln Size	Drive Data Rot. Speed	Power	Main GearBox Type	Weight1	Weight2	Thrust pier width	Thrust pier leng	etkp=
2.40x45	1,79	18	KD112	7,4		3000	3700	
2.60x50	1,73	24	KD112	8,54		3000	3700	
2.80x55	1,62	33	KD132	11,05		3000	3700	
2.80x75	1,62	46	KD132	11,6		3000	3700	
3.00x80	1,58	60	D3PSF80KD	14,23		4300	4400	
3.20x85	1,55	74	D3PSF100KD	16,73		3700	4700	
3.40x90	1,52	97	D3PSF110KD	21,51		4000	5000	
3.60x95	1,50	117	D3PSF110KD	23,8		5275	5000	
3.80x100	1,49	138	D3PSF110KD	23,68		5275	5500	
4.00x105	1,46	173	D3PSF120KD	29,39		5500	5420	
4.25x115	1,44	208	D3PSF110KD	17,83	17,83	11250	5700	
4.50x125	1,41	270	D3PSF110KD	17,91	17,91	11250	5700	
4.75x135	1,39	333	D3PSF120KD	22,78	22,78	11352	5420	
5.00x145	1,36	404	D3PSF130KD	29,38	29,38	11000	5700	
5.25x155	1,36	484	D3PSF130KD	29,31	29,31	11000	5700	
5.50x155	1,30	551	D3PSF140KD	34,89	34,89	11000	5700	
5.50x165	1,30	551	D3PSF140KD	34,89	34,89	11000	5700	
6.0x170	1,26	551	D3PSF140KD	34,89	34,89	11500	6000	
6.0x175	1,26	551	D3PSF140KD	34,89	34,89	11500	6000	
6.5x185	1,21	551	D3PSF140KD	34,89	34,89	11700	6000	
6.5x190	1,21	551	D3PSF140KD	34,89	34,89	11700	6000	
7.0x195	1,16	551	D3PSF140KD	34,89	34,89	11900	6200	
7.0x200	1,16	551	D3PSF140KD	34,89	34,89	11900	6200	
Custom	Input Value	XX	Input value	Input value	Input value	Input value	Input value	Input

Upper Thrust Roller
Yes
No

Hydr. Thrust Roller
Yes 1
No 0

Kuva 24. Mitoitusohjelman "Input" ja "Data Entry" -sivut. Suurin osa arvoista määräytyy uunin koon mukaan.

Pakollisia suunnittelun lähtöarvoja ovat merkitty keltaisella ja niitä ovat uunin syöttöpään korkeus, tuentojen jännevälit, polttoaineen tyyppi, ylempi aksiaaliohjaus, hydraulinen aksiaaliohjaus, käyttö- ja tuentakulma, pyörimissuunta, syöttö- ja polttopään vaipan lämpötila, maanjäristysalue ja tuulennopeuden suunnitteluarvo. Lähtötietojen avulla lasketaan ja haetaan Data Entry –sivulta yhteensä 138 parametria, jotka ohjaavat 3D –mallia. Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu tässä työssä kehitetty automaattinen 3D –malli.



Kuva 25. Inventor -malli.

Laskentaohjelma on rakennettu niin, että Input –sivun arvoja muokkaamalla parametrit päivittyvät oikein. Lisäksi Excelissä on Parameters –sivu, johon tulostuvat kaikki CAD-mallin ohjaamiseen tarvittavat parametrit automaattisesti Input –sivun täytön jälkeen. Parameters -sivulta tiedot siirtyvät CAD-malliin, jota ohjaa alla esitetyn ohjelmarungon mukaisesti iLogic yhdessä Excelin kanssa. Erillisellä Loadings -välilehdellä on esitetty kuormitustaulukot, joka on havainnollistettu alla.

LOADINGS

Loading of Platforms _____kg/m2
Max Point Loads of Platforms _____kg
Speed of Wind _____m/s
Seismic Zone _____ Seismic Factor _____

Supports

NR.		PV0	PV1	PV2	PH1	PH2	PA1	PA2	PA3	PA4	PNH	PNV	PIH	PIV	PJ	PJ15
1	ST. (kN) DYN. (kN)															
2	ST. (kN) DYN. (kN)															
3	ST. (kN) DYN. (kN)															
4	ST. (kN) DYN. (kN)															
5	ST. (kN) DYN. (kN)															
6	ST. (kN) DYN. (kN)															
7	ST. (kN) DYN. (kN)															

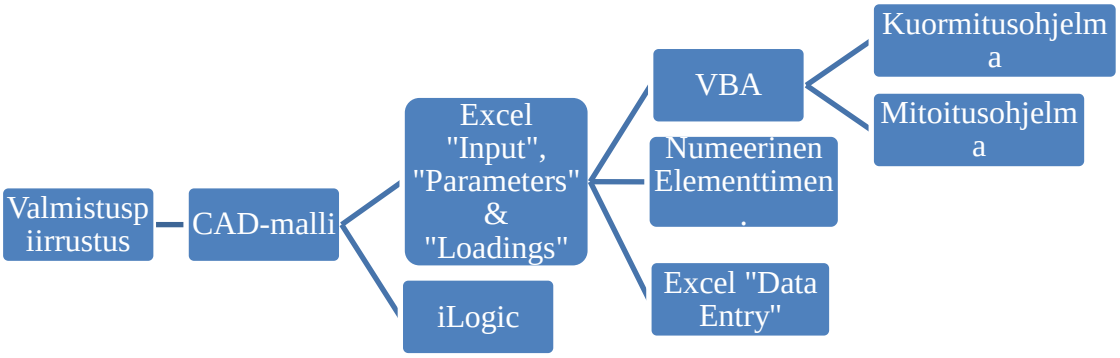
Main Drive

NR.		PKH	PKV	PKHS	PKVS	PG
1	ST. (kN) DYN. (kN)					
2	ST. (kN) DYN. (kN)					

Kuva 26. Loadings -välilehti.

Kuormituslaskenta on toteutettu omassa VBA –pohjaisessa laskentaohjelmassaan, joka tulostaa 4 kappaletta kuormitustaulukkoja: tukien staattiset ja dynaamiset kuormat, käytöstä aiheutuvat kuormat, jäähdyttimen kuorma ja työskentelytasojen kuormat.

Valmistuspiirustuksen ohjauksen ohjelmarunko on toteutettu neljässä vaiheessa. Alla on havainnollistettu ohjelmarunkoa.



Kuva 27. Ohjelmarunko.

Lähtötietojen syöttämisen jälkeen käynnistetään mitoitusohjelma ja kuormituslaskentaohjelma, jotka on ohjelmoitu Excelissä. Tämän jälkeen tulokset tulostetaan Input –sivulle. Lisäksi Input –sivulle haetaan numeerisen elementtimenetelmän laskennan tulokset ja kerätään taulukoidut arvot Data Entry –sivulta. Tarvittavat tulokset ohjataan Parameters –sivulle, joka ohjaa CAD –mallia yhdessä iLogic-ohjelmien kanssa. iLogicilla on toteutettu mm. oikeanlaisten komponenttien valitseminen kokoonpanoon, pilareiden paikoitus Excelin parametrien perusteella ja piirteitä ohjaavien parametrien ohjaus tilanteen mukaisesti.

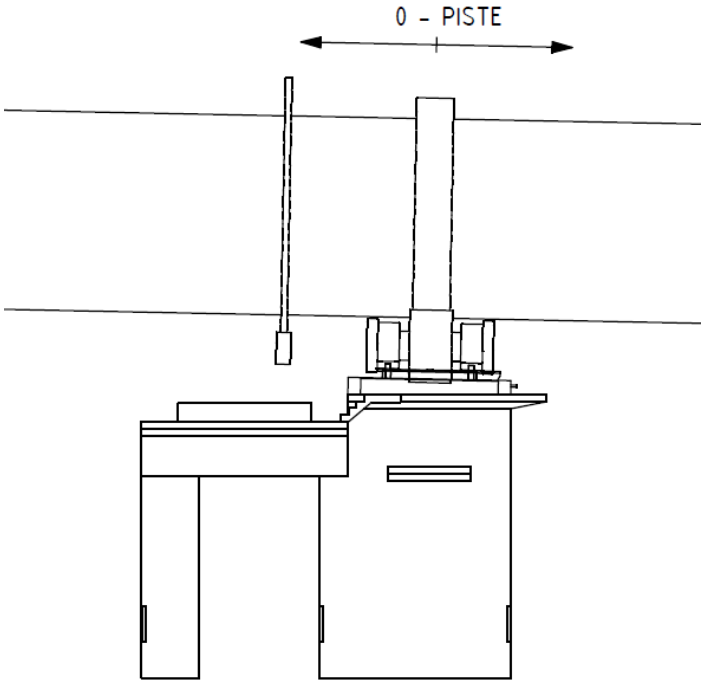
4.2 Mitoitusohjelmat

Tässä kappaleessa on esitelty parametrien tuottamiseen käytettyjä mitoitusohjelmia. Keskeisimmät erilliset mitoitusohjelmat ovat lämpölaajenemisen laskenta, kannatuksien korkeuden määritys ja kannatuksien ulkomittojen määritys toiminnallisten mittojen perusteella.

4.2.1 Lämpölaajeneminen

Uunin käyttölämpötila on hyvin korkea, jolloin lämpölaajeneminen on suurta. Suurilla uuneilla kokonaislämpölaajeneminen voi olla jopa 400 mm. Näin suuret laajenemiset

täytyy ottaa huomioon mitoituksessa. Meesauunin mitoituksessa käytettävää aksiaaliohjauksen kohdalle sijoitettua 0-pistettä käytetään tässä tapauksessa lämpölaajenemisen 0-pisteenä. Tällä tavoin saadaan minimoitua käytön hammaskehälle aiheutuva lämpölaajeneminen. Laajenemiset lasketaan tästä pisteestä molempiin suuntiin alla olevan kuvan mukaisesti.



Kuva 28. Nollapisteen sijoittuminen.

Lähtötietoina tiedetään uunin jännevälit ja kuoren lämpötila sekä syöttö- että polttopäässä. Näiden kautta saadaan laskettua kaikille jänneväleille keskiarvolämpötilat seuraavasti

$$T_{MT,i} = T_{FE} + \frac{(T_{DE} - T_{FE}) * L_{sc,i}}{L_{kiln}} \tag{38}$$

missä T_{FE} on syöttöpään lämpötila, T_{DE} polttopään lämpötila, $L_{sc,i}$ jännevälin keskipisteen etäisyys uunin syöttöpäästä ja L_{kiln} uunin pituus. Kun tiedetään lämpötilat jokaisessa jännevälissä, saadaan lämpölaajeneminen kaavasta

$$\Delta L = \propto_{th} * L_i * T_{MT,i} \tag{39}$$

missä $\propto_{th}$ on materiaalin lämpölaajenemiskerroin ja L_i on jännevälin pituus. Kannatuksien mitoituksen ja perustuskuvan kannalta oleellisia arvoja ovat jokaisen jännevälin lämpölaajeneminen, syöttö- ja polttopään laajenemiset sekä uunin kokonaislämpölaajeneminen. Näiden avulla lasketaan mm. pilareiden korkeus ja pilareiden etäisyys syöttöpäästä.

