

Porrastornin runkorakenteen optimointi

SafeGo Oy

Jarno Blomberg

Opinnäytetyö

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Jarno Blomberg	
Työn nimi Porrastornin runkorakenteen optimointi	
Päiväys 27.4.2012	Sivumäärä/Liitteet 59/10
Ohjaaja(t) päätoiminen tuntiopettaja Tomi Piironen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) SafeGo Oy	
Tiivistelmä <p>Työn tavoitteena oli optimoida porrastornin runkorakenne ja suunnitella sille parametrisesti muunneltava 3D-malli. Optimoinnissa valittiin kestävä rakenne ja rakenteelle sopivat profiilit lujuustarkastelujen avulla. Parametrien ohjaukseen ja runkorakenteen mittojen syöttöön tehtiin Excel-pohjainen käyttöliittymä.</p> <p>Työssä tutustuttiin olemassa olevien porrastornien runkorakenteiden rakenteisiin ja niiden pohjalta luonnosteltiin suunniteltava runkorakenne. Luonnostelun avulla määritettiin, mitä muuttuvia parametrejä ja riippuvuussuhteita tornin rakenteessa on. 3D-mallinnusprosessi aloitettiin parametrien arvojen mukaan liikuteltavien koordinaatistojen ja tasojen tekemisellä. Näiden pohjalta saatiin rakennettua runkorakenteen skeleton-malli, johon lisäämällä pilari- ja palkkiprofiilit saatiin muodostettua lopullinen 3D-malli. Mallintamiseen käytettiin Creo-ohjelmistoa. Parametrisen 3D-mallin tekemisen jälkeen runkorakenteelle tehtiin lujuustarkastelut Eurocode 3:n mukaisilla kuormituksilla. Tarkastelut suoritettiin Creo-ohjelmiston Mechanica-lisäosalla sekä käsin laskemalla. Laskelmien perusteella valittiin sopivat profiilit runkorakenteelle.</p> <p>Työn tuloksena saatiin optimoitu porrastornin runkorakenne ja tälle parametrisesti muuttuva 3D-malli. Excel-käyttöliittymään syötettävien arvojen avulla runkorakenteesta saadaan muodostettua lukuisia eri variaatioita. Toteutettu parametrinen 3D-malli tulee jo sellaisenaan hyödyttämään yrityksen tuotteiden suunnitteluprosesseja ja viemään eteenpäin suunnitteluautomaatioiden kehitystä.</p>	
Avainsanat parametrinen 3D-mallinnus, optimointi, teräsrakenne	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Jarno Blomberg			
Title of Thesis Frame Structure Optimization of a Stair Tower			
Date	April 27, 2012	Pages/Appendices	59/10
Supervisor(s) Mr. Tomi Piironen, Full-time Teacher			
Client Organisation/Partners SafeGo Oy			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this final year project was to design a parametrically variable 3D-model of the frame structure of a stair tower and optimize the frame structure.</p> <p>First, the existing frame structures of stair towers were examined which enabled sketching the designed frame structure. The sketching helped to determine the changing parameters and relations in tower structures. The 3D-modelling process was begun by making coordinates and planes which can be altered by changing the values of the parameters. For this purpose an Excel interface was made. The basis of these coordinates and planes was used to build the skeleton model of the frame structure. Adding column and beam profiles to the skeleton model the final 3D-model was designed. The modelling was made by using the Creo-program. After making the parametrical 3D-model the strength analysis of the frame structure was made by using the Eurocode 3 loads with the program Creo Mechanica and by calculating manually. The results of these calculations show the optimal profiles for this frame structure.</p> <p>The project produced an optimized frame structure of a stair tower and a parametrically variable 3D-model for it. Many different variations of the frame structure can be created by feeding values into the Excel-interface. This parametrical 3D-model will benefit the product design processes and advance the development of the design automation processes in the company.</p>			
<p>Keywords parametrical 3D-modelling, optimization, steel structure</p>			

ALKUSANAT

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on optimoida porrastornin runkorakenne sekä rakentaa kyseiseen runkorakenteeseen parametrisesti muunneltava 3D-malli. Työ on tehty SafeGo Oy:lle.

Haluan kiittää työni ohjaajaa Savonia ammattikorkeakoulun päätoimista tuntiopettajaa Tomi Piirosta työn sujuvasta ohjauksesta ja rakentavasta palautteesta. Kiitokset koko SafeGo Oy:n suunnittelupuolen henkilökunnalle. Suuret kiitokset kuuluvat erityisesti toimeksiantajan puolella ohjaajana toimineelle tuotekehityspäällikkö Jari Mäkiselle. Kiitokset myös suunnittelupäällikkö Jarkko Juntuselle sekä suunnittelijoille Juha Kataiselle ja Kari Tapiolle työhön liittyvästä ohjauksesta ja opastuksesta.

Haluan kiittää myös ystäviäni ja läheisiäni opinnäytetyöhön ja opiskeluun saamasta tuesta.

Kuopiossa 27.4.2012

Jarno Blomberg

SISÄLTÖ

KÄYTETYT TERMIT JA LYHENTEET	8
1 JOHDANTO	11
2 LÄHTÖKOHDAT JA VAIKUTUKSET	12
3 RAJATILAMITOITUKSET JA KUORMITUKSET	13
3.1 Rajatilamitoitukset	13
3.2 Kuormitukset	14
3.2.1 Lumikuormat.....	15
3.2.2 Tuulikuormat.....	16
3.2.3 Eri maiden kuormitusmääräykset.....	19
4 RUNKORAKENTEEN OPTIMOINTI	20
4.1 Teräsrakennesuunnittelu	20
4.2 Mitoitukset.....	22
4.2.1 Jännitystarkastelu.....	23
4.2.2 Puristuskestävyys	23
4.2.3 Taivutuskestävyys	24
4.2.4 Nurjahduskestävyys.....	24
4.2.5 Taipumatarkastelu.....	26
4.2.6 Runkorakenteen siirtymät	27
4.2.7 Ruuviliitokset.....	27
4.2.8 Hitsiliitokset	30
4.2.9 Pohjalevyn mitoitus ja kiinnitys.....	31
4.3 Valmistettavuus	33
4.4 Parametrinen 3D-mallinnus.....	34
4.5 Lujuustarkastelu	34
4.5.1 Käsinlaskumenetelmä	35
4.5.2 FEM-analyysi.....	36
5 TYÖN KULKU.....	37
5.1 Excel-käyttöliittymän laadinta	37
5.2 Parametrinen mallintaminen	39
5.3 Lujuustarkastelu	41
5.3.1 Lähtötiedot	42
5.3.2 Käsinlaskumenetelmä	43
5.3.3 Creo Mechanical -tarkastelu	46
5.4 Piirustukset.....	48

6 TULOKSET	49
6.1 Käyttöliittymä.....	49
6.2 Parametrinen 3D-malli	50
6.3 Lujuustarkastelut.....	53
7 JATKOTOIMENPITEET	56
8 YHTEENVETO	57
LÄHTEET	58

LIITTEET

- Liite 1 Excel-käyttöliittymän ohje (poistettu tilaajan toiveesta)
- Liite 2 Creo Mechanica -tulokset (poistettu tilaajan toiveesta)
- Liite 3 Pystypilarilaskut (poistettu tilaajan toiveesta)
- Liite 4 Diagonaalilaskut (poistettu tilaajan toiveesta)
- Liite 5 Vaakapalkkilaskut (poistettu tilaajan toiveesta)
- Liite 6 Tasokannatinpalkkilaskut (poistettu tilaajan toiveesta)
- Liite 7 Kiinnityslevyn ja ruuvien mitoituslaskut (poistettu tilaajan toiveesta)
- Liite 8 Kiinnityslevyn hitsin mitoituslaskut (poistettu tilaajan toiveesta)
- Liite 9 Pohjalevyn mitoituslaskut (poistettu tilaajan toiveesta)
- Liite 10 Piirustukset (poistettu tilaajan toiveesta)

KÄYTETYT TERMIT JA LYHENTEET

A	pohjalevyn mitta
A	poikkileikkauksen pinta-ala
A	ruuvin poikkileikkauksen pinta-ala
A	tuulen vaikutuspinta-alojen summa
a	hitsin a-mitta
A_c	tuulen vaikutuspinnan ulkoreunojen rajaama pinta-ala
A_{net}	vaikuttava poikkipinta-ala
A_{ref}	tuulikuorman vaikutusala
B	pohjalevyn mitta
b	pilarin mitta
b	tuulen vaikutuspinnan leveys
C_e	tuulensuojaisuskerroin
c_f	rakenteen voimakerroin
$c_{f,0}$	ristikkorakenteen voimakerroin ilman päätevaikutusta
$c_s c_d$	rakennekerroin
C_t	lämpökerroin
d	materiaalin paksuus
d	reiän halkaisija
d_{ruuvi}	ruuvin halkaisija
E	materiaalin kimmokerroin
e	reunaetäisyyden arvo
F_d	laskentakuorma murto- ja käyttörajatilassa
f_d	perusaineen alempi myötöraja
F_{Rh}	reunapuristus- ja repeytymiskestävyys
F_{Rt}	ruuvin varren suuntainen vetokestävyys
F_{Rv}	ruuvin leikkauskestävyys
F_t	vetovoima
f_u	vetomurtolujuuden nimellisarvo
F_v	leikkausvoima
f_{vwd}	leikkauslujuuden mitoitusarvo
F_w	kokonaistuulikuorma
F_{wRd}	hitsin kestävyuden mitoitusarvo
f_y	materiaalin myötöraja
f_y	ruuvin ainelujuus
g	vaikuttava pysyvä kuorma rajatilamitoituksessa

g_{k1}	muuttuva kuorma rajatilamitoituksessa (ei lumi- tai tuulikuorma)
g_{k2}	vaikuttava luonnonkuorma rajatilamitoituksessa (lumi- tai tuulikuorma)
g_{ki}	muu muuttuva kuorma rajatilamitoituksessa
I	profiilin jäyhyysmomentti
k_2	laskettava kerroin
k_3	ruuvin lujuusluokasta määräytyvä vakio
L	palkin pituus
l	rakenneosan pituus tuulikuorman tapauksessa
l	hitsin pituus
L_n	nurjahduspituus
M	momentti
M_{Ed}	hitsiin vaikuttava momentti
M_{max}	taivutusmomentin maksimiarvo
M_{taiv}, M_R	taivutuskestävyys
N	kohtisuoraan vaikuttava voima
$N_{c,Rd}$	puristuskestävyys
N_{cr}	kriittinen voima nurjahdusmuodossa
N_{Ed}	hitsin akselia kohtisuoraan vaikuttava voima
N_{Rd}	nurjahduskestävyys
N_{Rt}	perusaineen vetokestävyys
p	keskiöväli
q, q_k	tasainen kuorma
Q_k	pistekuorma
$q_p(z_e)$	puuskannopeuspaine nopeuspaineen korkeudella z_e
R_{El}	materiaalin myötöraja
s	lumikuorma
s_k	maanpinnan lumikuorman ominaisarvo
t	levyn paksuus
V	leikkausvoima
v	palkin maksimitaipuma
V_{Ed}	hitsin akselin suuntaisten voimien arvo
W	taivutusvastus
W_p	plastisoituneen poikkileikkauksen taivutusvastus
z_e	nopeuspaineen korkeus
α	katon kaltevuuskerroin (lumikuorma)

α	osavarmuustekijä (nurjahduskestävyys)
β_w	korrelaatiokerroin
β_w	teraslainen lujuuskerroin
γ_{M0}	osavarmuusluku
γ_{M1}	osavarmuusluku
γ_{M2}	osavarmuusluku
γ_m	aineosavarmuusluku
η	leikkauspinta-alaan liittyvä tekijä
$\bar{\lambda}$	muunnettu hoikkuus
μ_i	lumikuorman muotokerroin
σ_M	tasokannatinpalkkien jännitys
σ_N	profiilien jännitys
σ_{sall}	sallittu jännitys
σ	hisiin vaikuttava normaalijännitys
τ	hisiin vaikuttava leikkausjännitys
φ	eheyssuhde
φ	pienennystekijän χ määrittämisessä tarvittava muuttuja
χ	pienennystekijä
ψ_l	päätevaikutusala

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on suoran portaan porrastornin runkorakenteen optimointi sekä parametrinen 3D-mallin suunnittelu. Parametrinen malli suunnitellaan Creo-ohjelmalla. Kyseistä parametrista 3D-mallia voidaan muunnella työssä tehtävällä Excel-käyttöliittymällä. Työssä tutkitaan olemassa olevaa suoran portaan porrastornin kantavaa runkorakennetta sekä pyritään kehittämään käyttöön otettavaa 3D-suunnittelujärjestelmää.

Työ tehdään iisalmelaiselle SafeGo Oy:lle. SafeGo Oy on vuonna 1979 perustettu kulkuratkaisutuotteita valmistava yritys. Yrityksellä on tytäryhtiöitä Virossa, Ruotsissa sekä Norjassa. Yritys tunnettiin Finnritilä-nimellä vuoteen 2011 asti. Tuotteet suunnitellaan asiakastarpeiden mukaisesti eli jokainen tuote valmistetaan mittatilaustyönä. Asiakkaita ovat erilaiset kone- ja laitevalmistajat, prosessiteollisuus, rakennusliikkeet sekä suunnittelutoimistot.

Yrityksessä on käynnissä aktiivinen tuotteiden ja suunnittelujärjestelmien kehitysvaihe. SafeGo on siirtymässä 2D-suunnitteluohjelmasta 3D-suunnitteluohjelman käyttöön. Opinnäytetyö tulee tukemaan tätä siirtymävaihetta sekä kehittämään yrityksen tuotteiden automatisoitua suunnittelujärjestelmää.

2 LÄHTÖKOHDAT JA VAIKUTUKSET

Porrastornin runkorakenteen tehtävänä on kannatella suorista portaista koostuvaa porrastornia. Runkorakenteesta tehdään optimoitu parametrinen 3D-malli, joka mahdollistaa mallin helpon muuteltavuuden ilman, että rakenteen geometria tuhoutuu. Parametrisella mallilla tarkoitetaan mallia, joka koostuu helposti muunneltavista parametreista. Optimoinnilla pyritään määrittämään porrastornin runkorakenteen rakenne sekä käytettävät profiilit siten, että ne kestävät sopivalla varmuudella vaaditut kuormitukset.

Runkorakenteeseen vaikuttavat portaan rakenteesta ja materiaalista johtuvat kuormat sekä ulkoiset kuormitukset, kuten tuuli- ja lumikuormat. Runkorakennetta suunniteltaessa on otettava huomioon teräsrakennemääräykset sekä rakenteeseen vaikuttavat Eurocoden mukaiset kuormitustapaukset.

Runkorakenteen pystypilareiden määrä voi todellisuudessa vaihdella kahden ja kahdeksan välillä mutta opinnäytetyössä tarkastellaan vain nelipilarista rakennetta. Porrastornin runkorakenteet voivat olla joko itsestään seisovia tai seinästä tuettuja. Työssä suunniteltava runkorakenne on seinästä tuettu.

Opinnäytetyö tulee hyödyttämään yrityksen eri osa-alueita. 3D-malli vaikuttaa näkyvimmin suunnitteluprosessin toimintaan. Suunnittelutyö helpottuu ja nopeutuu parametrisen mallin avulla. Runkorakenteen mallin vuoksi myös eri suunnittelijoiden tekemät tuotokset tulevat olemaan yhteneväisiä keskenään. Runkorakenteen 3D-malli tukee myyntityötä merkittävästi. Mallin avulla myyjät voivat näyttää asiakkaalle kauppaa tehdessään, millainen asiakkaan tilaamasta porrastornista tulee. Työssä pyritään ottamaan huomioon myös valmistettavuus. Porrastornin runkorakenne suunnitellaan siten, että osien valmistus on helppoa ja työvaiheita on mahdollisimman vähän. Yritys hyötyy tästä opinnäytetyöstä runkorakenteen läpimenoajan nopeutumisella. Lyhyemmällä läpimenoajalla voidaan nopeuttaa toimitusaikaa, mikä taas lisää kilpailukykyä sekä asiakastytyväisyyttä huomattavasti. Säästöjä tulee myös eri työvaiheiden vähentymisestä sekä optimoinnin mahdollistamista materiaalisäästöistä.

3 RAJATILAMITOITUKSET JA KUORMITUKSET

Porrastornien mitoitukset tulee tehdä Eurocoden sekä muiden rakennusmääräysten mukaisilla kuormituksilla, jotta rakenteelle saadaan kansainvälisten suositusten mukainen varmuus ja kestävyys. Laskentakuormat mitoitetaan rajatilamitoituksen ja käyttörajamitoituksen mukaisesti. Torneihin vaikuttavat hyötykuormat, porrastornin runkorakenteen ja porrarakenteen omat painot sekä lumi- ja tuulikuormat. Vaikuttavimpina pystykuormina pidetään hyötykuormia sekä rakenteiden omia massoja. Pystykuormiin vaikuttavat myös lumikuormat. Tuulikuormat aiheuttaisivat pystykuormitusta, mikäli rakenteessa olisi kattorakenne. Vaakakuormat muodostuvat tuulikuormasta sekä portaan kaiteisiin kohdistuvasta hyötykuormasta. Molempien merkitys on melko vähäinen. Tuulikuorman vaikutus olisi suuri, mikäli porrastorni olisi verhoiltu.

3.1 Rajatilamitoitukset

Rakennetta ja materiaalia valittaessa on suoritettava rajatilamitoituksia. Rajatilamitoitukset takaavat rakenteelle riittävän kestävyuden, käyttökelpoisuuden sekä säilyvyyden. Rajatiloista tarkastellaan murtorajatilaa, joka määrittää rakenteen suurimman kestävyuden, sekä käyttörajatilaa, joka on rajana käyttökelpoisuusvaatimuksille. Suunnittelutyöllä on varmistettava, ettei mitään rajatilaa ylitetä. (Teräsrakenneyhdistys ry 2010, 33.)

Teräsrakenteen murtorajatilat ilmenevät aineen murtumisena, stabiiliuden menetyksenä, liian suurina siirtyminä tai rakenteen kaatumisena. Portaat ja porrastornit lasketaan primäärirakenteiksi. Primäärirakenteiden laskentakuormat F_d murtorajatiloissa lasketaan kaavalla 3.1 (Kinnunen, Saarinen, Tiira, Ulvinen & Väänänen 2001, 24 - 25):

$$F_d = 1,2g + 1,6(g_{k1} + g_{k2} + \sum_{i=3}^n 0,5g_{ki}). \quad (3.1)$$

Käyttöraajatiilojen ylitykset ilmenevät taipumina, värähtelyinä sekä pysyvinä muodonmuutoksina. Käyttöraajatiilojen laskentakuormitus F_d lasketaan kaavalla 3.2 (Kinnunen ym. 2001, 24 - 25):

$$F_d = g + g_{k1} + g_{k2} + \sum_{i=3}^n 0,5g_{ki}. \quad (3.2)$$

Kaavoissa 3.1 ja 3.2 F_d on laskentakuormitus ja g kuvaa vaikuttavaa pysyvää kuormaa. g_{k1} on muuttuva kuorma, joka ei kuitenkaan ole lumi- tai tuulikuorma. Kaavan g_{k2} on vaikuttava luonnonkuorma, esimerkiksi lumi- tai tuulikuorma, ja g_{ki} on muu muuttuva kuorma. (Kinnunen ym. 2001, 25.)

3.2 Kuormitukset

Porrastornin runkorakenteen kuormitustapauksia tarkastellaan pääasiassa Eurocode 1 -määräysten mukaisesti. Kuormitukset luokitellaan rakenteen omaan painoon, hyötykuormaan sekä muihin muuttuviin kuormiin. Rakenteen oma paino lasketaan yleensä nimellismittojen ja tilavuuspainojen perusteella. Omiin painoihin kuuluvat kantavat ja ei-kantavat rakennusosat. Hyötykuormat sisältävät rakenteen normaalin henkilökäytön, siirrettävät kohteet, ajoneuvot sekä odotettavissa olevat harvinaiset tapahtumat. Työssä tehtävä Excel-käyttöliittymä laskee kuormat automaattisesti. (SFS-EN 1991-1-1 2002, 18 – 20.)

Kuormitustapaukset tulee mitoittaa taulukon 1 tasaisen kuorman q_k sekä pistekuorman Q_k mukaisesti. Taulukko antaa tasaiselle kuormalle arvon kilonewtoneina neliometriä kohti ja pistekuormalle kilonewtoneina. Taulukon luokka A pitää sisällään asuin- ja majoitustilat, luokka B puolestaan sisältää toimistotilat, luokan C tilat ovat tiloja, joihin ihmiset voivat kokoontua. Luokan D tilat ovat myymälätiloja. Portaat kuuluvat taulukon mukaan A-luokkaan. Portaiden tasaisen kuorman ja pistekuorman mitoittavina arvoina voidaan käyttää taulukon suurempia arvoja portaan henkilömäärien ja mittojen vuoksi. (SFS-EN 1991-1-1 2002, 30 – 32.)

TAULUKKO 1. Rakennusten hyötykuormat (SFS-EN 1991-1-1 2002, 30)

Kuormitettujen tilojen luokat	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
Luokka A		
— Väliohjat	1,5 ... <u>2,0</u>	<u>2,0</u> ... 3,0
— Portaat	<u>2,0</u> ... 4,0	<u>2,0</u> ... 4,0
— Parvekkeet	<u>2,5</u> ... 4,0	<u>2,0</u> ... 3,0
Luokka B	2,0 ... <u>3,0</u>	1,5 ... <u>4,5</u>
Luokka C		
— C1	2,0 ... <u>3,0</u>	3,0 ... <u>4,0</u>
— C2	3,0 ... <u>4,0</u>	2,5 ... 7,0 (<u>4,0</u>)
— C3	3,0 ... <u>5,0</u>	<u>4,0</u> ... 7,0
— C4	4,5 ... <u>5,0</u>	3,5 ... <u>7,0</u>
— C5	<u>5,0</u> ... 7,5	3,5 ... <u>4,5</u>
Luokka D		
— D1	<u>4,0</u> ... 5,0	3,5 ... 7,0 (<u>4,0</u>)
— D2	4,0 ... <u>5,0</u>	3,5 ... <u>7,0</u>

Portaita mitoitettaessa tulee ottaa huomioon kaiteeseen aiheutuvat vaakakuormat. Vaikuttava voima määritetään viivakuormana. Porrastuotteiden kuuluessa taulukon 1 mukaisesti luokkaan A saa viivakuorma arvon väliltä $0,2 - 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$. Eurocode 1:n mukaan vaikuttavan viivakuorman suositusarvo on $0,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$. (SFS-EN 1991-1-1 2002, 44.)

3.2.1 Lumikuormat

Kuormituksen tarkastelussa tulee ottaa huomioon lumi- ja tuulikuormat. Lumikuormitukset s määritetään kaavalla 3.3 normaaleissa olosuhteissa

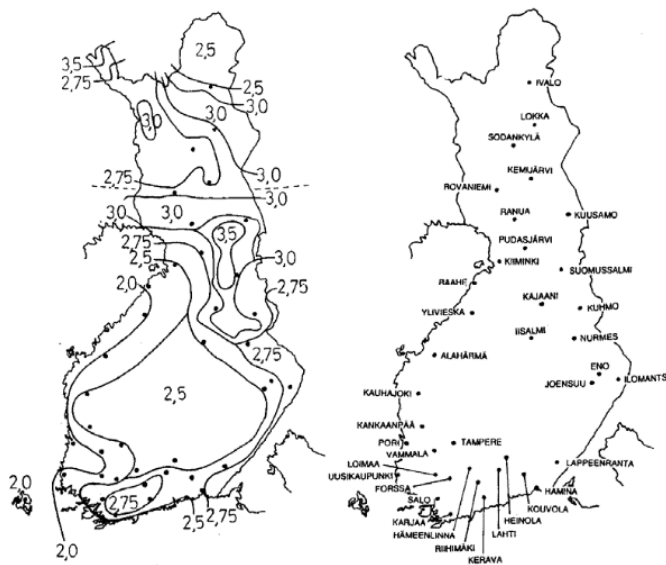
$$s = \mu_i C_e C_t s_k, \quad (3.3)$$

jossa μ_i on lumikuorman muotokerroin, C_e on tuulensuojaisuuskerroin, C_t on lämpökerroin ja s_k on maanpinnan lumikuorman ominaisarvo. Taulukko 2 esittää lumikuorman muotokertoimia μ_i . (SFS-EN 1991-1-3 2003, 26 – 28.)

TAULUKKO 2. Lumikuorman muotokertoimet μ_i (SFS-EN 1991-1-3 2003, 30)

Katon kaltevuuskulma α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha > 60^\circ$
μ_i	0,8	$0,8(60 - \alpha)/30$	0,0

Tuulensuojaisuuskertoimet C_e riippuvat maastotyyppistä. Tuulisessa maastossa, jossa on esteetön ja avoin alue, voidaan käyttää tuulensuojaisuuskerrointa 0,8. Normaalin maaston olosuhteissa voidaan käyttää kerrointa 1,0. Normaalisissa maastossa tuuli ei maaston tai rakennusten vuoksi poista lunta kohteesta. Suojaisessa maastossa kertoimeksi suositellaan arvoa 1,2. Lämpökerroin C_t saa porrastornin tapauksessa arvon 1,0. Maanpinnan lumikuorman ominaisarvo s_k saadaan kuviosta 1 portaan loppusijoituksen perusteella. (SFS-EN 1991-1-3 2003, 28.)



KUVIO 1. Maanpinnan lumikuorman ominaisarvo s_k (Suomen rakennusinsinöörien liitto 2010, 112)

3.2.2 Tuulikuomat

Tuulikuomat määräytyvät pääasiassa ympäröivän maaston, tuulen puuskaisuuden ja rakennusten korkeuden mukaan. Kokonaistuulikuorma F_w voidaan laskea kaavalla 3.4 seuraavasti (SFS-EN 1991-1-4 2005, 44):

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \cdot \quad (3.4)$$

Kaavassa 3.4 $c_s c_d$ on rakennekerroin, jonka tarkoituksena on ottaa huomioon tuulikuormiin syntyvä vaikutus. Rakennekertoimen vaihteluväli on 0,85 - 1,1, mutta porrastornin ollessa kyseessä voidaan käyttää arvoa 1,0. (SFS-EN 1991-1-4 2005, 48.)

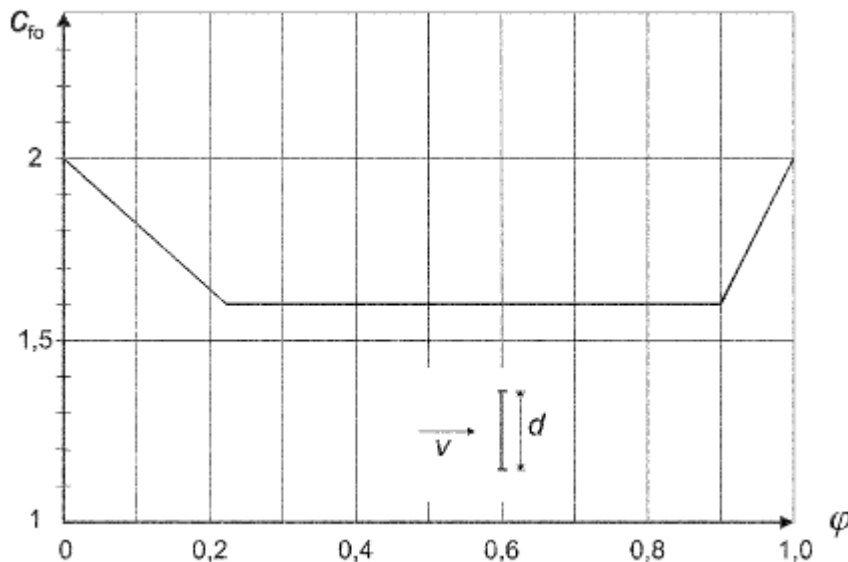
Kaavan 3.4 c_f tarkoittaa rakenteen voimakerrointa. Rakenteen voimakerron kertoo tuulen kokonaisvaikutuksen tarkasteltavaan rakenteeseen. Voimakerron c_f ratkaistaan kaavalla 3.5:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_l, \quad (3.5)$$

jossa $c_{f,0}$ on ristikkorakenteen voimakerron ilman päätevaikutusta. $c_{f,0}$ esitetään kuviossa 2 eheysuhteen φ funktiona. ψ_l päätevaikutusalalle voidaan ristikkorakenteessa käyttää arvoa 1. Eheysuuhde φ ratkaistaan kaavalla 3.6:

$$\varphi = \frac{A}{A_c}, \quad (3.6)$$

jossa A on tuulen vaikutuspinnan pilareiden, palkkien sekä muiden projektiopinta-alojen summa. Kaavassa 3.6 A_c on tuulen vaikutuspinnan ulkoreunojen rajaama pinta-ala. Ristikkorakenteissa voidaan eheysuhteelle käyttää arvoa 0,3, jolloin $c_{f,0}$ saa arvon 1,6. (SFS-EN 1991-1-4 2005, 130 – 134.)



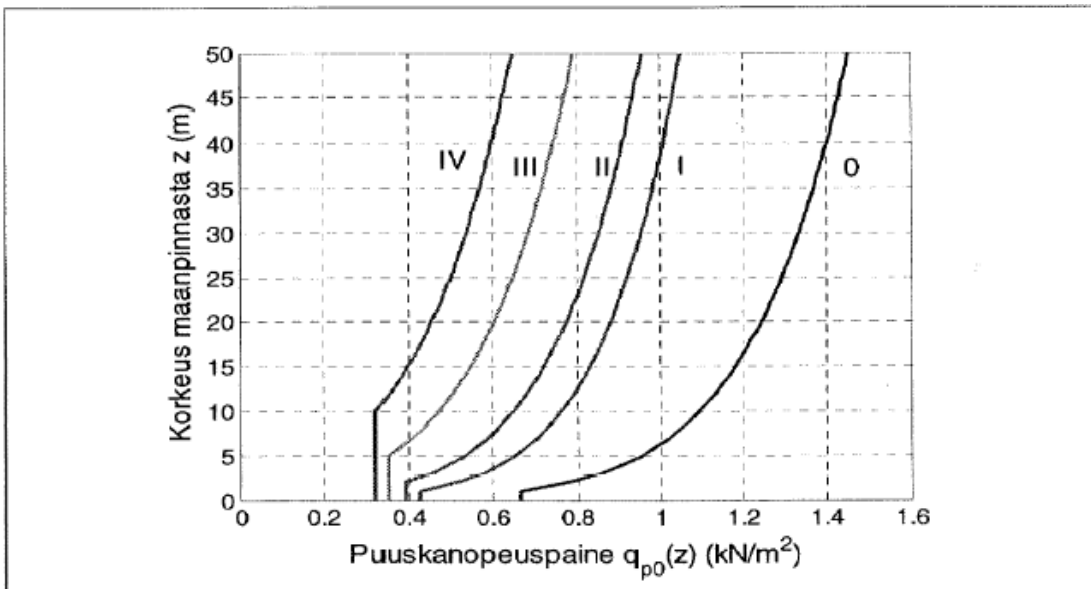
KUVIO 2. Rakenteen voimakerron c_f (SFS-EN 1991-1-4 2005, 132)

$q_p(z_e)$ on kaavassa puuskanopeuspaine nopeuspaine korkeudella z_e . Puuskanopeuspaine on esitetty korkeuden funktiona kuviossa 3 eri maastoluokkien (taulukko 3) mukaan. Maastoluokat on jaettu luokkiin 0 – IV, joissa maastoluokka 0 on avoin tila (esimerkiksi meri) ja maastoluokka IV on suojaisa tila (esimerkiksi

kaupungin keskusta). Porrastornit sijaitsevat usein tehdasalueella tai asuinalueella. Tästä syystä maastoluokka on useimmiten IV. (SFS-EN 1991-1-4 2005, 36 – 40.)