4.2.2 Korkeus

Pilareiden korkeuden määrittää käytön sijainti, sillä siihen on asetettu 0-piste. Ensimmäisessä vaiheessa lasketaan uunin päiden korkeusero seuraavasti

$$\Delta h = sin \propto * L_{Kiln} \tag{40}$$

missä $\propto$ on uunin kaltevuus. Seuraavaksi lasketaan ohjaavan pilarin korkeus käyttäen syöttöpään korkeutta, uunin pituutta ja korkeuseroa uunin keskilinjasta tuen yläpinnalle. Korkeusero uunin keskilinjasta tuen yläpinnalle lasketaan tapauskohtaisesti uunin pyörästön, kannatusrenkaan ja tuentakulman avulla seuraavalla kaavalla

$$h_t = h_{FE} - (sin \propto * L_{Kiln} + (h_{BC} + s * cos(arcsin * \left(\frac{s * sin \propto}{s}\right))) \tag{41}$$

missä h_{FE} on syöttöpään korkeus, h_{BC} tukipyörän keskilinjan korkeus tuen yläpintaan ja s uunin keskilinjan etäisyys tukipyörästä. Lisäksi otetaan huomioon mahdolliset välykset esimerkiksi lämpölaajenemista varten. Seuraavaksi lasketaan ohjaavasta kannatuksesta molempiin suuntiin sijaitsevien tukipilareiden korkeudet erikseen seuraavalla kaavalla, syöttöpäätä kohden

$$h_{t,i} = h_t + sin \propto * \sum L_i \tag{42}$$

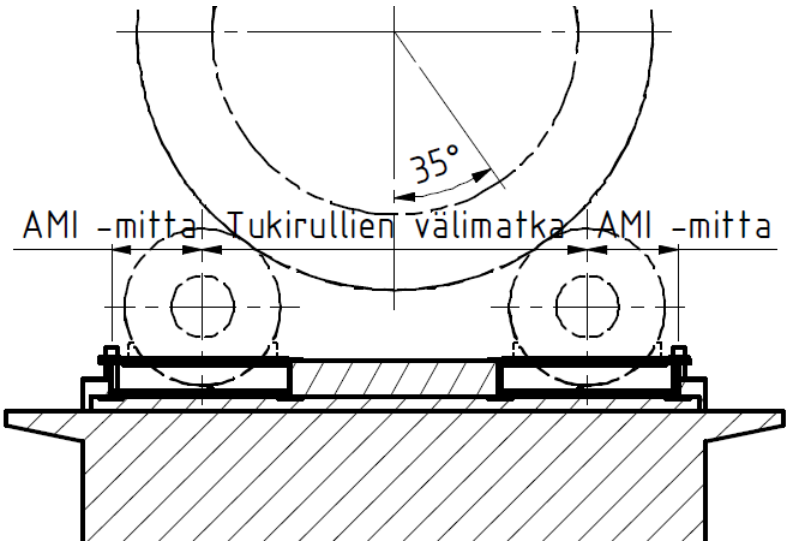
ja vastaavasti polttopäätä kohden

$$h_{t,i} = h_t - sin \propto * \sum L_i \tag{43}$$

missä L_i on uunin jänneväli lämpölaajenemisen jälkeen.

4.2.3 Toiminnalliset mitat

Tässä suunnittelutyökalussa kannatukset mitoitetaan toiminnallisten mittojen perusteella. Lujuustekninen mitoitus jätetään suunnittelijoille, jotka mitoittavat kannatukset annettujen kuormituksien perusteella. Toiminnalliset mitat kannatuksilla määritetään laakereiden tarvitseman tilanvarauksen perusteella. Näitä ovat pituus- ja leveyssuuntaiset mitat kannatuksille sekä perustuspulttien sijoitteluun liittyvät tilavaraukset kannatuksien muotoon. Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu leveyssuunnassa huomioon otettavia mittoja.



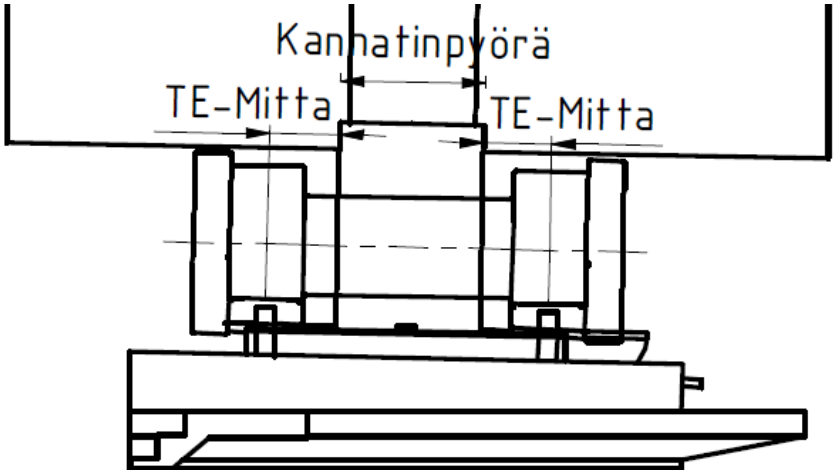
Kuva 29. Toiminnalliset mitat kannatuksille leveyssuunnassa.

Kannatuksien leveyssuuntainen mitta määritetään yllä olevan kuvan mukaisesti tukirullien välimatkasta ja laakeroinnin AMI-mitasta, kun tiedetään uunin tuentakulma. AMI-mitta on kannatinpyörän keskilinjan etäisyys kannatinalustan ulkoreunasta. Mitoitus lasketaan seuraavasti

$$s_w = \left(\frac{(D_{SRing} + D_{SRoller}) * 0{,}5}{Sin \propto} + AMI\right) * 2 \qquad (44)$$

missä $\propto$ on tukikulma, D_{SRing} kannatinrenkaan ulkohalkaisija ja $D_{SRoller}$ kannatinpyörän ulkohalkaisija. Saatuun mittaan lisätään vielä jälkivalun yms. tarvitsemat lisätilavaraukset uunikohtaisesti.

Kannatuksien pituussuuntainen mitoitus tehdään käyttämällä kannatinpyörän leveyttä ja laakeroinnin TE-mittaa alla olevan kuvan mukaisesti.



Kuva 30. Toiminnalliset mitat kannatuksille pituussuunnassa.

TE-mitta lasketaan kannatinpyörän reunasta kannatinalustan ulkoreunaan. Kannatus mitoitetaan pituussuunnassa siis seuraavasti

$$s_L = w_{SRoller} + 2 * TE \tag{45}$$

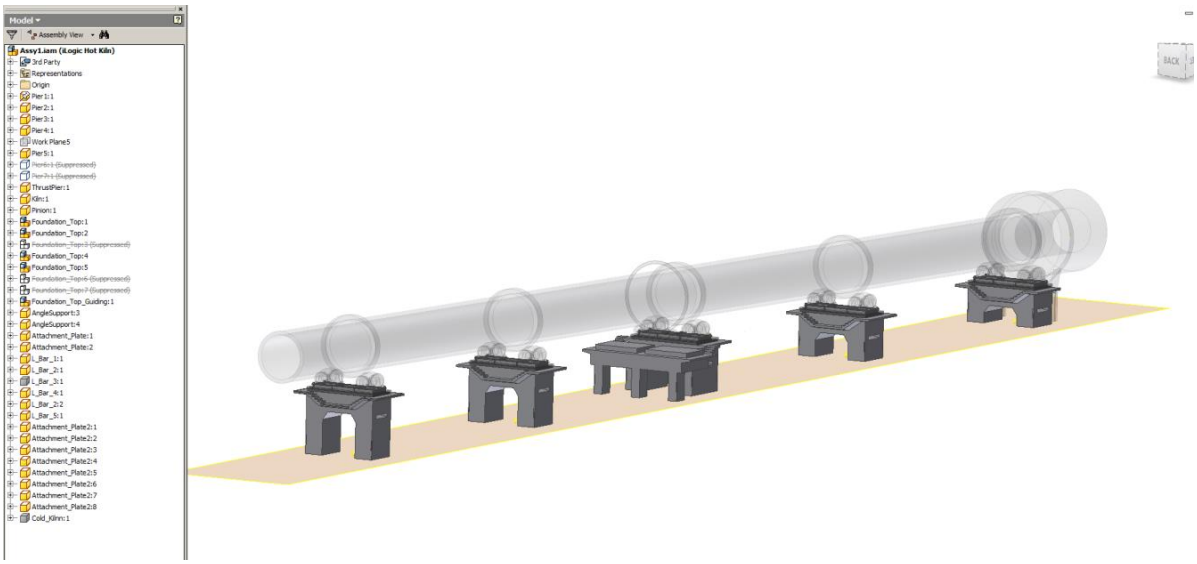
missä $w_{SRoller}$ on uunin leveimmän kannatinpyörän leveys. Saatuun mittaan lisätään vielä jälkivalun yms. tarvitsemat lisätilavaraukset uunikohtaisesti.

5 CAD -MALLI

Tässä kappaleessa käsitellään työssä kehitettyä CAD-mallia. Ohjelmistona käytettiin Autodeskin Inventoria versiota 2012. Cad-malli on kehitetty tulevaisuutta varten ja siinä on varaukset seitsemäntukisille uuneille, kun tällä hetkellä isoimmatkin uunit ovat vielä viisitukisia.

5.1 Rakenne

Cad-malli rakennettiin perustuskuvan laadintaan, jolloin perustuskuvaan tulevat komponentit mallinnettiin tarkasti ja referensseinä (tilavarauksina) mallinnetut kappaleet karkeasti vain ulkomitoiltaan. Kappaleet tuotiin kokoonpanoon yksittäisinä kappaleina ja mallinnettiin eri .ipt -tiedostoihin niiden kappalekohtaisten yksityiskohtien takia. Poikkeuksena perusvalujen päälle tuleva kannatinalusta ja siihen liittyvät jälkivalut tehtiin kahtena erillisenä kokoonpanona, sillä ne eroavat vain käytön kannatuksella. Referenssinä mallinnetut uunin osat, kuten vaippa, jäähdytin, kannatinrenkaat ja laakerointi mallinnettiin kahdessa eri osassa ja asetettiin läpinäkyviksi alla olevan kuvan mukaisesti.



Kuva 31. Cad-mallin rakennepuu ja malli.

Referenssiosista vaippa, kannatinrenkaat ja jäähdytin ovat omassa .ipt tiedostossa ja laakerointi omassaan. Laakerointi on liitetty kannatinalustojen kokoonpanoon ja toinen

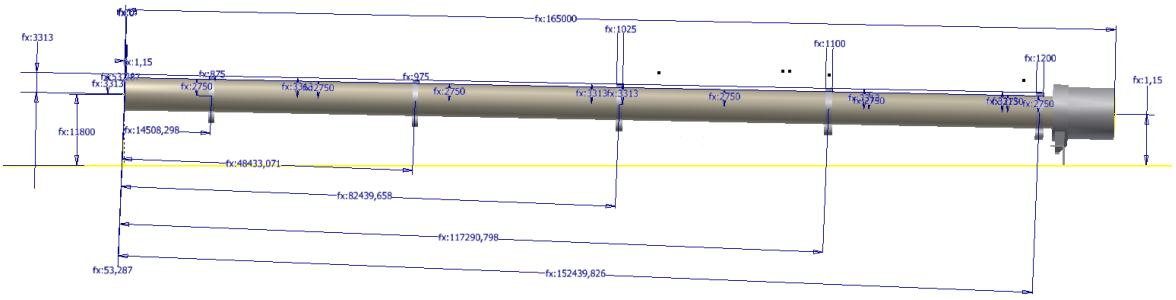
referenssiosa on tuotu suoraan kokoonpanoon. Kokoonpanossa on yhteensä 38 osaa mukaan lukien varaukset seitsemälle tuelle.

5.2 Parametrisointi

Cad-mallista haluttiin mahdollisimman automatisoitu, jolloin osien parametrisointi oli keskeisessä osassa mallin kehittämisessä. Excelin Parameters –sivulle on tuotu mitoitusohjelmasta, kuormitusohjelmasta ja uunin tietokannasta tarvittavat parametrit, jotka on linkitetty iLogiciin, cad-malliin ja sen osien piirtämiseen. Näitä parametreja ovat esimerkiksi perustusten ulkomitat, korkeudet, paikoitus, pyörimissuunta, jännevälit ja uunin halkaisija. Parametreja on yhteensä 138 kappaletta. Alla olevissa kuvissa on havainnollistettu parametritaulukkoa ja referenssiosana mallinnettua osaa, missä kaikki näkyvät mitat ovat parametrisoitu.