TAULUKKO 3. Maastoluokat (SFS-EN 1991-1-4 2005, 36)

Maastoluokka
0 Avomeri tai merelle avoin rannikko
I Järvet tai tasanko, jolla on enintään vähäistä kasvillisuutta eikä tuuliesteitä
II Alue, jolla on matalaa heinää tai siihen verrattavaa kasvillisuutta ja erillisiä esteitä (puita, rakennuksia), joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus
III Alueet, joilla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillisiä tuuliesteitä, joiden keskinäinen etäisyys on enintään 20 kertaa esteen korkeus (kuten kylät, esikaupunkialueet, pysyvä metsä)
IV Alueet, joiden pinta-alasta vähintään 15 % on rakennusten peitossa ja niiden keskimääräinen korkeus ylittää 15 m



KUVIO 3. Tuulen puuskanopeuspaine $q_p(z_e)$ korkeuden funktiona (Kuviossa puuskannopeuspaine $q_{p0}(z)$) (Suomen rakennusinsinöörien liitto 2010, 132)

Tuulikuorman vaikutusala A_{ref} lasketaan kaavalla 3.7 seuraavasti:

$$A_{ref} = l \cdot b, \quad (3.7)$$

jossa l on tarkasteltavan rakenneosan pituus ja b on tuulen vaikuttavan pinnan leveys. Verhoilemattoman porrastornin vaikuttava pinta-ala on melko pieni. Kokemusperäinen tieto osoittaa, että vaikuttava pinta-ala on korkeintaan 30 % porrastornin kokonaisalasta. (SFS-EN 1991-1-4 2005, 114.)

3.2.3 Eri maiden kuormitusmääräykset

SafeGo Oy:n päämarkkina-alueita ovat kotimaan markkinoiden lisäksi Ruotsi, Norja, Saksa ja Venäjä. Norjan kuormitusmääräyksiä (3491-1-1998) ja Saksan DIN-standardeja tarkasteltaessa huomataan määräysten olevan Eurocode 1 määräysten mukaisia.

Ruotsissa rakenteiden mitoituksia tehdään BKR-ohjeen mukaisesti. BKR (Boverkets konstruktions regler) on Ruotsin rakennusvirasto ja se määrittelee henkilökuormat taulukon 4 mukaisesti. (Katainen 2010, 24.)

TAULUKKO 4. Henkilökuormat BFS 1998:39:n mukaan (Boverkets 1999, 39 - 41)

	Jakautunut kuorma (kN/m ²) Pysyvät kuormat	Jakautunut kuormat (kN/m ²) Vapaat kuormat	Pistekuorma (kN)
1. Peruskuorma	0,5	1,5	1,5
2. Kokouskuorma	1	1,5	3
3. Ruuhkakuorma	0	4	3
4. Raskaskuorma	0	5	3
5. Erikoiskuormat	0 - 0,5	2 - 4	1,5 - 3

Lumi- ja tuulikuormien vaikutusta tarkastellaan Ruotsin BKR-ohjeissa hyvin samoilla tavoilla kuin Eurocode 1:n ohjeissa, joten niitä ei ole syytä tässä työssä erikseen tarkastella.

4 RUNKORAKENTEEEN OPTIMOINTI

Optimoinnilla pyritään löytämään paras mahdollinen ratkaisu, joka vastaa asetettuja vaatimuksia ja on taloudellisesti kannattava. Normaalisti rakenteet on mitoitettu kokemusperäisen tiedon perusteella. Tästä syystä rakenteiden mitoitusmenetelmät johtavat monesti ylimitoitettuihin ratkaisuihin, jotka puolestaan lisäävät kustannuksia. Tässä työssä runkorakennetta optimoidessa on otettava huomioon Eurocode 3:n (SFS-EN 1993-1-1) sekä muiden rakennusmääräysten asettamat säädökset. (Taipale 1999, 9.)

Optimointia voi suorittaa useille eri suureille. Useimmiten optimoidaan materiaalikustannuksia. Muita optimoitavia määreitä voivat olla esimerkiksi tuotteen rakenne, ominaisuudet sekä käytettävät materiaalit ja profiilit. Tässä työssä porrastornin runkorakenteen optimointi sisältää rungon profiilin, rakenteen, materiaalin ja liitosmenetelmien tarkasteluja ja valintaa. Eri vaihtoehtoja vertaillaan ja tarkastellaan määräysten mukaisin kuormitustapausten mukaan. (Sajaniemi 1968, 44 – 48.)

Optimoinnin ongelmana on yleensä tuotteen tai palvelun suuri varioitavuus, jonka seurauksena optimoitava työ laajenee liikaa. Tästä syystä onkin valittava vain tärkeimmät ja olennaisimmat muuttujat optimoinnin kohteeksi. (Sajaniemi 1968, 44 – 48.)

4.1 Teräsrakennesuunnittelu

Porrastornin rungon teräsrakennesuunnittelu suoritetaan Eurocode 3:n sekä muiden yleisten rakennusmääräysten ohjeiden mukaisesti. Teräsrakennesuunnittelu koostuu rungon valinnasta, rakenneosien ja liitosten mitoituksesta sekä jäykisteiden suunnittelusta. Rungon valinnassa ja osien mitoituksessa on otettava huomioon tuotteen käytön asettamat vaatimukset, valmistettavuus, kuljetettavuus, asennettavuus sekä taloudellisuus. Teräsrakennesuunnittelussa kuten kaikessa muussakin rakentamisessa taloudellisuus on yksi merkittävimmistä tekijöistä ja siihen on suunnittelussa kiinnitettävä huomiota. Taulukossa 5 on listattuna teräsrungon hinnan jakautuminen prosentteina. Kuten taulukosta 5 huomataan, suurin osa kustannuksista syntyy materiaalikuluista sekä valmistuksesta ja pintakäsittelystä.

Näiden kustannuksiin on kiinnitettävä huomiota. (Kinnunen ym. 2001, 20; SFS-EN 1993-1-1 2005, 22.)

TAULUKKO 5. Kantavan teräsrunгон hinnan jakautuminen (Saarni 1996, 87)

Materiaalit	35 – 40 %
Asennus	15 %
Kuljetus	3 %
Konepajavalmistus ja pintakäsittely	42 - 47 %

Teräsrakennesuunnittelun lähtökohtana on rakenneluokkajako, joka on esitelty taulukossa 6. Teräsrakenteet voidaan jakaa kolmeen rakenneluokkaan mahdollisten tapaturmien kannalta. Rakenne tulee suunnitella sen mukaan, mihin luokkaan se taulukon 6 mukaisesti kuuluu. Porrastornit kuuluvat luokkaan 1. (RakMK B7 1996, 3.)

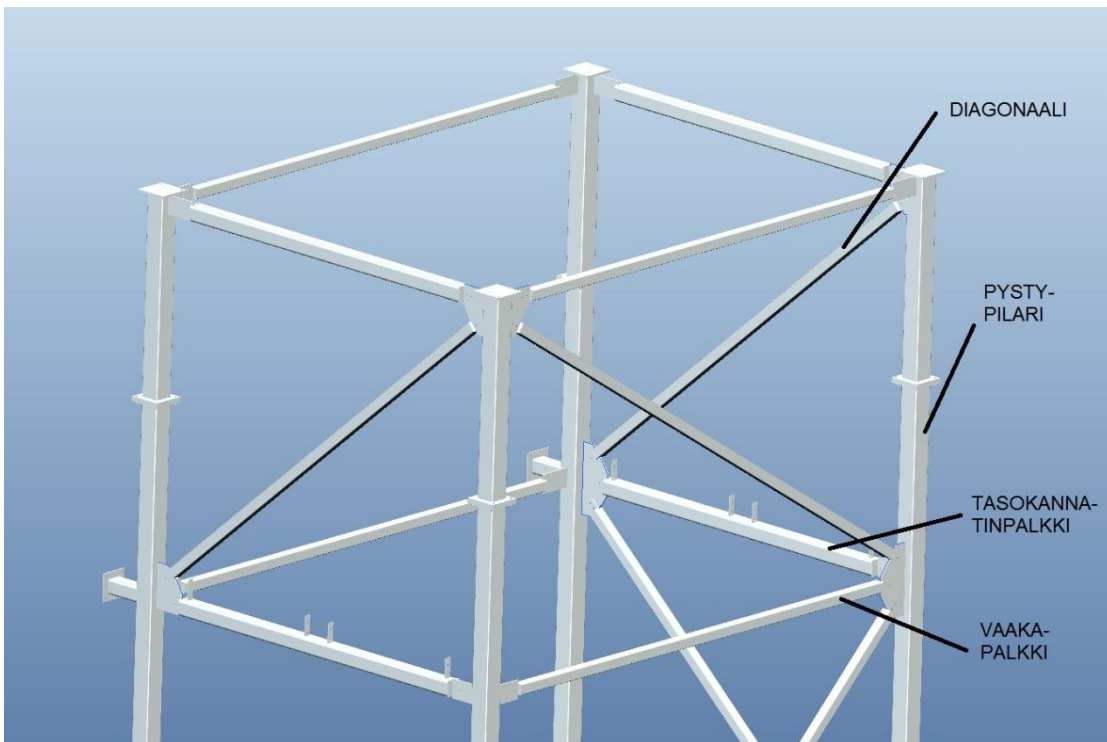
TAULUKKO 6. Rakenneluokat (RakMK B7 1996, 3)

Rakenne- luokka	Rakenne-esimerkkejä
1	Rakennukset, joissa usein on suuri joukko ihmisiä kuten – vähintään 4-kerroksiset asuin-, konttori- ja liikerakennukset – konserttisalit, teatterit, urheilu- ja näyttelyhallit, katsomot Teollisuuden raskaasti kuormitetut tai suuria jännevälejä sisältävät rungot Erikoisrakenteet kuten – suuret mastot ja tornit
2	Rakennukset, jotka eivät kuulu luokkiin 1 tai 3
3	1- ja 2-kerroksiset rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä kuten – pienet varastot – pienet maatalouden tuotantorakennukset

Osa teräsrakennesuunnittelua on runkorakenteen teräksen valinta. Valintaan vaikuttaa olennaisesti käytettävän materiaalin hinta, käyttö- ja ympäristöolosuhteet, kuormitustapaukset, valmistusmenetelmät sekä materiaalin saatavuus. Useimmiten valinta perustellaan saatavuudella sekä sillä, mitä materiaaleja valmistajalla on jo käytössä. Yleensä kantavissa runkorakenteissa käytettävät teräkset ovat kuumavalssatut seostamattomat rakenneteräkset S235, S275 ja S355. Kuumavalssatuista hienoraeteräksistä kantavissa rakenteissa käytetään yleensä S275-, S355-, S420- sekä S460-teräksiä. Pilareiden ja palkkien materiaaliksi valittiin kuumavalssattu rakenneteräs S355 sen hyvän saatavuuden vuoksi. Pilareiden ja palkkien välisissä kiinnityslevyissä materiaalina on S235. (Kinnunen ym. 2001, 21 – 22.)

4.2 Mitoitukset

Porrastornin runkorakenteen mitoitukset tehdään jokaiselle pilari- ja palkkityypille erikseen. Mitoitukset tehdään myös ruuvi- ja hitsiliitoksille sekä kiinnityslevyille. Mitoitukset tehdään luvun 3 mukaisilla kuormituksilla. Runkorakenne koostuu neljänlaisistä sauvoista, joita ovat pystypilarit, vaakapalkit, tason kannatinpalkit sekä diagonaalipalkit. Pystypilarit ja palkit on esitetty kuvassa 1.



KUVA 1. Porrastornin runkorakenteen palkki- ja pilarityypit (Jarno Blomberg)

Jokainen sauva tulee mitoittaa murtorajatilassa rasitukset huomioon ottaen. Pystypilareihin, vaakapalkkeihin ja diagonaaleihin vaikuttaa normaalivoima, josta tulee jännitystä ja puristusta ja joka aiheuttaa nurjahdusvaaran. Reisilankkujen tasokannatinpalkeissa pitää huomioida jännitysten lisäksi taivutuskestävyys sekä taipumat, jotka mitoitetetaan käyttörajatilassa. (Kinnunen ym. 2001, 24 – 26.)

4.2.1 Jännitystarkastelu

Rakenneterästen sallitut jännitykset σ_{sall} voidaan määrittää vedolle, puristukselle ja taivutukselle materiaalin myötörajan R_{El} arvon avulla kaavalla 4.1 (Outinen, Salmi & Vulli 2007, 58):

$$\sigma_{sall} = \frac{R_{El}}{1,5}. \quad (4.1)$$

Käytettävien pilari- ja palkkiprofiilien jännitys σ_N voidaan laskea esimerkiksi pilarin poikkileikkaukseen kohtisuoraan vaikuttavan voiman N ja poikkileikkauksen pinta-alan A avulla kaavan 4.2 mukaisesti (Outinen ym. 2007, 131):

$$\sigma_N = \frac{N}{A}. \quad (4.2)$$

Kaavalla 4.2 saatu käytettävän profiilin jännitys σ_N on oltava pienempi kuin kaavalla 4.1 saatu sallittu jännitys σ_{sall} . Tasokannatinpalkkien jännitys σ_M määritetään palkin taivutusmomentin maksimiarvon M_{max} ja profiilin taivutusvastuksen W avulla kaavan 4.3 mukaisesti (Outinen ym. 2007, 182):

$$\sigma_M = \frac{M_{max}}{W}. \quad (4.3)$$

4.2.2 Puristuskestävyys

Pystypilareiden, vaakapalkkien sekä diagonaalien normaalivoiman kestävyys voidaan tarkastella puristuskestävyyksien avulla. Puristuskestävyys $N_{c,Rd}$ saadaan laskettua kaavalla 4.4:

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}}, \quad (4.4)$$

jossa A on poikkipinta-ala, f_y on materiaalin myötöraja ja γ_{M0} on osavarmuusluku, joka on tässä tapauksessa aina 1,0. Puristuskestävyyttä verrataan profiilin poikkileikkaukseen kohtisuorasti vaikuttavaan voimaan. (SFS-EN 1993-1-1 2005, 53.)

4.2.3 Taivutuskestävyys

Taivutuskestävyyden M_{taiv} mitoittaminen tulee kyseeseen tasokannatinpalkkia tarkasteltaessa. Tasokannatinpalkin taivutuskestävyys M_{taiv} lasketaan kaavalla 4.5:

$$M_{taiv} = \frac{W \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (4.5)$$

jossa W on taivutusvastus, f_y on materiaalin myötöraja ja γ_{M0} on osavarmuusluku. Profiilille saatu taivutuskestävyyden arvo M_{taiv} on oltava pienempi kuin palkin maksimitaivutusjännitys M_{max} . (SFS-EN 1993-1-1 2005, 53.)

4.2.4 Nurjahduskestävyys

Pystypilareiden, vaakapalkkien sekä diagonaalien nurjahduskestävyys N_{Rd} lasketaan kaavalla 4.6:

$$N_{Rd} = \chi \frac{A f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (4.6)$$

jossa A on profiilin poikkileikkauksen ala, f_y on myötöraja, γ_{M1} on osavarmuusluku ja χ on pienennystekijä. Pienennystekijä χ lasketaan kaavalla 4.7:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}. \quad (4.7)$$

Kaavassa 4.7 esiintyvä ϕ lasketaan kaavalla 4.8:

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2], \quad (4.8)$$

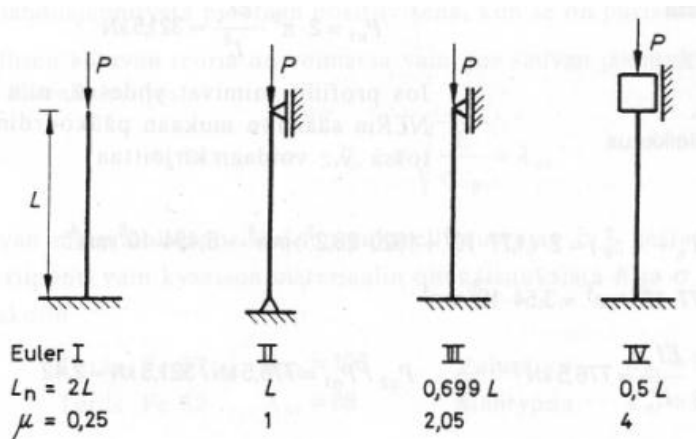
jossa α on osavarmuustekijä ja RHS-profiilista johtuen se saa arvon 0,49. $\bar{\lambda}$ on muunnettu hoikkuus ja se lasketaan kaavalla 4.9:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}. \quad (4.9)$$

Kaavassa 4.9 N_{cr} on kriittinen voima kyseisessä nurjahdusmuodossa. N_{cr} lasketaan kaavalla 4.10:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_n^2}. \quad (4.10)$$

Nurjahdusmuotokaavassa E on materiaalin kimmokerroin, I on profiilin jäyhyysmomentti ja L_n on pilarin nurjahdusmuoto. Nurjahdusmuodot on esitetty kuviossa 4. Diagonaaleissa sekä vaakapalkeissa nurjahduspituutena voidaan käyttää arvoa $1 \cdot L_n$. Näissä tapauksissa voidaan kuvitella palkkien olevan nivelöitynä molemmista päistä. Pystypilarissa käytetään nurjahduspituuden arvona $2 \cdot L_n$, jolloin pilari on toisesta päästä jäykkä ja toisesta päästä vapaa. Saatu nurjahduskestävyyden arvo on oltava profiilin poikkileikkaukseen kohtisuorasti vaikuttavaa voimaa pienempi. (SFS-EN 1993-1-1 2005, 61; Teräsrakenneyhdistys ry 2010, 54.)



KUVIO 4. Eulerin nurjahdusmuodot (Outinen ym. 2007, 289)

4.2.5 Taipumatarkastelu

Tasokannatinpalkit tulee mitoittaa myös taipuman suhteen. Kuormista aiheutuvat taipumat käyttörajatiloissa on otettava huomioon kun taipumista katsotaan olevan haittaa. Sallitut taipumat ovat riippuvaisia jännevälin pituudesta. Taulukko 7 esittää palkkien sallitut taipumat. (RakMK B7 1996, 9.)

TAULUKKO 7. Palkkien sallitut taipumat (RakMK B7 1996, 9)

Rakenne	Taipuman rajatila
Välipohjien pääpalkit	L/400
Vesikattojen ja katoksien	
– pääpalkit	L/300
– orret ja muut vastaavat	L/200
Ulokkeet	L/150
Rakennuksen vaakasuora taipuma	
– 1 ja 2 kerroksiset rakennukset	H/150
– muut rakennukset	L/400
L on jänneväli H on rakennuksen tarkasteltavan kohdan korkeus	

Porrastornin pystypilarien taipuman raja-arvo saadaan kertomalla pilarin pituus arvolla $\frac{1}{400}$. Tason kannatinpalkkien taipuman rajatila saadaan kertomalla palkin pituus arvolla $\frac{1}{300}$. Diagonaalien ja vaakapalkkien taipuma saa olla enintään $\frac{1}{200}$ kertaa pituus.

Tasokannatin palkkia mitoittaessa on huomioitava se, että palkin maksimitaipuma v pysyy sallituissa rajoissa. Palkin maksimitaipuma v saadaan laskettua tasaisen kuormituksen q , palkin pituuden L , materiaalin kimmokertoimen E ja profiilin jäyhyysmomentin I avulla kaavan 4.11 mukaisesti (Outinen ym. 2007, 445):

$$v = \frac{5qL^4}{384EI} \quad (4.11)$$

Tasainen kuormitus q saadaan tasokannattimelle jakamalla pistekuormien yhteenlaskettu arvo palkin pituudella.

4.2.6 Runkorakenteen siirtymät

Porrastornin runkorakennetta optimoidessa on otettava huomioon lujuusanalyyssissä voimien vaikutuksesta ilmenevät runkorakenteen siirtymät. Siirtymätarkastelut tehdään käyttötilan kuormituksilla ilman varmuuskerrointa. Liian suuret siirtymät voivat aiheuttaa rakenteeseen taipumia, värähtelyä sekä väsymystä. RIL 167-1 Teräsrakenteet I kirjassa määritellään rakenteiden suosittelemat taipumarajoitukset jaoteltuina teollisuusrakenteiden ja muiden rakennusten siirtymiin. Porrastornin käyttöympäristöä ei ole määritetty, joten siirtymärajoituksena käytetään pienimmän siirtymän sallimaa laskentamenetelmää. RIL 167-1:ssä rakennuksen vaakaveilan maksimiarvo mitoitetaan kertomalla kokonaiskorkeus arvolla $\frac{1}{400}$. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 1988, 116 – 119.)

4.2.7 Ruuviliitokset

Porrastornin runkorakenteessa käytettäviä liitosmenetelmiä ovat pultti- ja hitsausliitokset. Rakenteen suunnittelussa on pyrittävä siihen, että valmistusvaiheessa tehdään kaikki hitsausliitokset ja asennusvaihe onnistuu pelkkiä pulttiliitoksia käyttämällä. Liitoksia suunniteltaessa ja mitoittaessa on pyrittävä ratkaisuihin, joissa käytetään vain yhden kokoista pulttia ja mahdollisimman vaivatonta hitsausta.

Ruuviliitoksiin liittyvät kiinnityslevyjen ja ruuviliitosten reunaetäisyyksien määrittäminen, perusaineen vetokestävyys, ruuvien leikkauskestävyys sekä reunapuristus- ja repeytymiskestävyys.

Taulukossa 8 on esitetty laskentamenetelmät, millä saadaan pienimmät sallitut pääty- ja reunaetäisyydet. Taulukossa 8 sekä seuraavissa kaavoissa e kuvaa pääty- ja reunaetäisyyden arvoja ja p kuvaa reikien keskiövälejä. Etäisyydet mitoitetaan reiän halkaisijan d mukaan. Pääty- ja reunaetäisyyden minimiarvot mitoitetaan yleisesti kaavan 4.12 mukaisesti (SFS-EN 1993-1-8 2005, 24):

$$e = 1,2 \cdot d. \quad (4.12)$$

Reikien keskiövälien minimiarvot voidaan mitoittaa kaavan 4.13 avulla (SFS-EN 1993-1-8 2005, 24):

$$p = 2,4 \cdot d. \quad (4.13)$$

TAULUKKO 8. Keskiöväli, pääty- ja reunaetäisyydet (SFS-EN 1993-1-8 2005, 24)

Pääty- ja reunaetäisyydet sekä keskiöväli.	Minimiarvot
Pääty- ja reunaetäisyys e	$1,2d$
Keskiöväli p	$2,4d$

Perusaineen vetokestävyyttä laskettaessa on otettava huomioon ruuvien reiästä aiheutuva heikennykset. Kestävyys lasketaan heikoimman pinta-alan mukaan. Kaavassa 4.14 A_{net} on kiinnityslevyn vedettävä poikkileikkauspinta-ala, josta vähennetään ruuvien reiän pinta-ala. Perusaineen vetokestävyys N_{Rt} lasketaan kaavalla 4.14, jossa f_d on perusaineen alempi myötöraja. (Kinnunen ym. 2001, 100):

$$N_{Rt} = A_{net} \cdot f_d. \quad (4.14)$$

Taulukossa 9 on esitetty ruuvien lujuusluokkamerkintöjä vastaavat ainelujuudet f_y .

TAULUKKO 9. Ruuvien ainelujuudet (RakMK B7 1996, 27)

Ruuvien lujuusluokan merkintä ¹⁾	Ainelujuus f_y (N/mm ²)	Huomautukset
5.8	400	Ei käytetä toimivana kitkaliitoksissa
8.8	640	
10.9	900	

Taulukon 9 avulla voidaan laskea yhden ruuvien leikkauskestävyys F_{Rv} kaavalla 4.15:

$$F_{Rv} = k_3 \cdot f_y \cdot A / \gamma_m, \quad (4.15)$$

Kaavassa 4.15 $k_3 = 0,6$ kun ruuvien lujuusluokka on vähintään 8.8, muulloin arvoksi tulee 0,5. Aineosavarmuusluvun γ_m arvo on murto- ja käyttörajamitoituksessa 1,0. A on kaavassa 4.15 ruuvien poikkileikkauksen pinta-ala. Mitoituksessa on kuitenkin otettava huomioon että leikkauskestävyys määräytyy kaavan 4.15 avulla vain yhdelle

ruuville. Leikkauskestävyys kerrotaan ruuvien määrällä. Runkorakenteen kiinnityslevyn liitokset ovat aina kahdella ruuvilla, joten leikkauskestävyys kerrotaan luvulla kaksi. Kiinnityslevyjä mitoittaessa käsitellään yksileikkeistä liitosta. Tällöin leikkauskestävyys on kerrottava arvolla 0,9. (Kinnunen ym. 2001, 96.)

Rasituksen vaikuttaessa kohtisuoraan ruuvin akseliin nähden aiheuttaa rasitus ruuvien reikien reunoille reunapuristusta. Tämän vuoksi on syytä määrittää myös reunapuristus- ja reunarepeytymiskestävyys. Reunapuristus- ja reunarepeytymiskestävyys määritetään kaavan 4.16 avulla:

$$F_{Rh} = k_2 \cdot d_{ruuvi} \cdot t \cdot f_d, \quad (4.16)$$

jossa d_{ruuvi} on ruuvien halkaisija, t on kiinnityslevyn paksuus ja f_d on joko kiinnityslevyn tai ruuvien myötöarvo jaettuna aineosavarmuusluvulla. Näistä valitaan pienempi arvo. k_2 on kerroin joka määritetään kaavalla 4.17 (Kinnunen ym. 2001, 97):

$$k_2 = \left(\frac{e}{d_{ruuvi}} - 0,5 \right). \quad (4.17)$$

Kaavassa 4.17 e on pääty- tai reunaetäisyyden arvo. Arvoksi valitaan laskuista pienin saatu luku. d_{ruuvi} on ruuvien halkaisija. Kaavan 4.16 tapauksessa kaava antaa reunapuristus- ja reunarepeytymiskestävyysarvon yhdelle ainoalle reiälle. Kestävyys pitää muistaa kertoa reikien lukumäärällä sekä yksileikkeisen liitoksen tapauksessa luvulla 0,9. (Kinnunen ym. 2001, 97.)

4.2.8 Hitsiliitokset

Runkorakenteeseen vaikuttava kuormitus luokitellaan väsytkuormitukseksi. Tuuli aiheuttaa rakenteeseen värähtelyliikettä ja rakenteeseen vaikuttaa luonnonvoimien lisäksi myös muita muuttuvia kuormia. Rakenteen hitsit ovat päittäis- ja pienahitsejä. (RakMK B7 1996, 31.)

Pienahitsin a-mitta mitoitetaan mahdollisimman epäsuotuisassa kohdassa. Runkorakenteessa a-mitta mitoitetaan tasokannatinpalkin kiinnityslevylle, koska tällöin hitsiin saadaan vaikuttamaan tasokannattimesta aiheutuva suuri voima. Pienahitsin a-mittaan vaikuttavat sitä rasittavat normaalijännitys σ ja leikkausjännitys τ . Jännitykset saadaan laskettua hitsin pituuden, levyn paksuuden ja hitsiin vaikuttavien voimien ja momenttien avulla. Hitsiin vaikuttava normaalijännitys σ voidaan laskea kaavalla 4.18 ja leikkausjännitys kaavalla 4.19. (Kinnunen ym. 2001, 115):

$$\sigma = \frac{N_{Ed}}{tl} + \frac{6 \cdot M_{Ed}}{tl^2} \quad (4.18)$$

$$\tau = \frac{1,5 \cdot V_{Ed}}{tl}. \quad (4.19)$$

Kaavassa 4.18 N_{Ed} on hitsin akselia kohtisuoraan oleva voima, M_{Ed} on hitsiin vaikuttava momentti, t on hitsattavan levyn paksuus ja l on hitsattavan levyn pituus eli hitsin pituus. Kaavassa 4.19 esiintyvä V_{Ed} on hitsin akselin suuntaisten voimien arvo. Hitsin a-mitan suuruuteen vaikuttaa kaavan 4.20 mukaisesti materiaalin myötöarvo f_y . Hitsin a-mitta a mitoitetaan kaavan 4.20 mukaisesti:

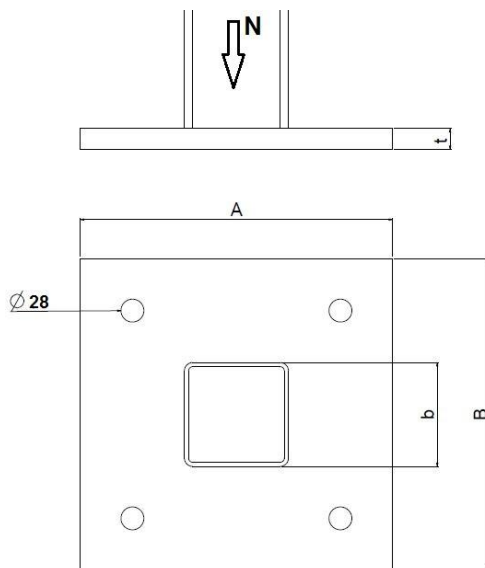
$$a \geq \frac{\beta_w \gamma_{M2} t}{2 f_y} \sqrt{2 \sigma^2 + 3 \tau^2}. \quad (4.20)$$

Kaavassa β_w on korrelaatiokerroin, jonka arvo S235-materiaalilla on 0,8. Kaavassa γ_{M2} on osavarmuusluku, jonka arvo on 1,25. Hitsin a-mitan on kuitenkin aina oltava vähintään 3 mm. (Teräsrakenneyhdistys ry 2010, 106 – 109.)