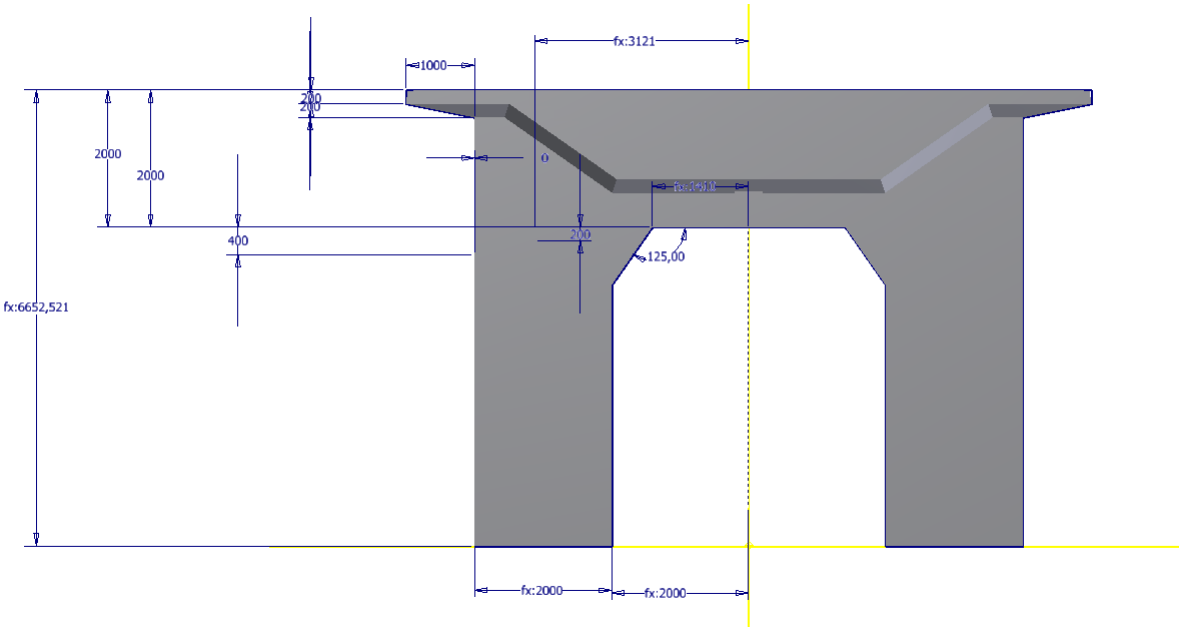
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Flength	3800	mm	Foundation Length		Without platforms			
2	FWidth	8000	mm	Foundation Width		Without platforms			
3	Tlength	5700	mm	Thrust Pier length					
4	Twidth	11000	mm	Thrust Pier Width		Without platforms			
5	Theight	4544	mm	Thrust Pier height					
6	Tloc	0	ul	Thrust pier location		1 = Lower side, 0 = upper side			
7	TPLoc	3	ul	Thrust Pier Location					
8	Rotation	1	ul	Rotation of Kiln		1 = Clockwise, 0 = Counterclockwise			
9	Drive	2	ul	Number of drives 1...2					
10	PNro	5	ul	Number of piers					
11	P1	14455	mm	Pier positions					
12	P2	48380	mm	Horizontal distance					
13	P3	82386	mm	Hot Kiln					
14	P4	117238	mm						
15	P5	152440	mm						
16	P6	0	mm						
17	P7	0	mm						
18	PH1	6653	mm	Height of pier 1					
19	PH2	5974	mm	Height of pier 2					
20	PH3	5294	mm	Height of pier 3					
21	PH4	4597	mm	Height of pier 4					
22	PH5	3893	mm	Height of pier 5					
23	PH6	0	mm	Height of pier 6					
24	PH7	0	mm	Height of pier 7					
25	KLength	165000	mm	Kiln Length					
26	KOD	5500	mm	Kiln Diameter					
27	KFEHeight	11800	mm	Kiln Feed end Height					
28	Slope	1,145763	deg	Slope of kiln					
29	SAngl	34,99	deg	Angle of Support					
30	Scut	2290	mm	Cut length for Screw ends					
31	RRD	6626	mm	Riding Ring Diameter					
32	Glength	4500	mm	Guiding Pier Length					

Kuva 32. Parametritaulukko.



Kuva 33. Referenssiosana mallinnetun vaipan, kannatinrenkaiden ja jäähdyttimen parametrisointi.

Joidenkin osien mitat taas asetettiin vakioiksi, ja niissä vain muutamat mitat ovat parametrisoituja. Hyvä esimerkki tästä on kannatuksien perusvalu, missä poikkileikkauksen mitat ovat lähes kaikki vakioita. Ainoastaan leveys, pituus ja korkeus on parametrisoitu alla olevan kuvan mukaisesti.



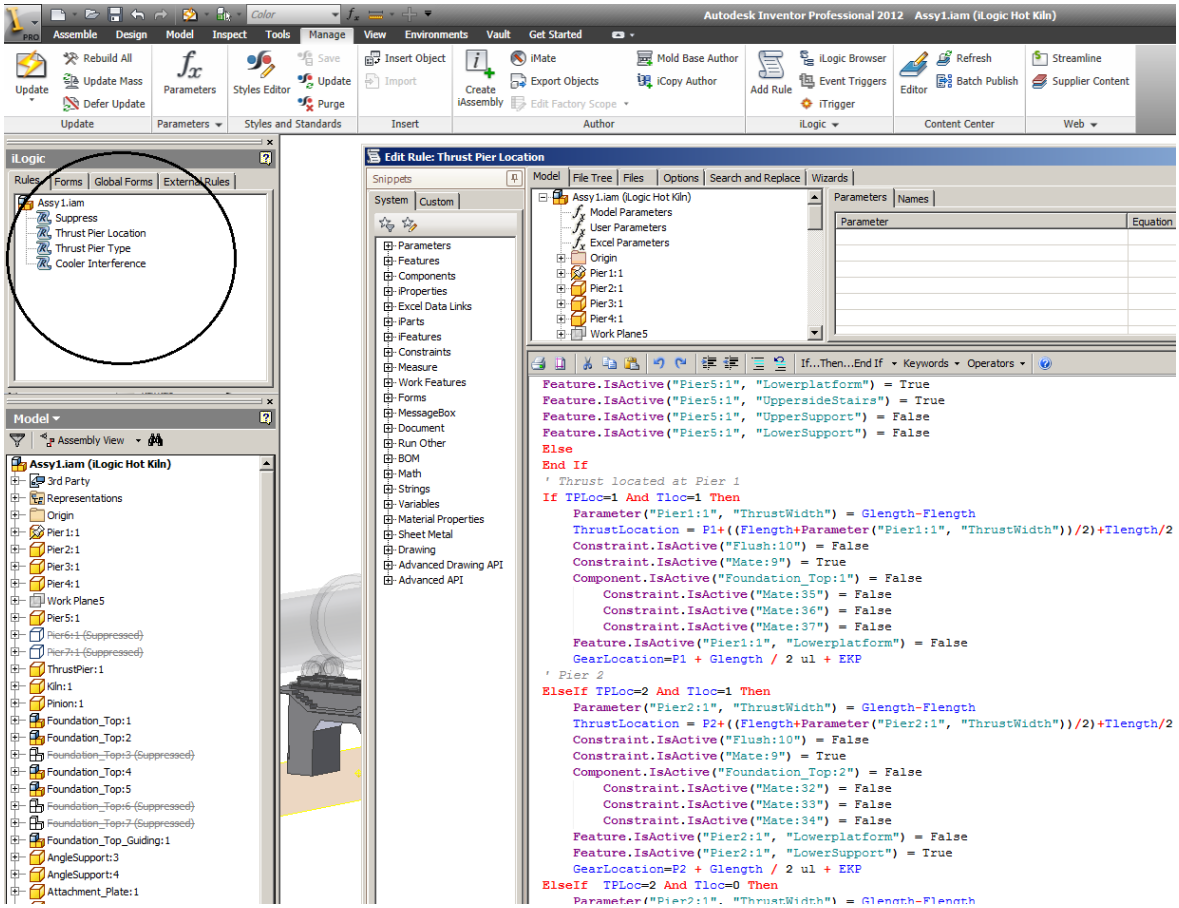
Kuva 34. Perusvalun mallinnus.

Lisäksi parametreilla ohjataan kokoonpanoissa esimerkiksi rajoiteyhtälöitä, joista keskeisimpiä on kannatuksien paikoitus, kannatinalustojen paikoitus pituus- ja korkeussuunnassa oikeiden kannatuksien päälle sekä referenssiosien sijoittaminen.

5.3 iLogic

Parametrisoinnin lisäksi cad-mallin automatisoimisessa käytettiin Autodeskin Inventorissa olevaa iLogic –ohjelmointiympäristöä. iLogic on Inventoriin rakennettu ympäristö, missä voi iLogicin omalla ohjelmointikielellä tuottaa esimerkiksi ehtolauseita, määrityksiä, materiaalinmuutoksia, iterointeja, piirteiden muutoksia ja osien poistamista. Tämä erittäin tehokas työkalu jatkaa mallin automatisoimisessa, siitä mihin parametrisointi ei pysty.

iLogic ohjelmat rakennettiin neljän pääohjelman ympärille. Ohjelmat on kaikki sijoitettu kokoonpanoon, jolloin niiden hallinta on helppoa samasta tilasta. Ohjelmat on eritelty alla olevan kuvan mukaisesti: osien poistaminen, käytön tuen paikoitus, käytön tuen tyyppi ja jäähdyttimen interferenssien tarkastelu.



Kuva 35. iLogic ohjelmat pääkokoonpanossa.

Osien poistamiseen kehitetyssä ohjelmassa käytetään Excelistä tuotuja parametreja. Parametrit kertovat ohjelmalle, kuinka monta kannatusta uunissa on ja ohjelma poistaa sen mukaan tarvittavat kannatukset, kannatinalustat ja näihin liittyvät rajoiteyhtälöt pois käytöstä.

Käytön sijainnin määrittävässä ohjelmassa ohjelma ottaa huomioon käytön sijainnista kertovia parametreja. Näitä parametreja ovat: käytön sijainti kannatuksen yhteydessä sekä sen sijainti kannatuksen ylä- tai alapuolella. Näillä parametreilla määritetään käytön ohessa olevan kannatuksen leveys, kannatuksen paikka ja voimassa olevat rajoiteyhtälöt. Lisäksi poistetaan käytön tuen puolelta huoltotasot käytön ohessa olevalta kannatukselta. Näiden ehtolauseiden tuloksilla ohjelma määrittää lopuksi käytön hammaspyörän sijainnin.

Käytön kannatuksien tyypin valintaohjelmassa ohjelma käyttää Excelistä käyttöjen määrän, pyörimissuunnan ja ala- vai yläpuolisen käytön parametreja. Näiden parametrien mukaan ohjelma poistaa ja lisää oikean kombinaation käytön kannatuksen mallinnukseen. Käytön mallinnuksessa on kolme erilaista kombinaatiota, joista ohjelma valitsee yhden: kahden käytön kannatus, yhden käytön kannatus pyörimissuuntana myötäpäivään ja yhden käytön kannatus pyörimissuuntana vastapäivään.

Jäähdyttimen interferenssiä tarkasteleva ohjelma käyttää kannatuksien lukumäärän ja jäähdyttimen tukemiseen kannatuksen reunaan kiinnitettävän I-palkin pituuden parametreja. I-palkin pituus on mallinnettu niin, että se on suoraan jäähdyttimen ulkoreunan etäisyys kannatuksen reunasta ilman hoitotasoja, jolloin sen parametrin käyttö onnistuu tässä ohjelmassa. Ohjelma määrittelee hoitotason leveyden I-palkin pituudesta alla esitetyn ehtolauseen mukaisesti.

```
If PNro=2 And CoolerSL<1000 Then
    Parameter("Pier2:1", "Lowerplatform") = CoolerSL-300
    If Parameter("Pier2:1", "Lowerplatform")<150 Then
        Feature.IsActive("Pier2:1", "Lowerplatform")=False
        Else
    End If
Else
End If
```

Kuva 36. Jäähdyttimen interferenssin määrittelyn ehtolause kaksitukiselle uunille.

Hoitotason leveys on oletuksena 1000 mm, mutta jos jäähdytin on lähempänä kannatusta kuin oletusasetuksena on, ohjelma kaventaa hoitotasoa. Hoitotasoa kavennetaan jättäen 300 mm väli jäähdyttimeen ja hoitotaso poistetaan, jos sen leveydeksi jäisi alle 150 mm.

6 TULOSTEN TARKASTELU

Tämän diplomityön tavoitteena oli kehittää toimiva suunnittelutyökalu meesauunin kannatuksien joustavaan suunnitteluun. Kehitystyön lähtökohtana toimi vanha AutoLispilla tehty kannatuksien suunnitteluohjelma, joka toimi myös työkaluna tuloksien verifioinnissa.

6.1 Asetetut vaatimukset

Vaatimukset kehitetylle suunnittelutyökalulle asetettiin vanhan AutoLisp ohjelman perusteella seuraavasti:

- pitkälle automatisoitu Excel ja Inventor -pohjainen suunnittelu
- joustavampi arvojen muokkaus, joka mahdollistaa standardeista poikkeavien uunien paremman ja joustavamman suunnittelun
- automaattinen 3D –malli ja valmistuspiirustukset
- olemassa olevan kuormituslaskennan tarkistus ja uusien kuormituslaskentojen lisääminen

Uusi suunnittelutyökalu toteuttaa asetetut vaatimukset hyvin ja on toimiva kokonaisuus kannatuksien suunnittelemiseen. Suunnittelu on pitkälle automatisoitu, eikä standardiuunien suunnittelemiseen tarvitse käyttäjän tehdä muuta kuin syöttää suunnittelun lähtöarvot, joita on 14 kappaletta. Cad-malli päivittyy automaattisesti ja valmistuspiirustuksiin jää käyttäjälle normaalit piirustusten tarkastukset. Suunnittelun joustavuutta on lisätty esimerkiksi siten, että ohjelma sallii nyt erikokoisten kannatinalustojen sijoittamisen eri kannatuksille ja erikokoisten kannatinrenkaiden sijoittamisen uunin vaipalle. Olemassa ollut kuormituslaskenta on tarkistettu ja tarvittavin osin standardisoitu. Lisäksi ohjelmaan lisättiin huomattava määrä kuormitus- ja lujuuslaskentaa.

6.2 Tulosten verifiointi

Kehitetyn suunnittelutyökalun tuloksia verifioitiin vanhan suunnitteluohjelman tuloksiin vertaamalla. Vanhalla suunnitteluohjelmalla suunniteltiin n. 5 kappaletta erikokoisia standardiuunin kannatuksia. Vastaavat standardiuunien kannatukset suunniteltiin uudella

suunnittelutyökalulla ja valmistuspiirustuksia, välituloksia ja kuormitustaulukoita verrattiin keskenään soveltuvin osin. Näiden tarkastusten rajoissa, kun otetaan huomioon tehdyt muutokset, uuden suunnittelutyökalun tuloksia voidaan pitää verifioituina. Lisäksi vertailtiin kuormituslaskennan tuloksia soveltuvin osin.

Kuormituslaskennan tuloksia verifioitiin erikseen FE-analyysilla Ansys Workbench – ohjelmistolla. Ansyksella verifioitiin analyyttisen impulssivoiman laskennan tuloksia ja dynaamisia kuormituskertoimia. Dynaamisia kuormituskertoimia verifioitiin analysoimalla taipuneen uuninvaipan vaikutusta kannatuksien kuormitusvaihteluihin.

6.3 Uuden suunnittelutyökalun hyödyt

Uusi suunnittelutyökalu ja vanha suunnitteluohjelma eroavat toisistaan rakenteeltaan ja käytettävyydeltään huomattavasti. Osa eroavaisuuksista on positiivisia muutoksia ja osa negatiivisia. Alla olevassa taulukossa on havainnollistettu näitä eroavaisuuksia.

Taulukko 5. Uuden suunnittelutyökalun hyödyt ja haitat.

Inventor & Excel vs. Autolisp	
Plussat	Miinukset
- 3D malli käytettävissä visualisointiin ja helpompaan muokkaukseen - standardisoitu ja raportoitu kuormituslaskenta - kuormitus- ja mitoituslaskenta excelissä helposti muokattavissa - tuki uusille ja isommille uunikooille - siirrettävissä helposti muillekin suunnitteluohjelmistoille - enemmän muokattavia parametreja joustavampaan suunnitteluun	- valmistuspiirustukset vaativat usein vähän käsin muokkausta tarkistamisen lisäksi - suunnittelu tapahtuu kahdella ohjelmalla (Excel ja Inventor)

Taulukosta huomataan, että uuden suunnittelutyökalun hyödyt ovat huomattavat. Suunnittelutyökalu on kehitetty ottaen huomioon tulevaisuus, ja se on helposti muokattavissa tarpeiden muuttuessa.

6.4 Jatkokehityskohteet

Diplomityön tuloksena kehitetty suunnittelutyökalu toimii kannatuksien suunnittelussa jo sellaisenaan, mutta jatkokehityskohteita löytyy kuitenkin. Diplomityön ohella toimi uuden kannatinalustan kehitysprojekti. Tässä kehitysprojektissa suunniteltua uutta kannatinalustaa ei ole sisällytetty ohjelmaan kehitysprojektin sen keskeneräisyyden takia. Uusi kannatinalusta tulee lisätä myöhemmässä vaiheessa cad-malliin ja mitoitusohjelmaan oikean mitoituksen toteuttamiseksi.

Suunnittelutyökalun sisältämät standardiuunit ovat AutoLispin standardiuunien tietojen perusteella kehitetty. Päivitettyjen standardiuunien tiedot poikkeavat huomattavasti vanhoista, jolloin tietokannan päivitys tältä osin on tarpeellista ennen suunnittelutyökalun käyttämistä oikeisiin projekteihin. Lisäksi suunnittelutyökaluun sisällytettiin varaukset lukuisille uusille uunikooille, joiden tiedot tulee täydentää tietokantaan, kun tiedot ovat saatavissa.

Pitkän aikavälin tavoitteena olisi saada uunin suunnittelun tiedot yhteen tiedostoon. Tämä ottaen huomioon diplomityössä kehitetty suunnittelutyökalukokonaisuus on kehitetty integroitavaksi koko meesauunia koskevan suunnitteluohjelman yhteyteen. Integroimisessa on syytä ottaa huomioon muuttujien oikeiden sijaintien säilyvyys ohjelmointikoodissa ja cad-mallin parametrien säilyminen käytettävän Excel –tiedoston ensimmäisellä sivulla.

Kuormituslaskennassa tarkennettavia asioita on impulssivoiman verifioimisessa käytetyn FE-analyysin tarkentaminen. Impulssivoiman FE-analyysin malli on tällä hetkellä toteutettu niin, että kannatinrengas putoaa kannatinpyörälle. Realistisemmassa mallissa kannatinrengas pyörisi kannatinpyörässä olevan kuopan ylitse. Tämän tyyppinen analyysi on kuitenkin huomattavasti monimutkaisempi toteuttaa, eikä se ollut diplomityön rajoissa mahdollista. Saaduilla tuloksilla voisi edelleen jalostaa analyyttisen laskennan kaavoja esimerkiksi korjauskertoimilla. Lisäksi impulssivoiman vaikutusta peruspulttien

murtumiseen olisi syytä tutkia, sillä impulssivoimat ovat suuria ja voivat tietyissä tapauksissa murtaa peruspultin.

7 YHTEENVETO

Meesauuni on tärkeä yksittäinen komponentti sellutehtaan kemikaalikierrossa. Se kierrättää selluntuotantoprosessissa käytetyn kalkkioksidin uudelleen käytettäväksi, jolloin kalkkihäviö jää pieneksi. Moderneissa sellutehtaissa on erittäin tärkeää ympäristö- ja taloudellisista syistä kierrättää kemikaaleja, jolloin kemikaalikierron laitteiden luotettavuus korostuu.

Tämä diplomityö tehtiin Andritz Oy:lle. Työn tavoitteena oli siirtää meesauunin kannatuksien suunnittelu AutoCadin AutoLispista Inventor- ja Excel-ympäristöön, tehden samalla suunnitteluprosessista mahdollisimman automaattinen. Inventor- ja Excel-ympäristössä toteutettu suunnittelutyökalu on käyttäjäystävällinen, sillä Inventorin 3D malli helpottaa suunnittelun visualisointia ja muokkausta ja Excel ympäristössä toteutettu laskenta on helppo käyttää. Kannatuksille aiheutuvien kuormitusten laskentaa kehitettiin. Kuormituslaskenta tarkastettiin ja standardisoitiin sekä siihen lisättiin huomattava määrä laskentaa. Kuormituslaskennan standardeina käytettiin muun muassa Eurokoodia ja Uniform Building Codea. Lisäksi kuormituslaskennassa tarkasteltiin poikkeustilanteista aiheutuvia kuormituksia. Näitä olivat uunin taipumisesta aiheutuvat kuormitukset kannatuksille ja kannatinpyörään mahdollisesti syntyvän loven aiheuttamat impulssivoimat. Poikkeustilannetarkastelut toteutettiin Ansyksen FE-analyysilla.

Suunnittelutyökalulla suunnitteltiin esimerkkiuunin kannatukset, ja sitä verrattiin vanhaan AutoLispillä suunniteltuihin kannatuksiin. Suunnittelun lopputuloksena saatiin tarkempia arvoja, parempi muokattavuus, standardisoitu laskenta ja paljon informaatiota, jota ei aiemmin ollut saatavilla, esimerkiksi poikkeustilannetarkastelut. Todettiin, että kehitettyä suunnittelutyökalua voidaan käyttää meesauunin kannatuksien suunnittelemiseen.

Jatkokehityskohteita ohjelman kehittämiseen ovat laskennan tarkentaminen, uuden kannatinalustan suunnittelu ja uusien uunien tietojen lisääminen ohjelmaan sekä vanhojen uunien tietojen päivitys. Laskentaa voidaan tarkentaa vielä poikkeustilannetarkastelujen osalta, esimerkiksi impulssivoimien laskennassa käytetyn FE-analyysin parantamisella. Impulssivoimien vaikutusta peruspulttien murtumiseen on syytä tarkastella myös jatkossa.

LÄHTEET

Airila Mauri et. al., 2003. Koneenosien Suunnittelu. 4. Painos. WSOY Porvoo, 2003. ISBN: 951-0-20172-3.

Eurokoodi 1991-1-4, 2011. Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset Kuormat. Tuulikuormat. 2. Painos. 2011 CEN.

Eurokoodi 1993-1-8, 2005. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. 2005 CEN.

Gere James & Timoshenko Stephen, 1991. Mechanics of Materials. 3. Painos. Chapman & Hall, 1991. ISBN: 0-412-36880-3.

Gullichsen Johan & Carl-Johan Fogelholm, 1999. Chemical Pulping. 16-osainen kirjasarja. Fapet Oy 1999. ISBN: 952-5216-00-4.

Häggblom Ingmar & Ranta Veikko, 1971. Sellun valmistus. Toinen, uusittu painos. 305 s. WSOY, Porvoo, 1971.

Kerttula Kimmo, 2014. Descal Engineering toimitusjohtaja. Puhelinkeskustelu, Kotka.