4.2.9 Pohjalevyn mitoitus ja kiinnitys

Pystysuuntaisten pilareiden liitos perustuksiin tulee olla täysin jäykkä. Kiinnityslevyt ja pultit on mitoittettava täysin jäykiksi; niille ei saa sallia yhtään rasituksesta johtuvaa myötöä. Pulttiraidoitukset voidaan mitoittaa kokemusperäisen tiedon mukaan M24-kokoisiksi pultteiksi. Kokemusperäinen tieto myös osoittaa sen, että pilareihin kiinnitettävissä valuissa käytetään yleisesti valmiita M24-kokoisia pulttiraidoituksia. Tästä syystä pilareiden peruspultteina käytetään M24-kokoisia pultteja, joille mitoitetaan kiinnityslevyihin $\varnothing 28$ -kokoinen kiinnitysreikä.

Pohjalevy mitoitetaan pilarin keskeisen puristuksen avulla. Tässä tapauksessa kuorman oletetaan jakautuvan pilarin pohjan pinta-alan mukaan tasaisesti. Mitoitus tapahtuu kuvion 5 mukaisilla tiedoilla.



KUVIO 5. Pohjalevyn mitoitus (Jarno Blomberg)

Kuviossa 5 N kuvaa porrastornista pilariin kohdistuvaa pystysuoran voiman suuruutta. A ja B ovat pohjalevyn mittoja. Kuvion 5 b kuvaa taas pilarin kokoa ja t on pohjalevyn paksuus, jonka arvo ratkaistaan seuraavien kaavojen avulla. Aluksi selvitetään pilariin kohdistuvasta pystysuuntaisesta voimasta N aiheutuva momentti M kaavan 4.21 avulla (Koskela 2007, 17):

$$M = \frac{N}{A} \frac{(B-b)^2}{2} . \quad (4.21)$$

Saadun momentin M , teräsrakenteiden osavarmuusluvun γ_{M0} :n ja heikoimman myötölujuuden arvon f_y :n avulla voidaan ratkaista taivutusvastus W kaavan 4.22 mukaisesti (Koskela 2007, 17):

$$W = \frac{M \cdot \gamma_{M0}}{f_y}. \quad (4.22)$$

Taivutusvastuksen W avulla voidaan lopulta ratkaista levyn paksuus t kaavalla 4.23 (Koskela 2007, 17):

$$t \geq \sqrt{\frac{3 \cdot W}{A}}. \quad (4.23)$$

Pilari kiinnitetään pohjalevyyn hitsaamalla. Hitsin a-mitaksi valitaan pienimmän ainevahvuuden paksuus, joka on tässä tapauksessa pilarin seinämävahvuus. Pilari on ympärihitsattuna pohjalevyyn. Pienahitsin kestävyys on riittävä, mikäli kaavan 4.24 mukainen ehto on voimassa (Teräsrakenneyhdistys ry 2010, 107):

$$\sqrt{3 \cdot \tau^2} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}. \quad (4.24)$$

Kaavassa τ on leikkausjännityksen suuruus, f_u on vetomurtolujuuden nimellisarvo, β_w on korrelaatiokerroin ja γ_{M2} osavarmuusluku. Leikkausjännitys saadaan laskettua kaavalla 4.25 seuraavasti (Teräsrakenneyhdistys ry 2010, 107):

$$\tau = \frac{V}{l \cdot a}. \quad (4.25)$$

Kaavassa 4.25 V on leikkausvoima, joka on pilariin kohdistuvasta tuulikuormasta aiheutuva kuorma, l on hitsin kokonaispituus ja a on hitsin a-mitta. Mikäli kaavan 4.24 ehto toteutuu, on hitsin a-mitta riittävä kyseisellä kuormituksella.

4.3 Valmistettavuus

Tuotteen tai rakenteen valmistettavuus vaikuttaa suoraan kappaleen kustannuksiin. Tuotteen kustannukset syntyvät useista eri osatekijöistä, kuten suunnittelusta, materiaalivalinnoista, valmistusmenetelmistä ja työn vaiheistuksesta. Tuotteen valmistusystävällisellä suunnittelulla pyritään yksinkertaistamaan tuotteiden valmistusta sekä optimoimaan kaikki valmistuksen vaiheet. Valmistettavuuden parantaminen vaikuttaa tuotteen hintaan, laatuun, luotettavuuteen ja asiakastyytyväisyyteen. Yrityksen hyvä tuotekehitys on kilpailuetu. (Andersson 2010; Piironen 2011.)

Suunnittelulla voidaan vaikuttaa 80 %:iin tuotteen tulevista tuotantokustannuksista. Suunnittelijan tulee perehtyä tuotteeseen selvittämällä, miten tuote on valmistettu, ja sisäistämällä valmistuksen ongelmat ja pääkohdat nykyisistä ja vanhoista tuotteista. Tuotetta ja sen valmistettavuutta suunniteltaessa on suunniteltava helposti valmistettava, käsiteltävä ja kokoonpantava rakenne. Kokoonpanoa voidaan parantaa esimerkiksi suunnittelemalla osien kiinnityksiä tai paikoitusta helpottavia rakenteita. Suunnittelussa on huomioitava olemassa olevat suunnitteluohjeet sekä on pyrittävä välttämään liian tarkkoja mittoja ja toleransseja. Osat on pyrittävä valmistamaan mahdollisimman vähäisillä työvaiheilla ja niiden valmistuksessa on pyrittävä käyttämään olemassa olevia työkaluja ja -koneita. Osien suunnittelussa on pyrittävä välttämään vasen- ja oikeakätisiä osia sekä pyrittävä käyttämään hyväksi symmetriaa käyttämällä samoja osia kokoonpanossa. Mikäli symmetrian käyttö ei ole mahdollista, täytyy osista tehdä mahdollisimman epäsymmetrisiä, jotta ne eivät sekaannu toisiinsa kokoonpanovaiheessa. (Andersson 2010; Piironen 2011.)

Porrastornin runkorakenteen suunnittelun vaatimuksena on valmistuskustannusten pienentäminen. Kustannuksia voidaan pienentää suunnittelemalla rakenne siten, että voidaan käyttää helpompia työvaiheita ja vähentää eri työvaiheiden määrää osissa. Käytettävien osien lukumäärä on pyrittävä pudottamaan, jos se on mahdollista. Nykyisissä porrastornien runkorakenteissa on kuormitusten kannalta varmuutta melko paljon. Kuormitustarkastelujen avulla voidaan määrittää määräysten mukaiset kuormitukset ja siten tuotteen optimaaliset profiilit.

4.4 Parametrinen 3D-mallinnus

Parametrinen piirremallinnusjärjestelmä on syrjäyttänyt vanhan kaksiulotteisen suunnittelujärjestelmän. Nykyään jopa yli 90 % kaikesta mekaniikkasuunnittelusta suoritetaan parametrisen piirremallinnuksen avulla. (Hietikko 2007, 21 – 23.)

Parametrinen mallinnus suoritetaan tietokoneavusteisella suunnitteluohjelmistolla. Suunniteltavasta tuotteesta tehdään kolmiulotteinen malli, jota voidaan käyttää huomattavasti kaksiulotteista mallia tehokkaammin. Mallinnusprosessiin kuuluvat osat, kokoonpanot ja piirustukset. Kaikista valmistettavista osista ja osakokoonpanoista voidaan muodostaa perinteiset valmistus- ja kokoonpanopiirustukset. 3D-malliin tehdyt muutokset päivittyvät automaattisesti myös piirustuksiin. (Hietikko 2007, 21 – 23.)

Parametrisessa mallissa kohteen mittoja voidaan muuttaa jälkikäteen ilman, että kohteen geometria muuttuu. Mallin mittojen välille voidaan myös muodostaa riippuvuuksia. Mitat voidaan määrittää samanmittaisiksi tai niiden välille voidaan asettaa myös matemaattisia yhteyksiä. Malliin voidaan myös liittää erilaisia ehtoja, esimerkiksi symmetria-, samankeskisyys- ja yhdensuuntaisuusehtoja. (Hietikko 2007, 21 – 23.)

4.5 Lujuustarkastelu

Rakenteen lujuustarkastelu on olennainen osa rakenteen optimointia. Lujuustarkastelulla varmistetaan, että rakenne on riittävän luja, jotta se kestää asetetut kuormat ja vaatimukset. Rakenne ei kuitenkaan saa olla liian luja, koska tällöin rakenteesta tulee turhaan liian suurikokoinen, painava ja kallis. Lujuustarkastelulla tarkastellaan rakennetta ja sitä, tarvitaanko jonnekin lisää tuentaa tai onko jossain ylimääräistä tuentaa. Asetettujen kuormitusten ja rasiusten avulla voidaan määrittää käytettävien profiilien poikkileikkauksien vähimmäisvaatimukset. (Hietikko 2004, 13 – 15.)

Laskentaa aloitettaessa rakenteelle asetetaan reunaehdot, joiden mukaan Excel-käyttöliittymästä saadaan rakenteeseen vaikuttavat kuormitukset. Laskennalla tarkastellaan rakenteessa ilmeneviä jännityksiä sekä taipumia. Ilmeneviä jännityksiä verrataan materiaalin sietokykyyn ja taipumia käyttörajatilan asettamiin sallittuihin

taipumiin. Tuloksia verrattaessa täytyy ottaa huomioon varmuus laskennan ja lähtötietojen epävarmuustekijöiden vuoksi. Laskenta suoritetaan käsinlaskennalla sekä Creo Mechanica -ohjelman avulla. Saatuja tuloksia vertaillaan keskenään. (Hietikko 2004, 13 – 15.)

4.5.1 Käsinlaskumenetelmä

Porrastornin runkorakenteen käsinlaskumenetelmä on lähinnä alustavana mitoituksena Creo Mechanican FEM-laskennan profiileille. Creo Mechanicassa tarkastellaan runkorakenteen siirtymiä ja jännityksiä. Käsinlaskumenetelmällä on tarkoitus saada samaa suuruusluokkaa olevia tuloksia, jotta Mechanican antamiin tuloksiin voidaan täysin luottaa. Tarkistukset tehdään luvun 3 mukaisilla kuormitustapauksilla, jotka ovat samoja kuormituksia, joita laitetaan Mechanicassa torniin vaikuttamaan. Tarkistukset tehdään luvun 4.2 mukaisilla mitoitusmenetelmillä.

Käsinlaskennalla mitoitetaan kiinnityslevyjen ruuvi- ja hitsiliitosten kestävyyskä. Lisäksi käsinlaskennalla tarkastellaan porrastornin peruslappujen eli pohjalevyn ja näiden hitsien kestävyttä. Kiinnityslevyissä sijaitsevien ruuvireikien reunaetäisyydet mitoitetaan kaavojen 4.12 ja 4.13 avulla. Kiinnityslevyjen vetokestävyys määritetään luvussa 4 esiintyvällä kaavalla 4.14. Ruuvien leikkauskestävyys varmistetaan kaavalla 4.15 ja reunapuristus ja repeytymiskestävyyttä kiinnityslevyissä tarkastellaan kaavojen 4.16 ja 4.17 avulla. Hitsin a-mitta mitoitetaan kaavan 4.18 mukaan.

4.5.2 FEM-analyysi

FEM (Finite Element Method) tarkoittaa tietokoneavusteista elementtimenetelmää. FEM-menetelmän tarkoituksena on tarkastella tietokoneohjelman avulla rakenteen kestävyyttä. FEM-menetelmässä tarkasteltavaan kohteeseen muodostetaan elementtiverkko, joka muodostuu pienistä elementeistä. Elementit liittyvät toisiinsa solmupisteillä. Rakenteen jokaista elementtiä kohden voidaan kirjoittaa tasapainoyhtälöt. Kuormitusten avulla saadaan selville solmupisteiden siirtymät, joiden avulla voidaan laskea kappaleeseen vaikuttavat jännitykset. Laskennan suuruus riippuu kappaleen solmujen ja vapausasteiden määrästä. Kappaleesta tehtävän analyysin aluksi onkin pohdittava oikea elementtityyppi. Eri elementtityyppejä ovat sauvaelementti, palkkielementti, tasoelementti, kuorielementti sekä solidielementti. Elementtityyppejä voidaan myös yhdistellä kappaleessa. (Hietikko 2004, 148 – 151.)

Tässä työssä rakennetta tarkastellaan Creo Mechanica -ohjelman avulla. Creo Mechanica on Creo 3D -suunnitteluohjelmiston lisäosa, jolla voidaan tehdä lujuustarkasteluja Creolla rakennetuille malleille. Runkorakenteen tarkastelulle käytetään Creo Mechanicasta löytyvää palkkimenetelmää. Palkkimenetelmä soveltuu palkkien ja teräsrunkorakenteiden tarkasteluun. Tarkastelu tehdään pahimman kuormitustapauksen mukaan 25,5 metriselle porrastornille. Kyseinen porrastorni koostuu viidestätoista kerroksesta ja kerroskorkeudeksi on valittu 1,5 metriä. Tämä tornikoko on toteutettavissa parametrinen 3D-mallin avulla.

5 TYÖN KULKU

Työ aloitettiin suunnittelemalla Excel-käyttöliittymä. Excel-käyttöliittymän avulla pystytään ohjaamaan suunniteltavaa parametrilla 3D-mallia. Excel-käyttöliittymä sisältää runkorakenteen suuntaa antavia lujustarkasteluja, mutta runkorakenteelle suoritettiin myös tarkemmat FEM-tarkastelut. Tarkasteluissa ilmenevät puutokset muutettiin lopulliseen 3D-malliin, josta tehtiin valmistuspiirustukset.

5.1 Excel-käyttöliittymän laadinta

Excel-käyttöliittymällä on tarkoitus pystyä valitsemaan käytettävät profiilit riittävällä tarkkuudella. Lisäksi käyttöliittymän on tarkoitus ohjata parametrilla 3D-mallia siten, ettei malliin tarvitse enää tehdä suuria muutoksia suunnitteluohjelmistossa.

Ensimmäisessä vaiheessa Excel-käyttöliittymään syötetään portaan tarvittavat lähtötiedot, kuten portaan kulkuleveys. Portaan kulkuleveys vaikuttaa runkorakenteeseen hyötykuorman vaikuttavana kuormapinta-alana. Lähtötietoihin määritetään myös runkorakenteen päämitat, kuten rakenteen leveys, syvyys, seinäkiinnitysten tiedot, portaan kiinnityslevyjen paikat, tasojen määrä sekä tasojen korkeus. Lähtötietoihin syötetyt tiedot antavat arvot 3D-mallin parametreille. Excel-käyttöliittymä laskee myös automaattisesti pystypilareiden tarvittavan määrän ja mitat.

Seuraavassa vaiheessa valitaan taulukoista pysty-, vaaka-, tasokannatin- ja diagonaalipilareiden profiilit. Profiilit valitaan taulukosta, ja Excel-käyttöliittymä näyttää heti valitun profiilin päämitat sekä poikkileikkaussuureet. Profiilien tiedot toimivat 3D-mallia ohjaavina parametreina. Excel-käyttöliittymä ilmoittaa profiilien poikkileikkaussuureiden ja vaikuttavien kuormitusten avulla, onko profiili riittävä tulevaan runkorakenteeseen. Käyttöliittymä laskee vaikuttavien kuormitusten avulla profiilien taivutuskestävyyttä, puristuskestävyyttä, nurjahduskestävyyttä, jännityskestävyyttä sekä tasokannatinpalkin suurinta taipumaa.