KnowPulp, 2011. KnowPulp -oppimisympäristö. Versio 10.0. Päivitetty 12/2011 [Viitattu 5/2014]. Proledge Oy, AEL, copyright 2001-2011.

Steuler-KCH, 2012. Refractory systems in one of Europe's largest lime kilns. [verkkodokumentti]. Päivitetty 9.2.2012 [Viitattu 23.5.2014]. Saatavissa: www.steuler.de/en/group/news/latest-press-releases/newsdetails/?tx_ttnews%5Btt_news%5D=104

UBC-97, 1997. Uniform Building Code Vol. 2: Structural Engineering Design Provisions. Intl Code Council, Lslf edition, 1997. ISBN: 978-1884590900

LIITTEET

LIITE I: iLogic ohjelmat (1/4)

Esimerkkinä Thrust Pier Location –ohjelma.

```
'This program calculates thrust pier location according to thrust pier
position number and suppresses platform stairs from thrust pier side.
'
'
'
Parameter("Pier1:1", "ThrustWidth") = 0
'ThrustWidth reset
Parameter("Pier2:1", "ThrustWidth") = 0
Parameter("Pier3:1", "ThrustWidth") = 0
Parameter("Pier4:1", "ThrustWidth") = 0
Parameter("Pier5:1", "ThrustWidth") = 0
Feature.IsActive("Pier1:1", "Lowerplatform") = True
'Stairs and platforms suppression reset
Feature.IsActive("Pier2:1", "Lowerplatform") = True
Feature.IsActive("Pier2:1", "UppersideStairs") = True
Feature.IsActive("Pier2:1", "UpperSupport") = False
Feature.IsActive("Pier2:1", "LowerSupport") = False
If PNro>2 Then
'Reset pier 3 features only if pier 3 exists!
Feature.IsActive("Pier3:1", "Lowerplatform") = True
Feature.IsActive("Pier3:1", "UppersideStairs") = True
Feature.IsActive("Pier3:1", "UpperSupport") = False
Feature.IsActive("Pier3:1", "LowerSupport") = False
Else
End If
If PNro>3 Then
'Reset pier 4 features only if pier 4 exists!
Feature.IsActive("Pier4:1", "Lowerplatform") = True
Feature.IsActive("Pier4:1", "UppersideStairs") = True
Feature.IsActive("Pier4:1", "UpperSupport") = False
Feature.IsActive("Pier4:1", "LowerSupport") = False
Else
End If
If PNro>4 Then
'Reset pier 5 features only if pier 5 exists!
Feature.IsActive("Pier5:1", "Lowerplatform") = True
Feature.IsActive("Pier5:1", "UppersideStairs") = True
Feature.IsActive("Pier5:1", "UpperSupport") = False
Feature.IsActive("Pier5:1", "LowerSupport") = False
Else
End If
' Thrust located at Pier 1
If TPLoc=1 And Tloc=1 Then
'Location of thrust and lower or upper side thrust location. 1=lower,
0=upper.
    Parameter("Pier1:1", "ThrustWidth") = Glength-Flength
'Adding length to thrust support.
    ThrustLocation = P1+((Flength+Parameter("Pier1:1",
"ThrustWidth"))/2)+Tlength/2      'Location of thrust pier.
    Constraint.IsActive("Flush:10") = False
'Suppressing and enabling the right constraints.
    Constraint.IsActive("Mate:9") = True
```

LIITE I: iLogic ohjelmat (2/4)

```
 Component.IsActive("Foundation_Top:1") = False
'Suppressing Top to make room for Guiding Top
        Constraint.IsActive("Mate:35") = False
        Constraint.IsActive("Mate:36") = False
        Constraint.IsActive("Mate:37") = False
    Feature.IsActive("Pier1:1", "Lowerplatform") = False
'Suppressing platform from thrust pier side
'Pinion and Girth Gear Location
' Pier 2
ElseIf TPLoc=2 And Tloc=1 Then
    Parameter("Pier2:1", "ThrustWidth") = Glength-Flength
    ThrustLocation = P2+((Flength+Parameter("Pier2:1",
"ThrustWidth"))/2)+Tlength/2
    Constraint.IsActive("Flush:10") = False
    Constraint.IsActive("Mate:9") = True
    Component.IsActive("Foundation_Top:2") = False
        Constraint.IsActive("Mate:32") = False
        Constraint.IsActive("Mate:33") = False
        Constraint.IsActive("Mate:34") = False
    Feature.IsActive("Pier2:1", "Lowerplatform") = False
    Feature.IsActive("Pier2:1", "LowerSupport") = True
ElseIf     TPLoc=2 And Tloc=0 Then
Parameter("Pier2:1", "ThrustWidth") = Glength-Flength
    ThrustLocation = P2-((Flength+Parameter("Pier2:1",
"ThrustWidth"))/2)-Tlength/2
    Constraint.IsActive("Mate:9") = False
    Constraint.IsActive("Flush:10") = True
    Component.IsActive("Foundation_Top:2") = False
        Constraint.IsActive("Mate:32") = False
        Constraint.IsActive("Mate:33") = False
        Constraint.IsActive("Mate:34") = False
    Feature.IsActive("Pier2:1", "UppersideStairs") = False
    Feature.IsActive("Pier2:1", "UpperSupport") = True
' Pier 3
ElseIf TPLoc=3 And Tloc=1 Then
    Parameter("Pier3:1", "ThrustWidth") = Glength-Flength
    ThrustLocation = P3+((Flength+Parameter("Pier3:1",
"ThrustWidth"))/2)+Tlength/2
    Constraint.IsActive("Flush:10") = False
    Constraint.IsActive("Mate:9") = True
    Component.IsActive("Foundation_Top:3") = False
        Constraint.IsActive("Mate:29") = False
        Constraint.IsActive("Mate:31") = False
        Constraint.IsActive("Mate:30") = False
    Feature.IsActive("Pier3:1", "Lowerplatform") = False
    Feature.IsActive("Pier3:1", "LowerSupport") = True
ElseIf     TPLoc=3 And Tloc=0 Then
    Parameter("Pier3:1", "ThrustWidth") = Glength-Flength
    ThrustLocation = P3-((Flength+Parameter("Pier3:1",
"ThrustWidth"))/2)-Tlength/2
    Constraint.IsActive("Mate:9") = False
    Constraint.IsActive("Flush:10") = True
    Component.IsActive("Foundation_Top:3") = False
        Constraint.IsActive("Mate:29") = False
        Constraint.IsActive("Mate:31") = False
        Constraint.IsActive("Mate:30") = False
    Feature.IsActive("Pier3:1", "UppersideStairs") = False
```

LIITE I: iLogic ohjelmat (3/4)

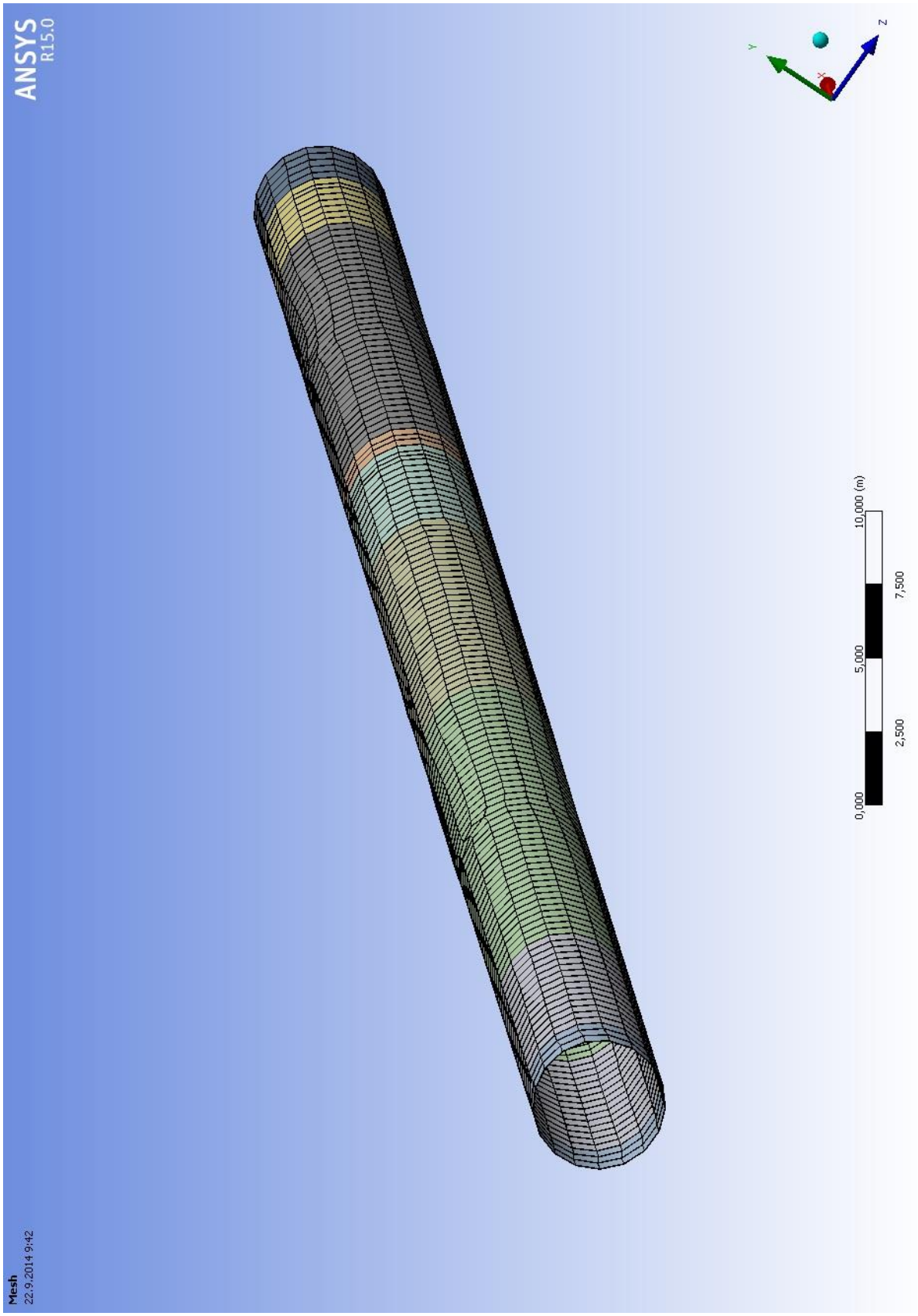
```
    Feature.IsActive("Pier3:1", "UpperSupport") = True
' Pier 4
ElseIf TPLoc=4 And Tloc=1 Then
    Parameter("Pier4:1", "ThrustWidth") = Glength-Flength
    ThrustLocation = P4+((Flength+Parameter("Pier4:1",
"ThrustWidth"))/2)+Tlength/2
    Constraint.IsActive("Flush:10") = False
    Constraint.IsActive("Mate:9") = True
    Component.IsActive("Foundation_Top:4") = False
        Constraint.IsActive("Mate:39") = False
        Constraint.IsActive("Mate:41") = False
        Constraint.IsActive("Mate:40") = False
    Feature.IsActive("Pier4:1", "Lowerplatform") = False
    Feature.IsActive("Pier4:1", "LowerSupport") = True
    Component.IsActive("Foundation_Top:4") = False
ElseIf     TPLoc=4 And Tloc=0 Then
    Parameter("Pier4:1", "ThrustWidth") = Glength-Flength
    ThrustLocation = P4-((Flength+Parameter("Pier4:1",
"ThrustWidth"))/2)-Tlength/2
    Constraint.IsActive("Mate:9") = False
    Constraint.IsActive("Flush:10") = True
    Component.IsActive("Foundation_Top:4") = False
Constraint.IsActive("Mate:39") = False
        Constraint.IsActive("Mate:41") = False
        Constraint.IsActive("Mate:40") = False
    Feature.IsActive("Pier4:1", "UppersideStairs") = False
    Feature.IsActive("Pier4:1", "UpperSupport") = True
' Pier 5
ElseIf TPLoc=5 And Tloc=1 Then
    Parameter("Pier5:1", "ThrustWidth") = Glength-Flength
    ThrustLocation = P5+((Flength+Parameter("Pier5:1",
"ThrustWidth"))/2)+Tlength/2
    Constraint.IsActive("Flush:10") = False
    Constraint.IsActive("Mate:9") = True
    Component.IsActive("Foundation_Top:5") = False
        Constraint.IsActive("Mate:26") = False
        Constraint.IsActive("Mate:27") = False
        Constraint.IsActive("Mate:28") = False
    Feature.IsActive("Pier5:1", "Lowerplatform") = False
    Feature.IsActive("Pier5:1", "LowerSupport") = True
ElseIf     TPLoc=5 And Tloc=0 Then
    Parameter("Pier5:1", "ThrustWidth") = Glength-Flength
    ThrustLocation = P5-((Flength+Parameter("Pier5:1",
"ThrustWidth"))/2)-Tlength/2
    Constraint.IsActive("Mate:9") = False
    Constraint.IsActive("Flush:10") = True
    Component.IsActive("Foundation_Top:5") = False
        Constraint.IsActive("Mate:26") = False
        Constraint.IsActive("Mate:27") = False
        Constraint.IsActive("Mate:28") = False
    Feature.IsActive("Pier5:1", "UppersideStairs") = False
    Feature.IsActive("Pier5:1", "UpperSupport") = True
Else
End If
' Girth Gear, Pinion and "Foundation Top" Location
If Tloc=1 Then
GearLocation=-Tlength/2+EKP
```