Kuormituksiin vaikuttavat lumikuormat, tuulikuormat, portaan ja runkorakenteen omat massat sekä tasopinta-aloihin vaikuttavat hyötykuormat. Profiilien syötön jälkeen Excel-käyttöliittymä pyytää syöttämään lumikuormiin vaikuttavat tiedot. Lumikuormiin

vaikuttaa tuulensuojaisuuskerroin, joka määritellään ympäröivän maaston epätasaisuuden mukaan. Maaston suojaisuus valitaan taulukosta, jolloin Excel-käyttöliittymä syöttää automaattisesti lumikuorman vaikuttavan kertoimen. Lumikuorman ominaisarvo määräytyy porrastornin sijainnista. Lumikuorman ominaisarvon määrittämisen apuna on kartta (kuvio 1), johon on merkitty ominaisarvot. Lumikertoimen muotokerroin määräytyy lumea kerryttävän tason kaltevuuden mukaan. Exceliin syötetään tason kaltevuus asteina, jolloin Excel-käyttöliittymä asettaa oikean kertoimen lumikuormalle. Näiden arvojen ja syötettyjen lähtötietojen avulla käyttöliittymä laskee pystysuunnassa vaikuttavan lumikuorman.

Vaakakuormana rakenteeseen vaikuttaa tuulikuorma. Jos torni on verhoiltu esimerkiksi reikälevyllä, on tuulikuorman vaikutus suurempi. Tässä työssä verhoilu on rajattu opinnäytetyön ulkopuolelle, joten sitä ei oteta huomioon. Tämän vuoksi tuulikuorman vaikutus jää melko vähäiseksi. Tuulikuormaa määritettäessä Exceliin tulee syöttää rakenteen voimakkeroin (kuvio 2), joka määräytyy tuulen vaikutuspinta-alasta. Porrastornia tarkasteltaessa voidaan voimakertoimelle voidaan yleisesti käyttää arvoa 1.6. Tuulikuorman vaikuttaa myös puuskannopeuspaine (kuvio 3). Puuskannopeuspaineeseen vaikuttaa rakenteen korkeus sekä vallitseva maastoluokka (taulukko 3). Tämän arvon määrittämiseen Excel-käyttöliittymässä on apuna kuvio ja taulukko. Tuulikuorma muodostuu edellä mainittujen kertoimien sekä lähtötietoihin syötettyjen arvojen mukaisesti.

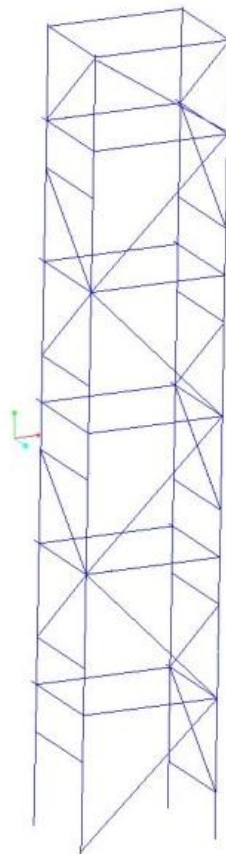
Porrasrakenne tulee mitoittaa siten, että siihen vaikuttaa hyötykuorma. Hyötykuorma lasketaan siten, että tasopintaan vaikuttaa $2 - 4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ paine. Sama hyötykuorma on otettava huomioon runkorakennetta mitoitettaessa. Excel-käyttöliittymä laskee kyseisen hyötykuorman automaattisesti syötettyjen lähtötietojen avulla. Kuormituksiin tulee vaikuttamaan myös portaan sekä rakenteen oma massa, jotka käyttöliittymä laskee syötettyjen lähtötietojen sekä valittujen profiilien avulla.

Excel-käyttöliittymä laskee lopuksi vaikuttavat pystykuormat joka tasolle erikseen sekä yhteispystykuorman. Vaakakuormiin vaikuttaa vain tuulikuorma ja kaiteisiin kohdistuva vaakakuorma. Pystykuormien vaikutus siirtyy portaiden reiselankuista suoraan tasokannatinpalkkeihin ja sitä myötä koko rakenteeseen. Excel-käyttöliittymä laskee alustavien laskelmien mukaan sen, ovatko syötetyt pystypilari-, vaakapalkki-, tasokannatinpalkki- sekä diagonaalipalkkiprofiilit riittäviä annetuille kuormille. Tietojen syötön jälkeen saadaan napin painalluksella tekstitiedosto parametreista, joka

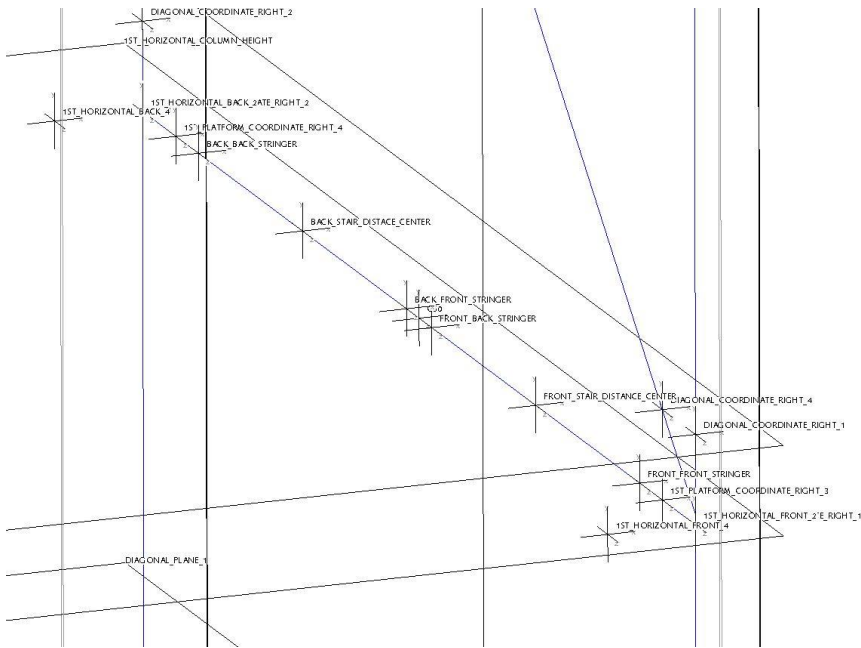
voidaan lukea Creo-ohjelmiston puolella ja joka puolestaan ohjaa 3D-mallia. Excel-käyttöliittymän ohjeet ovat liitteenä 1.

5.2 Parametrinen mallintaminen

Parametrinen 3D-mallin pääkoonta koostuu pääskeleton-mallista sekä eri pilarityyppien kokoonpanomalleista. Pääskeleton (kuvio 6) eli runkorakenteen luurankomalli sisältää lukuisia tasoja sekä koordinaatistoja, jotka muuttavat mallia Excel-käyttöliittymästä tulevien parametrien arvojen mukaan. Käyttöliittymän parametrien arvot on sidottu näiden tasojen ja koordinaatistojen välisiin mitta-arvoihin (kuvio 7). Parametrien välille on skeletonissa asetettu relaatioita eli riippuvuussuhteita toisista parametreista tai mitoista. Käyttöliittymässä on 38 kappaletta syötettäviä parametreja, joiden arvot muuttavat mallia. Muut parametrit määräytyvät itsestään.

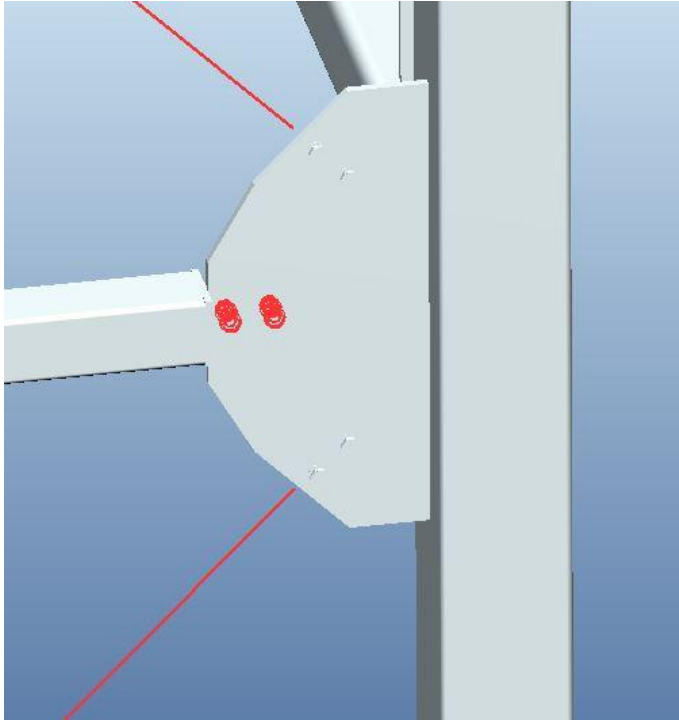


KUVIO 6. Skeleton-malli (Jarno Blomberg)



KUVIO 7. Parametrien avulla muuttuvat koordinaatitot (Jarno Blomberg)

Parametrisen mallin pilari- ja palkkikokoonpanot sekä niiden sisältämät osat ovat suoraan riippuvaisia pääskeletoonista tai osat sisältävät oman skeletoonin, joka puolestaan ohjautuu pääskeletoonin riippuvuuksien mukaan. Pääskeletoon toimii siis näiden pilareiden ja palkkien luurankona, joka muuttaessaan pituutta muuttaa myös ympärillä olevien pilareiden ja palkkien pituutta. Kuvassa 2 diagonaalipalkit on piilotettu, jotta näkyy, miten skeletoon muodostuu rakenteen sisään. Pilarityyppien profiilit määräytyvät ja muuttuvat Excel-käyttöliittymässä valittujen profiilien mukaan. Erilliset palkki- ja pilarikokoonpanot on kuitenkin määritetty siten, että niillä on yhteiset liittymäkohdat, joissa sijaitsevat kiinnityslevyt ja pulttiliitokset (kuva 2). Parametrisen mallin parametrisuus näkyy myös siinä, että jos porrastornin tasojen määrää vähennetään, vähenee tarvittaessa pystypilareiden ja eri palkkien, tasojen sekä kiinnityslevyjen määrä.



KUVA 2. Skeleton, pilarit, palkit, kiinnityslevyt sekä kiinnitystarvikkeet (Jarno Blomberg)

5.3 Lujuustarkastelu

Porrastornin runkorakenteen lujuuslaskelmat päätettiin tehdä korkeimman mallinnettavan porrastornin mitoilla. Tämä torni koostuu viidestätoista kerroksesta ja sen kokonaiskorkeus on 25,5 metriä. Laskelmat tehtiin Creo Mechanicaa käyttäen. Mechanicalla tarkasteltiin valituilla profiileilla ja kuormituksilla saatuja jännityksiä ja siirtymiä. Runkorakenteelle valittiin sopiva rakenne ja profiilit, joilla se kesti kuormituksista aiheutuvat siirtymät ja jännitykset. Käsinsäilyksellä valittiin aluksi alustavat pilari- ja palkkiprofiilit, joita testattiin Creo Mechanicassa. Käsinsäilyksellä ei voida ottaa huomioon kaikkia vaikuttavia kuormia ja niiden yhteisvaikutuksia, joten käsinsäilyksellä on suuntaa antava toimenpide.

5.3.1 Lähtötiedot

Lujuustarkastelujen aluksi oli syytä määrittää lähtötiedot. Porrastornin mittatiedot syötettiin Excel-käyttöliittymään, joka laskee runkorakenteeseen vaikuttavat kuormitukset kyseisillä mittatiedoilla. Käyttöliittymä laskee kuormitukset luvun 3 mukaisilla kuormitustapauksilla. Runkorakenteen päämitat ja niistä aiheutuvat kuormitukset on esitetty taulukossa 10.

TAULUKKO 10. Mitoituksen lähtötiedot

<u>Mittatiedot</u>	Porras 25,5 m
Askelman leveys (mm)	1200
Porrastornin syvyys (mm)	3328
Porrastornin leveys (mm)	4500
Kerroskorkeus (mm)	1500
Katon korkeus (mm)	3000
Kokonaiskorkeus (mm)	25500
Kerroksien määrä (kpl)	15
Seinäkiinnittimien korkeusero (mm)	4500 (5 kpl)
<u>Kuormat</u>	
Pistekuorma tasokannatin (N/piste)	11955,10
Tuulikuorma (N/seinä)	26716,25
Vaakasuuntainen yhteishyötykuorma (N)	18000
Pilarille kohdistuva pystysuuntainen kuorma (N)	202682,57
Vaakakuormista aiheutuva vaakapalkin kuorma (N)	5362,17
Diagonaalia rasittava kuorma (N)	49640,37

Porrastorni mitoitettiin siten, että saataisiin mahdollisimman suuri kuormitus aikaiseksi. Tästä syystä askelman leveydeksi valittiin 1200 mm. Porrastornin syvyys on suoraan riippuvainen askelman leveydestä. Portaan leveys riippuu kerroskorkeudesta, portaan tasosta ja portaan nousukulmasta. Nousukulma määritettiin tässä tapauksessa 37° kulmaan. Kokonaiskorkeus määräytyy kerroskorkeudesta, katon korkeudesta ja kerrosten määrästä. Seinäkiinnittimet on jaettu tasaisin välein kokonaiskorkeuden mukaan.

Pistekuorma aiheutuu portaan omasta painosta, lumikuormasta sekä portaaseen kohdistuvasta hyötykuormasta. Tämä pistekuorma on joka pisteessä yhtä suuri koska

porrasnousu on kaikkien kerrosten välillä samanlainen. Tuulikuorma on suoraan verrannollinen porrastornin korkeuteen, joten sen suuruus vaihtelee tornin korkeuden ja tuulen vaikutuspinta-alan kasvaessa. Vaakasuuntainen hyötykuorma määräytyy kaiteisiin kohdistuvasta vaakasuuntaisesta kuormasta. Tämä kuorma on joka tasolla samansuuruinen, joten vaakasuuntainen hyötykuorma on suoraan verrannollinen kerrosten määrään. Mechanicalla laskettaessa ohjelma ottaa itse huomioon runkorakenteen omasta painosta johtuvat kuormitukset.

5.3.2 Käsinlaskumenetelmä

Käsinlaskumenetelmä toimii alustavana mitoituksena sekä tarkastusmenetelmänä Mechanica-tarkastelulle. Käsinlaskennan aluksi oli syytä määrittää jännitysten, taipumien ja siirtymien sallitut rajat. Sallittu jännitys saatiin laskettua sijoittamalla pilarien ja palkkien materiaalien myötöraja 355 N/mm^2 kaavaan 4.1. Tällöin sallituksi jännitykseksi saatiin

$$\sigma_{sall} = \frac{355 \text{ N/mm}^2}{1,5} = 236,7 \text{ N/mm}^2.$$

Seuraavaksi tarkasteltiin palkkien sallittuja taipumia ja runkorakenteen sallittuja siirtymiä. Palkkien taipumien raja-arvot saatiin laskemalla palkkien pituus kerrottuna taulukon 7 taipuman rajatilan kertoimilla. Palkkien taipumien raja-arvot on esitetty taulukossa 11, kun palkkien pituudet ovat lujuustarkasteltavan porrastornin runkorakenteen palkkien mittaisia.