LIITE I: iLogic ohjelmat (4/4)

```
GTopLoc=-ThrustLocation + Glength / 2 ul + Tlength / 2 ul
Else
GearLocation=Tlength/2-EKP
GTopLoc=-ThrustLocation - Glength / 2 ul - Tlength / 2 ul
End If
```

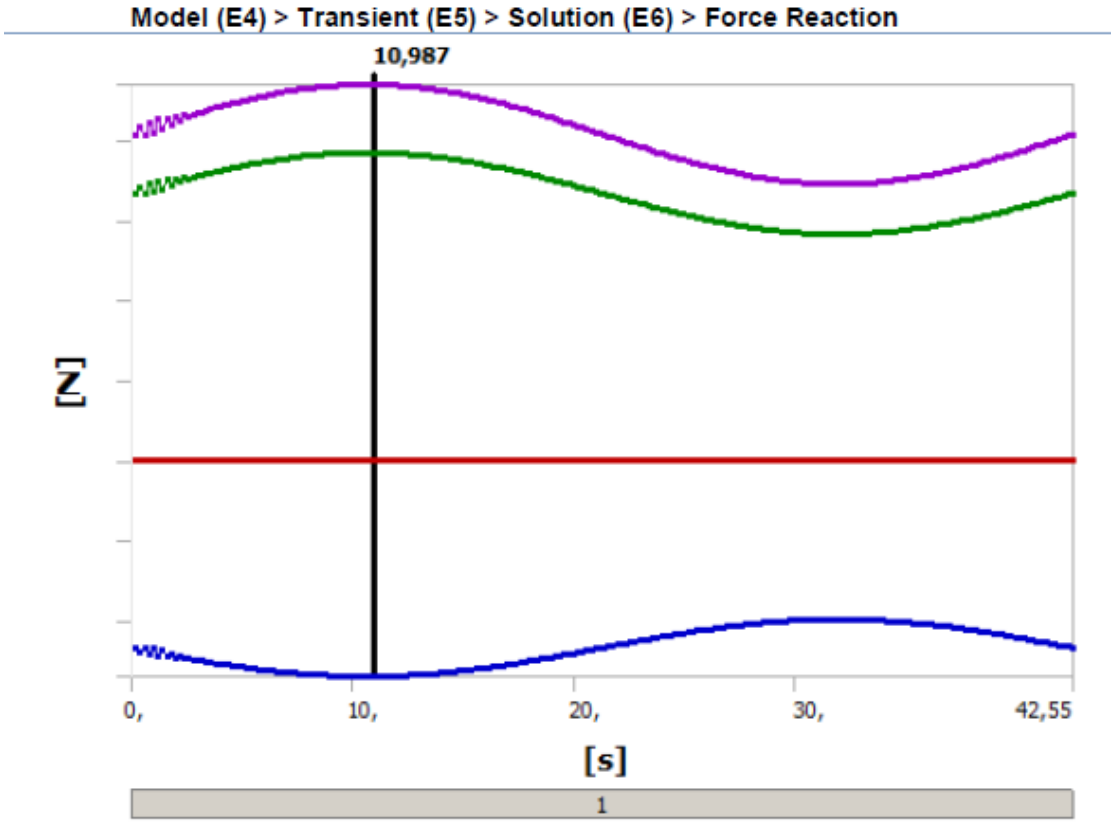
LIITE II: Taipuneen uunin esimerkkitapauksen FE-Analyysi (1/5)

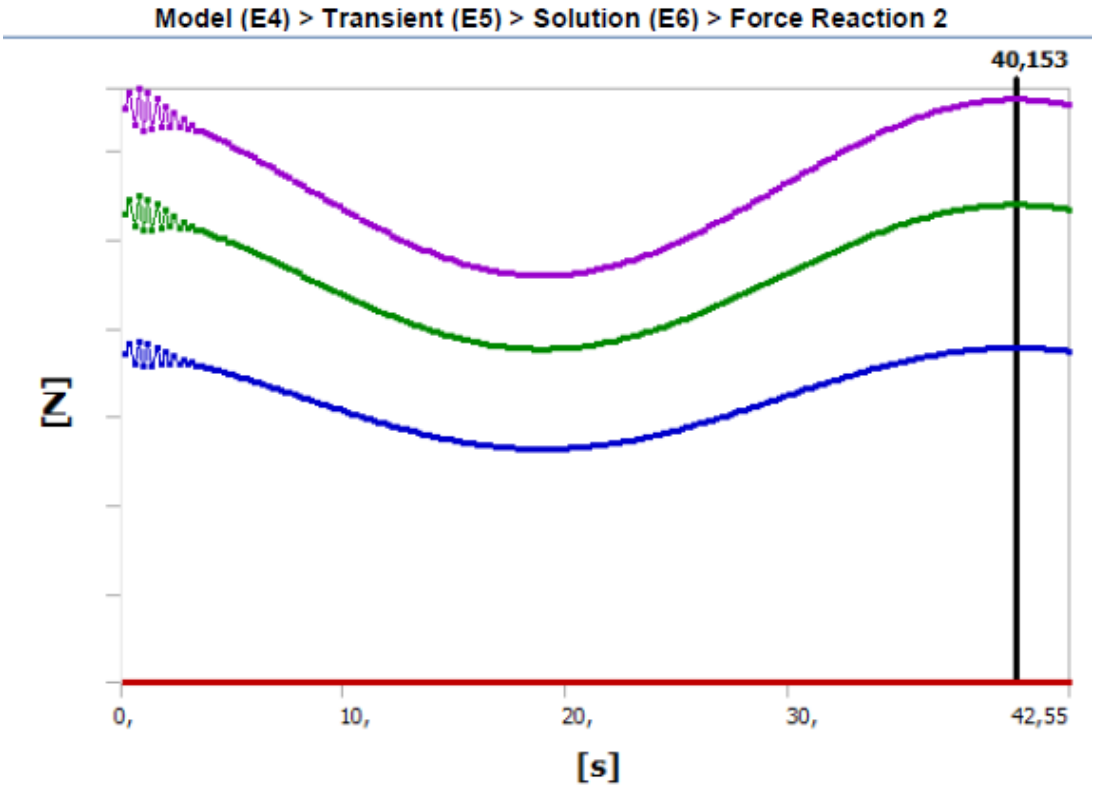
Verkotus



LIITE II. Kuormitusjakaumat, kun uuni pyörii akselinsa ympäri (2/5)