TAULUKKO 11. Sallitut taipumat

	Pituus L (mm)	Taipuman rajatilakerroin	Sallittu taipuma
Pystypilari	6000	$\frac{1}{400}$	15
Tasokannatinpalkki	3328	$\frac{1}{300}$	11,09
Vaakapalkki	4500	$\frac{1}{200}$	22,5
Diagonaali	6360	$\frac{1}{200}$	31,8

Porrastornin runkorakenteen sallittua siirtymää tarkastellaan luvussa 4.2.6. Sallittu siirtymä saadaan runkorakenteen kokonaiskorkeuden ja kertoimen $\frac{1}{400}$ tulosta. Tarkasteltavan porrastornikorkeuden sallitut siirtymät on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Porrastornin runkorakenteen sallitut siirtymät

	Kokonaiskorkeus (mm)	Rajatilakerroin	Sallittu siirtymä (mm)
Porrastorni 25,5	25500	$\frac{1}{400}$	63,75

Kokemusperäinen tieto osoittaa sen, että pystypilari ja tasokannatinpalkki joutuvat suurimpien rasitusten kohteiksi. Tasokannatinpalkit kannattelevat portaita sekä ottavat niistä aiheutuvat rasitukset vastaan. Tasokannatinpalkeista rasitus siirtyy pystypilareihin, jotka kannattelevat koko pystykuormaa sekä vaakasuuntaisia kuormia. Näin ollen jo ennalta tiedettiin pystypilareiden ja tasokannatinpalkkien tarvitsevan vahvempaa profiilia kestääkseen. Vaakapalkkeihin vaikuttaa pääasiassa vain tuulikuormasta sekä vaakasuuntaisesta hyötykuormasta aiheutuvat rasitukset. Näiden vaikutus on melko vähäinen. Vaakapalkkien profiili on oltava vähintään diagonaaliprofiilien suuruinen. Kuormitukset on esitetty taulukossa 10. Todellisuudessa portaat estävät runkorakennetta vääntyilemästä ja estävät näin tuulikuormasta aiheutuvan ”salmiakkiefektin”. Seinätukiprofiilien kestävyys ei erikseen tarkasteltu vaan niiden profiiliksi määritettiin tarkasteltavan porrastornin suurin käytössä oleva profiili.

Pystypilariin vaikuttava mitoittava voima määritettiin laskemalla koko porrastornin pystykuorma. Tämä pitää sisällään runkorakenteen oman painon, portaiden painon, hyötykuorman sekä lumikuorman. Runkorakenteen ollessa nelipilarinen on tällöin yhteen pilariin vaikuttava voima neljäsosa kokonaispystykuormasta. Rasitustarkastelu tehdään käytännössä alimman pystypilarin alimmassa poikkileikkauskohdassa. Kyseisessä kohdassa rasitus on suurin. Pystypilarille laskettiin alustavista mitoituksista saadun profiilin poikkileikkausarvojen avulla puristuskestävyys, nurjahduskestävyys sekä jännitys. Puristuskestävyys määritellään kaavan 4.4 mukaisesti, nurjahduskestävyys lasketaan kaavoilla 4.6 – 4.10 ja jännitykset saadaan ratkaistua kaavalla 4.2. Nämä laskut tuloksineen on esitetty liitteessä 3.

Diagonaaliin vaikuttava voima on pystysuuntaisen ja vaakasuuntaisen voiman resultantti. Diagonaalille suoritettiin samat laskutoimenpiteet samoilla kaavoilla kuin

pystypilarille. Tässä tarkasteltiin diagonaalipalkin profiilin puristuskestävyyttä, nurjahduskestävyyttä sekä jännitystä. Näitä arvoja vertaamalla vaikuttavaan voimaan ja sallittuun jännitykseen huomataan onko alustava profiili tarpeeksi kestävä. Diagonaalilaskut tuloksineen löytyvät liitteestä 4.

Kuten pystypilari ja diagonaali, myös vaakapalkki sisältää puristuskestävyyden, nurjahduskestävyyden sekä jännitysten tarkastelua. Vaakapalkin mitoituskuorma määritettiin vaikuttavista vaakakuormista. Yhtä vaakapalkkia rasittava kuorma mitoitettiin laskemalla kokonaistuulikuorma sekä kaikkien kaiteiden kaidekuorma yhteen ja jakamalla saatu kokonaisvaakakuorma vaakapilareiden määrällä. Vaakapalkkilaskut löytyvät liitteestä 5.

Portaita kannatteleva tasokannatinpalkki mitoitettiin jännitysten, taivutuskestävyyden sekä taipuman suhteen. Tasokannatinpalkin jännitys määritetään kaavan 4.3 mukaisesti käyttäen taivutusvastusta ja taivutusmomenttia, joka määritettiin portaista tulevien pistekuormien avulla. Profiileille saadut jännitykset on oltava pienempiä kuin materiaalin myötöarvon avulla saatu sallittu jännitys. Taivutuskestävyys määräytyy profiilin taivutusvastuksen ja materiaalin myötörajan mukaan. Taivutuskestävyyden arvo on oltava suurempi kuin siihen vaikuttavan taivutusmomentin arvo. Tasokannattimelle lasketaan myös suurimman taipuman arvo. Taipumaan vaikuttaa tasainen kuormitus, joka lasketaan pistekuormien sekä palkin pituuden mukaan. Taipuman arvoon vaikuttaa kuormituksen lisäksi palkin pituus, käytettävä materiaali sekä profiilin poikkileikkaus. Taipuma määritetään kaavalla 4.11 ja kaavasta saatava arvo on oltava pienempi kuin taulukossa 11 esiintyvä kyseisen palkin suurin sallittu taipuma. Tasokannatinpalkin laskut löytyvät liitteestä 6.

Liitteessä 7 on esitetty laskelmat kiinnityslevyn ja ruuvin mitoitukselle. Kiinnityslevyn ruuvireikien pääty- ja reunaetäisyydet sekä keskiöväli laskettiin ruuvireikien halkaisijan avulla kaavoilla 4.12 ja 4.13. Kiinnityslevyn vetokestävyys on laskettu kaavan 4.14 avulla. Ruuvin leikkauskestävyyden arvoa on tarkasteltu kaavalla 4.15. Liitoksen reunapuristus- ja reunarepeytymiskestävyyttä tarkasteltiin kaavojen 4.16 ja 4.17 mukaisesti.

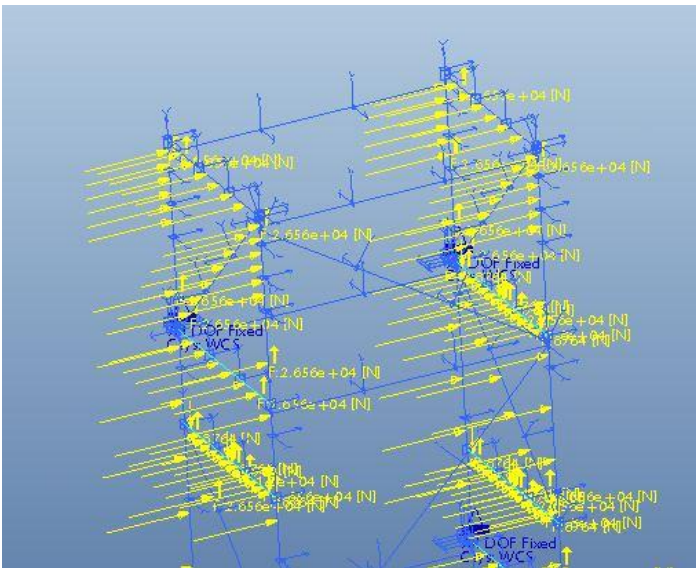
Kiinnityslevyjen hitsauksia pystypilareihin tarkasteltiin epäsuotuisammassa kohdassa. Tällaiseksi osoittautuivat tasokannatinpalkkien kiinnityslevyt. Näihin kohdistui suurin leikkausvoima. Hitsiin vaikuttavien voimien avulla voitiin määrittää normaali- ja leikkausjännitykset kaavojen 4.18 ja 4.19 avulla. Hitsin a-mitta saatiin jännitysten

avulla laskettua kaavan 4.20 mukaisesti. Hitsin a-mitan mitoitus on esitetty liitteessä 8.

Pohjalevyn mitoitus on liitteessä 9. Pohjalevyn vaadittu paksuus on laskettu liitteessä kaavojen 4.21 – 4.23 avulla. Pystypilarin ja pohjalevyn hitsin kestävyys on laskettu kaavoilla 4.24 – 4.25. Peruspultti on valittu kokemuseräisen tiedon mukaisin perustein.

5.3.3 Creo Mechanica -tarkastelu

Creo Mechanicalla suoritettava tarkastelu suoritettiin palkkimenetelmän avulla. Tässä menetelmässä tarkastelu suoritetaan suoraan runkorakenteen Skeleton-mallille (kuva 3).



KUVA 3. Creo Mechanica-tarkastelu (Jarno Blomberg)

Mallille määritettiin aluksi tuennat, jotka sijaitsivat porrastornin maa- ja seinäkiinnityskohdissa. Tuennat määritettiin täysin jäykiksi. Tämän jälkeen määritettiin malliin vaikuttavat voimat taulukon 10 arvoilla. Voimat osoitettiin vaikuttamaan niille tarkoitetuille viivoille ja pisteille. Jokaiseen tasokannatinpalkin skeletonviivaan merkattiin neljä pistettä ja jokaiselle pisteelle asetettiin taulukon 10 mukainen pistekuorma. Tämä kuorma on yhteen pisteeseen kohdistuvan voiman suuruus. Tämän jälkeen valittiin runkorakenteen vasemman reunan kaikkien palkkien ja pilareiden skeletonviivat ja niille määritettiin jakautumaan taulukon 10 mukainen

tuulikuorma. Sama toimenpide tehtiin myös rakenteen oikean reunan skeleton-osille. Tuulikuormien jälkeen valittiin jokainen tasokannatinsketsi ja näille määritettiin jakautumaan taulukon 10 mukainen vaakasuuntainen yhteishyötykuorma. Lopuksi valittiin koko skeletonmalli ja asetettiin malli painovoiman alaiseksi.

Voimien määrittämisen jälkeen valittiin runkorakenteen materiaaliksi STEEL, joka löytyi ohjelmasta valmiiksi ja sisälsi oikeat teräksen materiaaliarvot. Ennen laskentaa täytyi määrittää käytettävät profiilit. Opinnäytetyössä profiilit oli rajattu neliöputkiprofiileiksi. Pystypilariin, tasokannattimeen sekä seinätukeen tulee kohdistumaan suurimmat rasitukset. Näiden edellä mainittujen profiilien on syytä olla vaakapalkkien ja diagonaalien profiileja isompia. Profiilien määrittämisen yhteydessä pilareiden ja palkkien alkuun ja loppuun tuli määrittää näiden sallitut vapausasteet. Mikään palkki tai pilari ei saa irrota liitoskohdastaan mutta kiertymä on palkin akselin mukaisesti sallittu. Vain seinätuennan ja pystypilarin maakiinnityksen kiertymät estettiin. Ennen lujustarkasteluja runkorakenteelle on katsottu suurin sallittu jännitys materiaalin myötörajaan nähden sekä suurin sallittu taipuma eri palkeille.

Lähtötietojen määrittämisen jälkeen suoritettiin runkorakenteelle lujustarkastelu määritetyillä tiedoilla. Mechanica laskee kyseiselle rakenteelle profiilien ja materiaalin avulla massan. Lujustarkastelun tuloksena Mechanicasta tarkastellaan suurinta jännitystä (Von Mises) ja suurinta siirtymää. Näitä tuloksia verrataan aiemmin laskettuihin sallittuihin arvoihin. Profiilit määritettiin aluksi käyttöliittymästä ja käsinlaskennasta tulokseksi saatujen profiilien suuruisiksi. Näille profiileille tehtiin Creo Mechanican avulla FEM-tarkastelu. Tämän jälkeen profiilien arvoja muutettiin siten, että tuloksiksi saadut jännitykset ja siirtymät saatiin pidettyä sallituissa rajoissa. Mikäli pystypilareiden huomataan siirtyvän liikaa, on tällöin saatava niiden profiili tarpeeksi jäykäksi, jotta ne eivät aiheuttaisi torniin liian suurta siirtymää. Seuraavana tarkastelun kohtana ovat tasokannatinpalkkien profiilit. Näihin kohdistuu myös suurta kuormaa, jotka saattavat vääntää muuta rakennetta mikäli profiili antaa periksi. Runkorakenteelle ja jokaiselle eri profiilivariaatiokokeelle kirjataan ylös saadut jännitykset, siirtymät ja massat. Optimaalisin rakenne olisi sellainen, jossa sekä siirtymä että jännitys olisivat juuri ja juuri sallituissa rajoissa. Tässä tapauksessa materiaalmäärä olisi todennäköisesti mahdollisimman pieni ja näin kustannukset alhaiset. Tarkastellessa tuloksia eri variaatioille, huomattiin, että jännitykset jäivät melko alhaisiksi siirtymien ollessa sallitun rajamailla. Creo Mechanican antamia FEM-tuloksia on esitetty liitteessä 2.

5.4 Piirustukset

Suunnitellusta ja optimoidusta porrastornin runkorakenteesta tehtiin Creo-ohjelmalla esimerkin omaiset työpiirustukset. Piirustukset tehtiin SafeGo Oy:n antamien ohjeiden ja vaatimusten mukaisesti yrityksen omille piirustusohjelmille. Piirustukset tehtiin 10,5 metriä korkean porrastornin runkorakenteen mittojen mukaan. Piirustukset on tehty jokaisesta porrastornin runkorakenteen eri osasta, hitsauskokoontavoista sekä kokoonpanoista. Niistä löytyy tarvittavat osaluettelot, päämittatiedot, hitsausmittatiedot ja materiaalimerkinnot. Kyseistä runkorakennetta ei tulla valmistamaan piirustusten pohjalta, vaan ne toimivat suunnittelun ohjenuorana ja opinnäytetyön yhtenä osana. Piirustukset ovat liitteestä 10.

6 TULOKSET

6.1 Käyttöliittymä

Porrastornin runkorakenteen mallin ohjaus tapahtuu parametrien arvoja muuttamalla. Työtä aloitettaessa oli tiedossa, että ohjaus voidaan toteuttaa kahdella tavalla: joko syöttämällä porrastornin ja runkorakenteen arvot suoraan Creo-ohjelmaan tai tekemällä erillinen Excel-tiedosto tätä varten. Käyttöliittymä toteutettiin Excel-tiedostoon, koska tähän pystyttiin lisäämään helpommin toisista mitoista riippuvia ehtoja muodostuvien parametrien välille. Excelliin rakennettuun käyttöliittymään saadaan myös liitettyä sujuvasti alustavat laskelmat käytettäville profiileille.