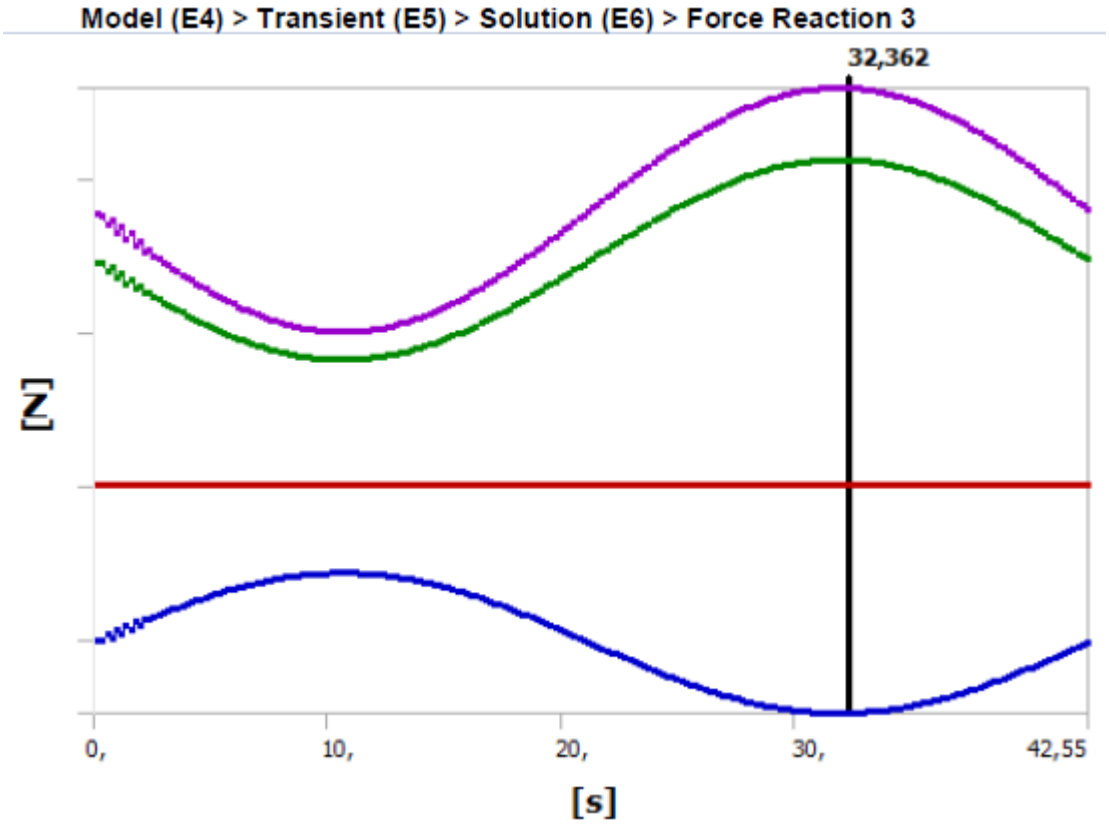
Tuki 1

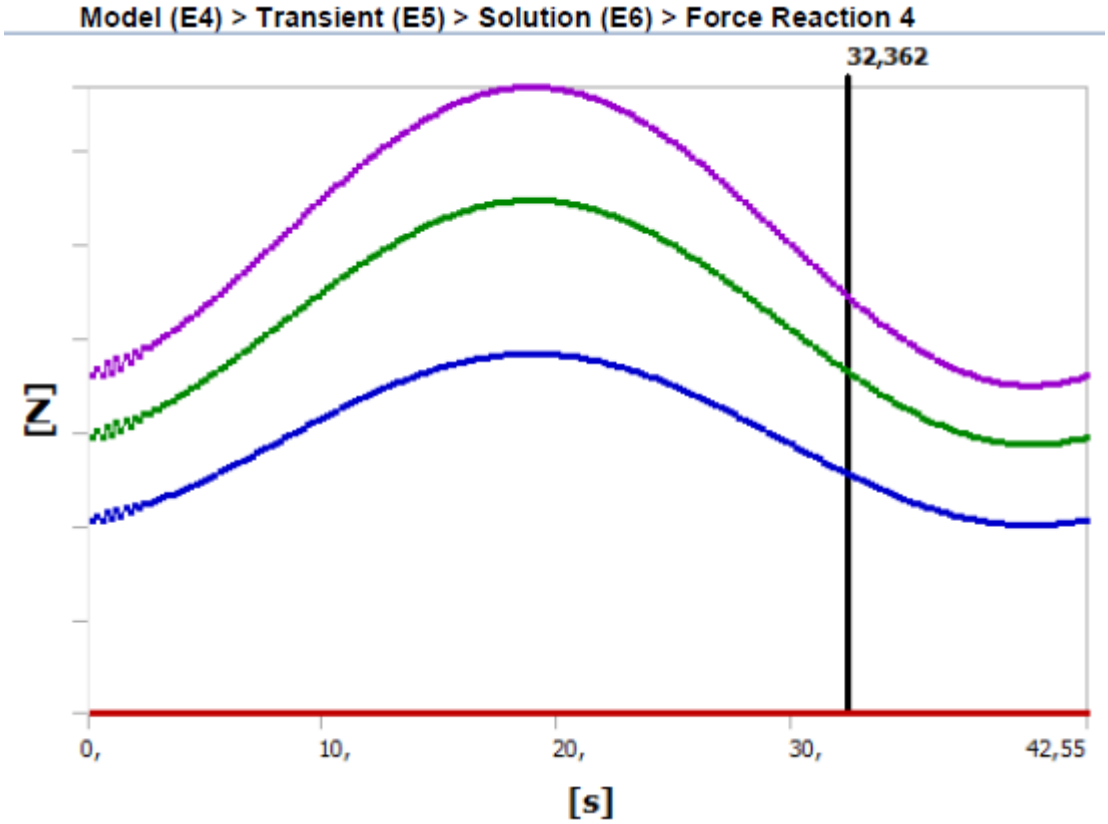




LIITE II. Kuormitusjakaumat (3/5)

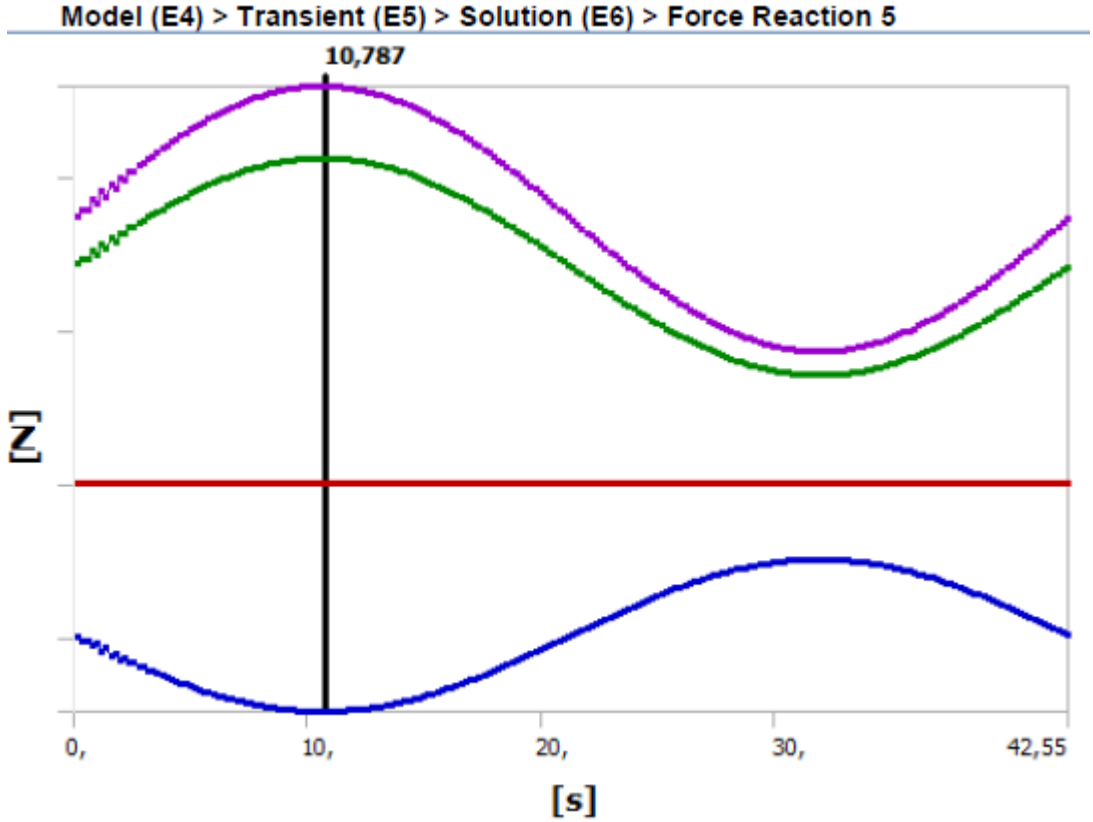
Tuki 2

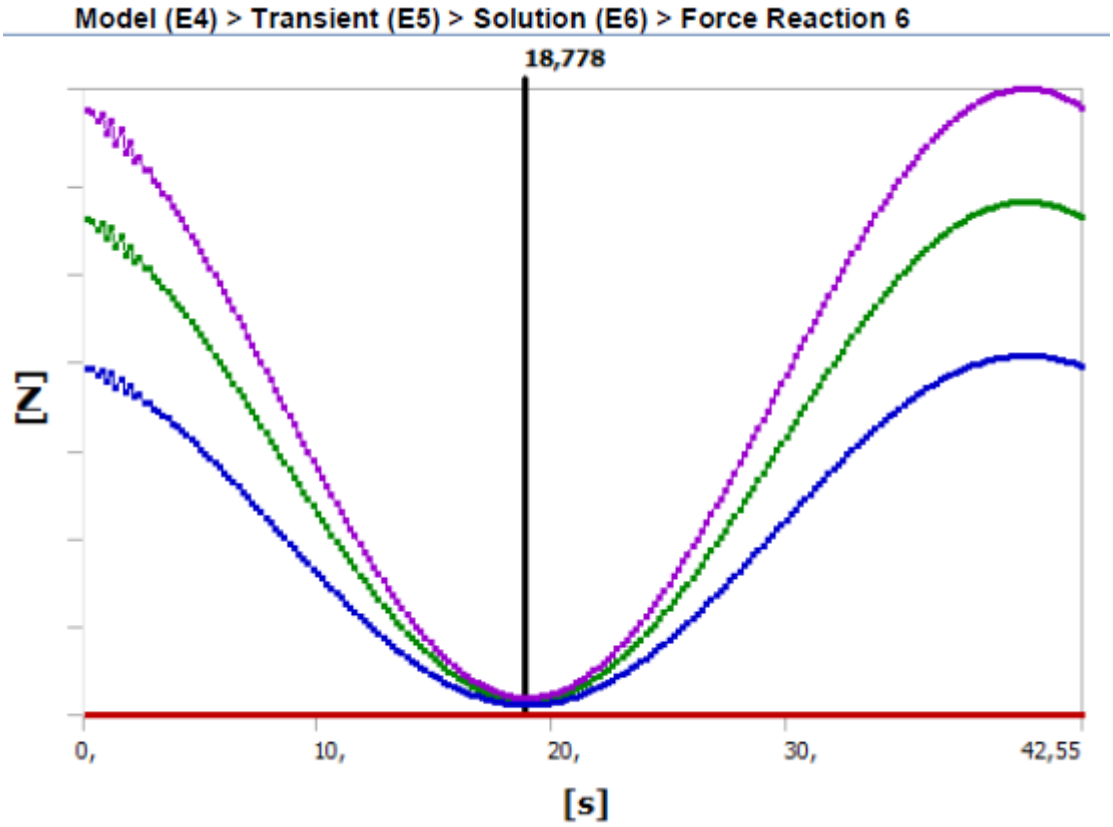




LIITE II. Kuormitusjakaumat (4/5)

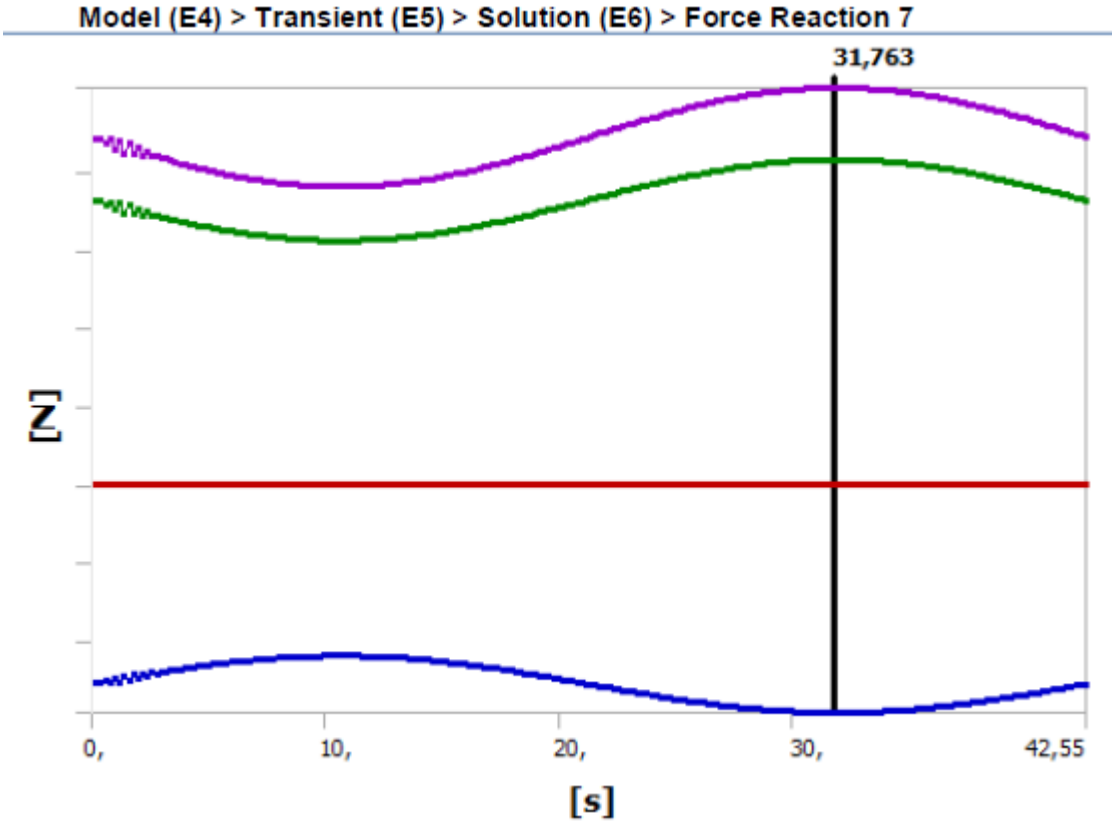
Tuki 3

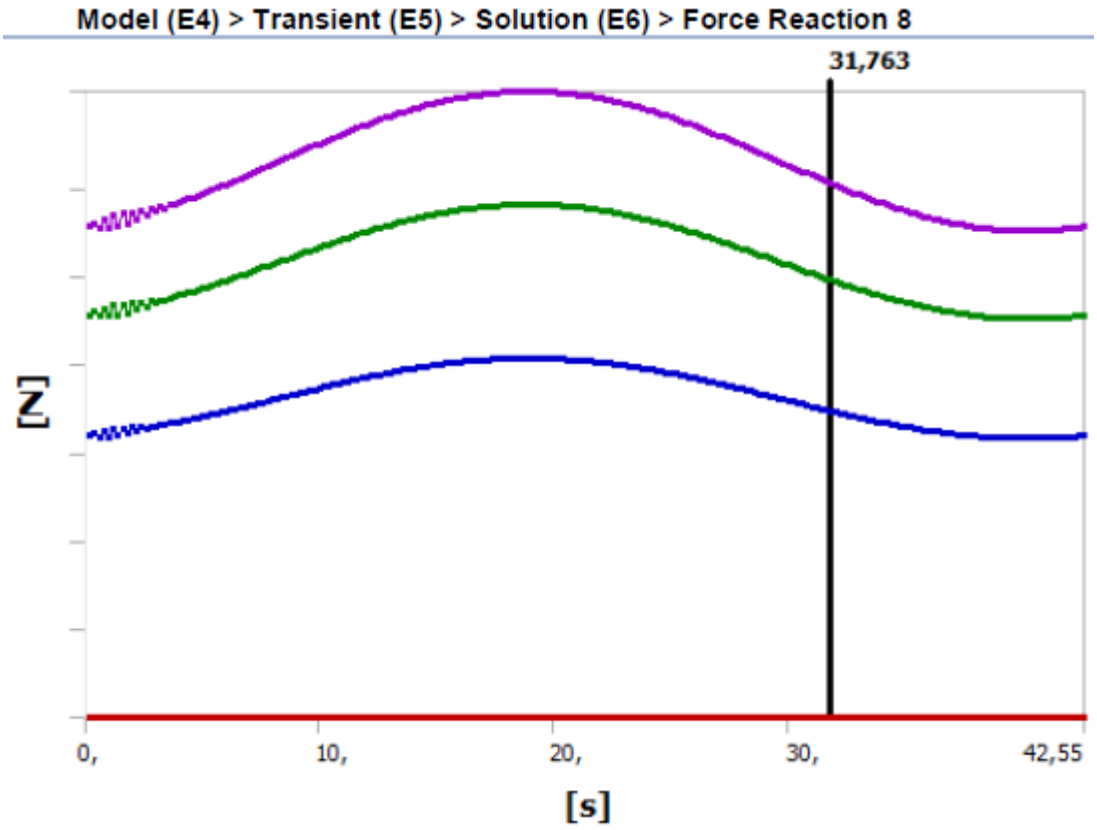




LIITE II. Kuormitusjakaumat (5/5)

Tuki 4





LIITE III: Mitoitusohjelmat (1/4)

Esimerkkinä kannatuksien korkeuden laskentaohjelma kannatuksille 1-3.

```
' PIER ELEVATION

' 1st Step: Calculating height difference between Feed end and Discharge End

KFEH = Sheets("Input").Range("KFEE").Value

KL = Range("KLength").Value

Alfa = Sheets("Input").Range("SlopeRad").Value

 Sheets("Input").Range("KDEE").Value = KFEH - KL * Sin(Alfa)

' 2nd Step: Calculate distance from Feed End to Thrust Pier location. Kiln Centerline
distance to support face is used.

' PIERS 1..3

' Kiln Centerline distance to support face.
dke = (Range("TOD") + Range("SROD1")) * 0.5              ' Distance from kiln centerline
to roller center
Bak0 = dke * Sin(Range("SAngl1") * (PI / 180))          ' Distance between roller centers
bak = WorksheetFunction.RoundDown(Bak0, 0)              ' Rounding the distance between
roller centers

at2 = (180 / PI) * WorksheetFunction.Asin(bak / dke)    ' Calculating new Support Angle

Sheets("Parameters").Range("B29") = at2

Sheets("Parameters").Range("B80") = bak * 2

Height = Range("HBCNTR1") + dke * Cos(at2 * (PI / 180))
Height0 = Height
Heightn = Height + 30                                   ' Clearence added

If Range("HIBeam1") > 399.9 Then
   Heightn = Height + 30 + 3
End If
```

LIITE III: Mitoitusohjelmat (2/4)

```
Height = Height + Range("HIBeam1") + 30 + 150

If Range("HIBeam1") > 399.9 Then
   Height = Height + 3
End If

' When Thrust Pier Location = 1
If Range("TLoc").Value = 1 Then

   ' For Thrust
    Range("Elev1").Value = KFEH - (Sin(Alfa) * Range("SpanElon1") + Height)

   ' 3rd Step: Calculate rest piers from thrust position
    Range("Elev2").Value = Range("Elev1") - Sin(Alfa) * Range("SpanElon2")

      If Range("PNro").Value > 2 Then
      Range("Elev3").Value = Range("Elev1") - Sin(Alfa) * (Range("SpanElon2") +
Range("SpanElon3"))
      End If

         If Range("PNro").Value > 3 Then
         Range("Elev4").Value = Range("Elev1") - Sin(Alfa) * (Range("Span3") +
Range("Span4") + Range("SpanElon2"))
         End If

            If Range("PNro").Value > 4 Then
            Range("Elev5").Value = Range("Elev1") - Sin(Alfa) * (Range("SpanElon3") +
Range("SpanElon4") + Range("SpanElon5") + Range("SpanElon2"))
            End If

End If

' When Thrust Pier Location = 2

If Range("TLoc").Value = 2 Then

   Range("Elev2").Value = KFEH - ((Range("SpanElon2") + Range("SpanElon1")) *
Sin(Alfa) + Height)

    Range("Elev1").Value = Sin(Alfa) * Range("SpanElon2") + Range("Elev2")
    Range("Elev3").Value = Range("Elev2") - Sin(Alfa) * Range("SpanElon3")
```

LIITE III: Mitoitusohjelmat (3/4)

```
    If Range("PNro").Value > 3 Then
    Range("Elev4").Value = Range("Elev2") - Sin(Alfa) * (Range("SpanElon3") +
Range("SpanElon4"))
    End If

      If Range("PNro").Value > 4 Then
      Range("Elev5").Value = Range("Elev2") - Sin(Alfa) * (Range("SpanElon3") +
Range("SpanElon4") + Range("SpanElon5"))
      End If

        If Range("PNro").Value > 5 Then
        Range("Elev6").Value = Range("Elev2") - Sin(Alfa) * (Range("SpanElon3") +
Range("SpanElon4") + Range("SpanElon5") + Range("SpanElon6"))
        End If

          If Range("PNro").Value > 6 Then
          Range("Elev7").Value = Range("Elev2") - Sin(Alfa) * (Range("SpanElon3")
+ Range("SpanElon4") + Range("SpanElon5") + Range("SpanElon6") +
Range("SpanElon7"))
          End If
End If

' When Thrust Pier Location = 3

If Range("TLoc").Value = 3 Then

  Range("Elev3").Value = KFEH - ((Range("SpanElon2") + Range("SpanElon1") +
Range("SpanElon3")) * Sin(Alfa) + Height)

   Range("Elev1").Value = Range("Elev3") + Sin(Alfa) * (Range("SpanElon2") +
Range("SpanElon3"))
   Range("Elev2").Value = Range("Elev3") + Sin(Alfa) * Range("SpanElon3")
   Range("Elev4").Value = Range("Elev3") - Sin(Alfa) * (Range("SpanElon4"))


      If Range("PNro").Value > 4 Then
      Range("Elev5").Value = Range("Elev3") - Sin(Alfa) * (Range("SpanElon4") +
Range("SpanElon5"))
      End If

        If Range("PNro").Value > 5 Then
```

LIITE III: Mitoitusohjelmat (4/4)

```
            Range("Elev6").Value = Range("Elev3") - Sin(Alfa) * (Range("SpanElon4") +
Range("SpanElon5") + Range("SpanElon6"))
            End If

              If Range("PNro").Value > 6 Then
              Range("Elev7").Value = Range("Elev3") - Sin(Alfa) * (Range("SpanElon4")
+ Range("SpanElon5") + Range("SpanElon6") + Range("SpanElon7"))
              End If
End If

' When Thrust Pier Location = 4

If Range("TLoc").Value = 4 Then

   ' Thrust
   Range("Elev4").Value = KFEH - ((Range("SpanElon2") + Range("SpanElon1") +
Range("SpanElon3") + Range("SpanElon4")) * Sin(Alfa) + Height)

   ' Rest piers 1, 2, 3, 5 ...
    Range("Elev1").Value = Range("Elev4") + Sin(Alfa) * (Range("SpanElon2") +
Range("SpanElon3") + Range("SpanElon4"))
    Range("Elev2").Value = Range("Elev4") + Sin(Alfa) * (Range("SpanElon3") +
Range("SpanElon4"))
    Range("Elev3").Value = Range("Elev4") + Sin(Alfa) * (Range("SpanElon4"))
    Range("Elev5").Value = Range("Elev4") - Sin(Alfa) * Range("SpanElon5")

            If Range("PNro").Value > 5 Then
            Range("Elev6").Value = Range("Elev4") - Sin(Alfa) * (Range("SpanElon5") +
Range("SpanElon6"))
            End If

              If Range("PNro").Value > 6 Then
              Range("Elev7").Value = Range("Elev4") - Sin(Alfa) * (Range("SpanElon5")
+ Range("SpanElon6") + Range("SpanElon7"))
              End If
End If
```

LIITE IV: Kuormituslaskentaohjelmat (1/2)

Esimerkkinä tuulivoiman laskentaohjelma while-lauseen sisällä. While-lauseessa lasketaan jokaiselle pilarille jokainen kuormitus erikseen.

```
' Wind Load
' According to SFS EN 1991-1-4

' Shell Areas
If Nro = 1 Then
   a = (Sheets("Input").Range("Span1") + 0.5 * (Sheets("Input").Range("Span2"))) *
Sheets("Input").Range("KDIA")
End If

If Nro > 1 Then
   a = (0.5 * (Sheets("Input").Range("Span2").Offset(0, (-2 + Nro))) + 0.5 *
(Sheets("Input").Range("Span3").Offset(0, (-2 + Nro)))) * Sheets("Input").Range("KDIA")
End If

If Nro = Sheets("Input").Range("PNro") Then
   a = (0.5 * (Sheets("Input").Range("Span2").Offset(0, (-2 + Nro))) +
(Sheets("Input").Range("Span3").Offset(0, (-2 + Nro)))) * Sheets("Input").Range("KDIA")
End If

' Mean Wind Velocity
Dim Cr, Vmz, qp As Double
' Terrain Factor
kr = 0.19 * (0.05 / 0.05) ^ 0.07
' Roughness Factor
Cr = kr * WorksheetFunction.Ln((Sheets("Input").Range("KFEE") / 1000) / 0.05)
' Orograpghy Factor
c0 = 1
' Velocity
Vmz = Cr * c0 * Range("D19")

' Turbulence Intensity
Iv = (kr * Range("D19") * 1) / Vmz

' Peak Velocity Pressure
qp = (1 + 7 * Iv) * 0.5 * 1.25 * Vmz ^ 2
' Forces
' External Forces
we = qp * 0.4
```

LIITE V: Kuormituslaskentaohjelmat (2/2)

```
Fwe = 1 * we * (a / 1000000)

' Friction Force
cfr = 0.01
Fr = cfr * qp * (a / 1000000)

' Vectorial Summation Wind Force
Fw = (Fwe + Fr) / 1000


' Seismic Load with Operation Wind Load. Operation Wind Speed 20 m/s.

' Basic Wind Speed According to Eurocode & Seismic Load According to UBC-97
vwb = 20

Vmzb = Cr * c0 * vwb
Ivb = (kr * vwb * 1) / Vmzb
qpb = (1 + 7 * Ivb) * 0.5 * 1.25 * Vmzb ^ 2

web = qpb * 0.4
Fweb = 1 * web * (a / 1000000)

cfr = 0.01
Frb = cfr * qpb * (a / 1000000)

Fwb = (Fweb + Frb) / 1000
```