Käyttöliittymään syötetään aluksi runkorakenteen päämitat, kuten runkorakenteen leveys ja syvyys, tasojen määrä, tasokorkeus sekä portaan leveys. Seuraavaksi valitaan pystypilarille, tasokannatinpalkille, vaakapalkille ja diagonaalille profiilit. Tämän jälkeen käyttöliittymässä on vuorossa kuormitusten määrittely. Kuormituksissa voidaan muuttaa tuuli-, lumi- ja hyötykuorman arvoja. Näiden tietojen syöttämisen jälkeen käyttöliittymä ilmoittaa annettujen mittatietojen, kuormitusten ja profiilin poikkileikkaussuureiden perusteella, onko valittu profiili tarpeeksi kestävä. Tässä suunnittelijan täytyy huomioida se, että käyttöliittymän laskut profiilien poikkileikkaussuureiden mukaan ovat alustavia ja karkeita arvioita kestävyydestä. Suunnittelijalle jää lopullinen vastuu oikean profiilin valinnasta. Käyttöliittymää on esitetty kuvassa 4.

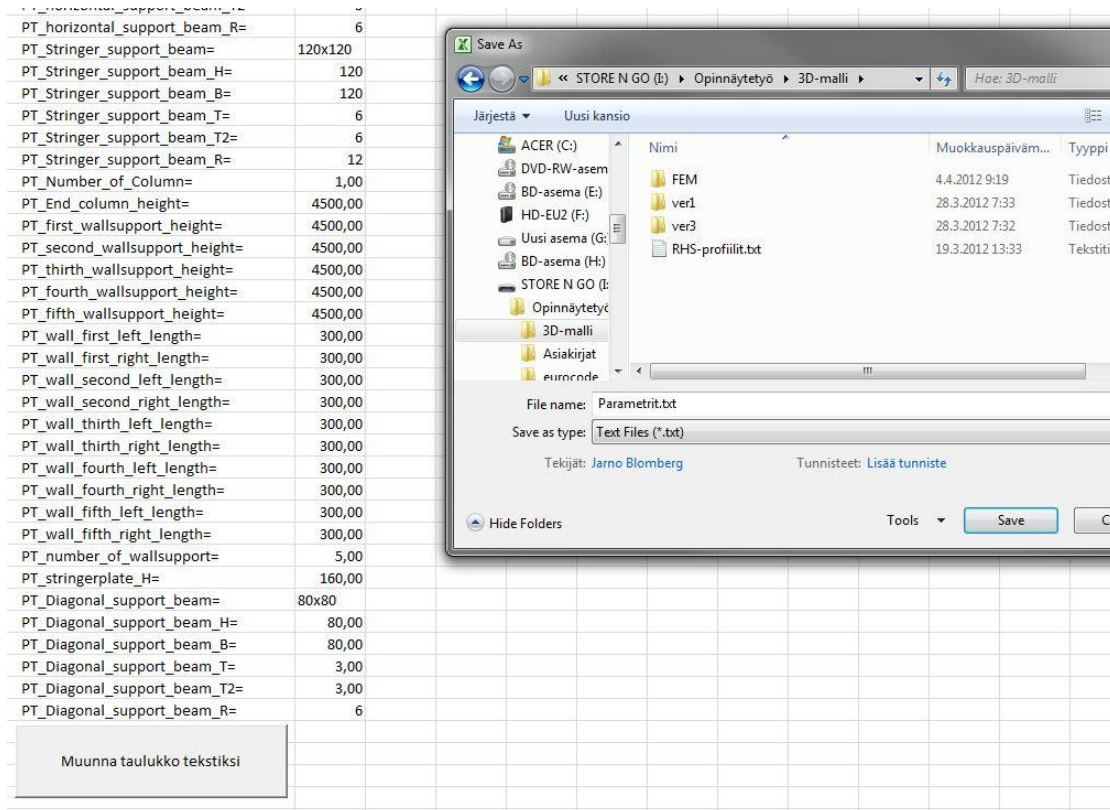
2. Seinäkiinniketason vasen syvyys	300	mm
2. Seinäkiinniketason oikea syvyys	300	mm
3. Seinäkiinniketason vasen syvyys	300	mm
3. Seinäkiinniketason oikea syvyys	300	mm
4. Seinäkiinniketason vasen syvyys	300	mm
4. Seinäkiinniketason oikea syvyys	300	mm
5. Seinäkiinniketason vasen syvyys	300	mm
5. Seinäkiinniketason oikea syvyys	300	mm
Seinäkiinnikkeiden määrä	5	kpl
Reisilankkulapun korkeus	160	mm

PROFIILIT			
120x120		23	
130x130			
150x150			
150x150	OK!	Pilarin profiili	H B
150x150		150x150	150 15
50x50		Vaakaprofiili	H B
50x50		80x80	80 8
80x80		80x80	18 8
80x80		tasokannatin profiili	H B
120x120		120x120	120 12
120x120	vaihda profiili		
120x120		Diagonaali	H B
50x50		80x80	80 8
80x80			
80x80			

LUMIKUORMAT			
Valitse tuulensuojaisuus	Tuulinen maasto	3	Tuulensuojaisuuskertoin Ce
	Hörmaa maasto	1,2	
	Alueella olevien		
Valitse lumikuorman ominaisarvo	3	3	Lumikuorman ominaisarvo Sk
	2,5	2,75	
	5		
Lumikuorman muotokerroin μ	Syötä arvo 0° - 90°	0	0,8
Lumikuorma s		2,64	kN/m2

KUVA 4. Excel-käyttöliittymä (Jarno Blomberg)

Mittatietojen ja profiilien arvojen perusteella käyttöliittymä muodostaa parametreille arvot. Parametrisivu pitää tallentaa tiettyyn muotoon, jotta se voidaan ajaa Creo-ohjelmistossa onnistuneesti. Parametrisivulle on tehty erillinen painike, jolla tiedosto tallentuu oikeaan muotoon. Tämä on esitetty kuvassa 5.



KUVA 5. Parametritiedot (Jarno Blomberg)

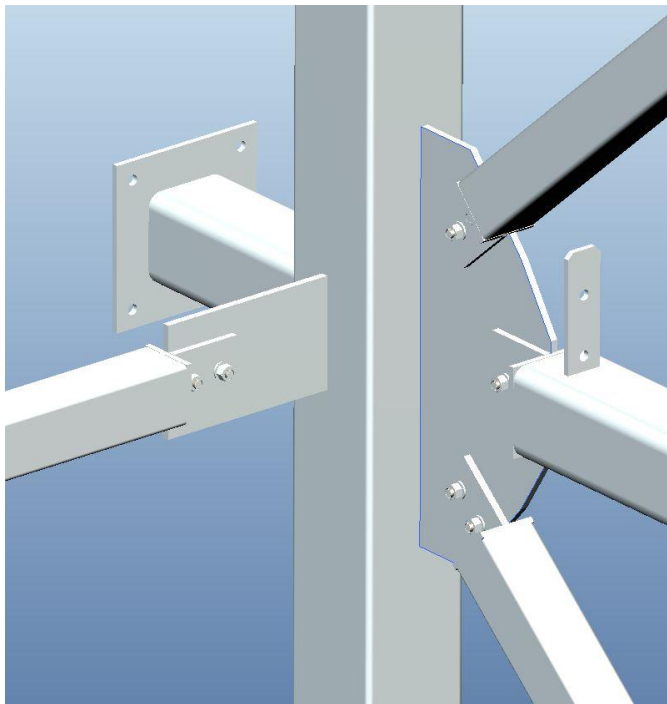
6.2 Parametrinen 3D-malli

Työn tavoitteena oli luoda porrastornin runkorakenteen parametrisesti ohjautuva 3D-malli. Parametrisen mallin avulla porrastornin runkorakenteesta on helppo tehdä lukuisia eri variaatioita muuttamalla runkorakenteen päämittoja. Runkorakenteelle tuli hieman alle 70 parametria, joista käyttöliittymässä muuttuvia parametrejä on noin 40 kappaletta. Näiden eri parametrien välillä on lukuisia eri riippuvuussuhteita.

3D-malli on rakennettu siten, että malli ei tuhoudu mittoja muuttamalla tai tasojen määrää vähentämällä. Malli sisältää niin kiinnitystarvikkeet kuin portaan kiinnityslevytkin. Opinnäytetyöhön jouduttiin tekemään työn laajuuden vuoksi

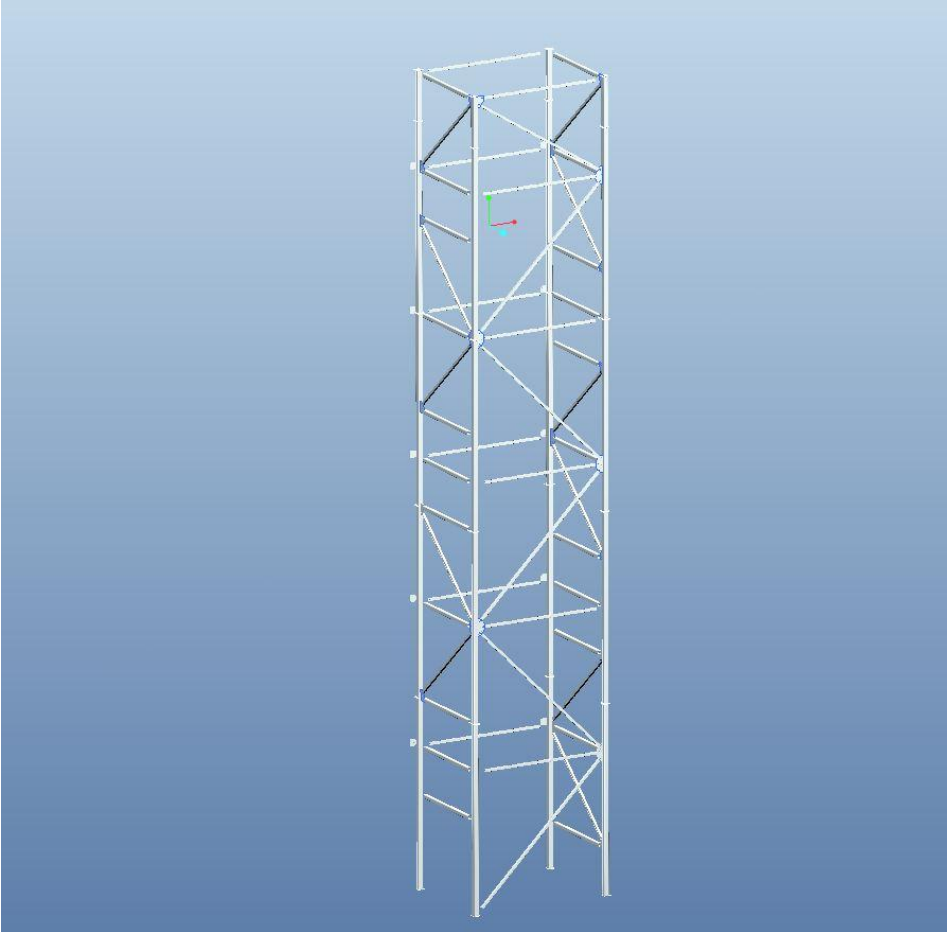
muutamia rajoituksia, kuten että runkorakenne on tässä tapauksessa nelipilarinen ja profiilivaihtoehdot on rajattu vain neliönmuotoisiin RHS-profiileihin.

Parametrinen malli antaa suunnittelijalle niin sanotun runkorakenteen perusmallin, joka antaa hyvän pohjan suunnittelulle ja toimii joissain yksinkertaisissa tapauksissa sellaisenaan valmiina runkorakenteen mallina. Parametrisuuden ja muunneltavuuden vuoksi kaikki runkorakenteen palkkien kiinnityslevyt eivät välttämättä ole aina kaikista optimaalisimman muotoisia, joten näitä suunnittelija saattaa joutua hieman muuttamaan. Kuvassa 6 on esitetty muutamia kiinnityslevyjä runkorakenteessa. Suunnittelija saattaa joutua poistamaan tai lisäämään jotain osia runkorakenteeseen. Runkorakenne ei esimerkiksi sisällä minkäänlaista verhoilua, mutta se on suunniteltu siten, että itse porraskorkeus ei tule runkorakenteen ulkomittojen ulkopuolelle ja näin verhoilu on helppo toteuttaa. Opinnäytetyön porrastornin runkorakenne ei sisällä kattorakennetta, mutta ylimmässä pilarissa on kiinnitysreiät mahdollista kattorakennetta varten.



KUVA 6. Kuvassa on esitetty pystypilari, seinätuenta, diagonaalit, vaakapalkki, tasokannatinpalkki portaan kiinnityksineen sekä näiden kiinnityslevyt (Jarno Blomberg)

Porrastornin runkorakenteen parametrinen 3D-malli ladattiin lopuksi SafeGo Oy:n käyttämään Windchill PDM -järjestelmään, jossa se on jokaisen suunnittelijan käytettävissä. Kuvassa 7 on esitetty 25,5-metrinen porrastornin runkorakenne.



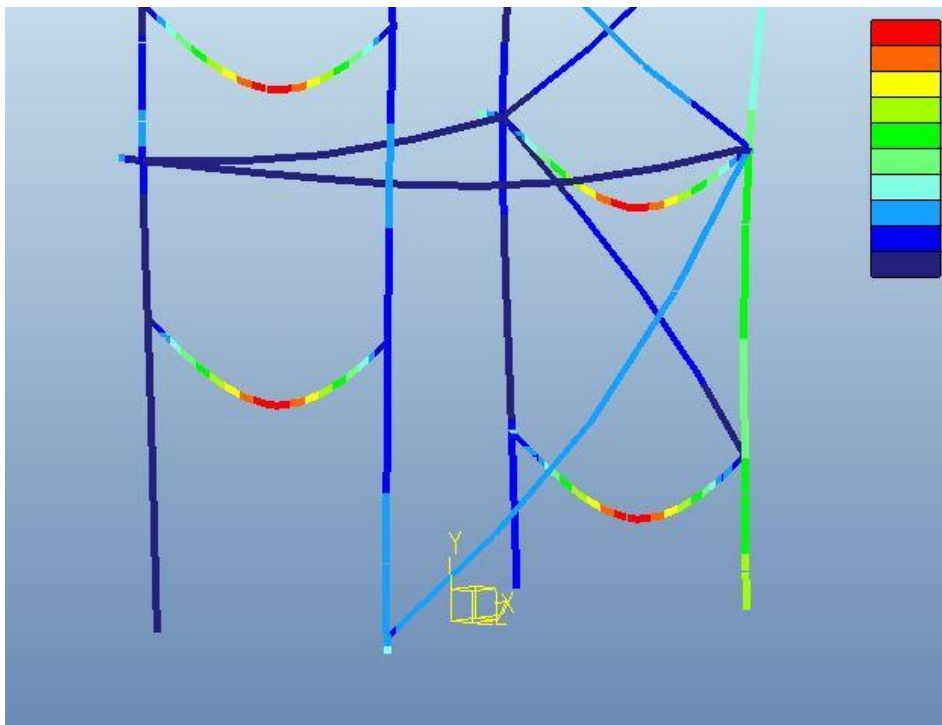
KUVA 7. 25,5 metriä korkea porrastornin runkorakenteen kokoonpano (Jarno Blomberg)

Porrastornin runkorakenteesta rakennettiin 10,5 metriä korkea runko syöttämällä sopivat mitat käyttöliittymään. Tästä runkorakenteesta tehtiin esimerkinomaiset piirustukset. Piirustukset tehtiin jokaisesta osasta, alikokoonpanosta ja pääkokoonpanosta. Tornia ei tulla näiden piirustusten avulla valmistamaan, mutta piirustukset toimivat esimerkinomaisina piirustuksina työn yhtenä osa-alueena. Piirustukset on esitetty liitteenä 10.

6.3 Lujuustarkastelut

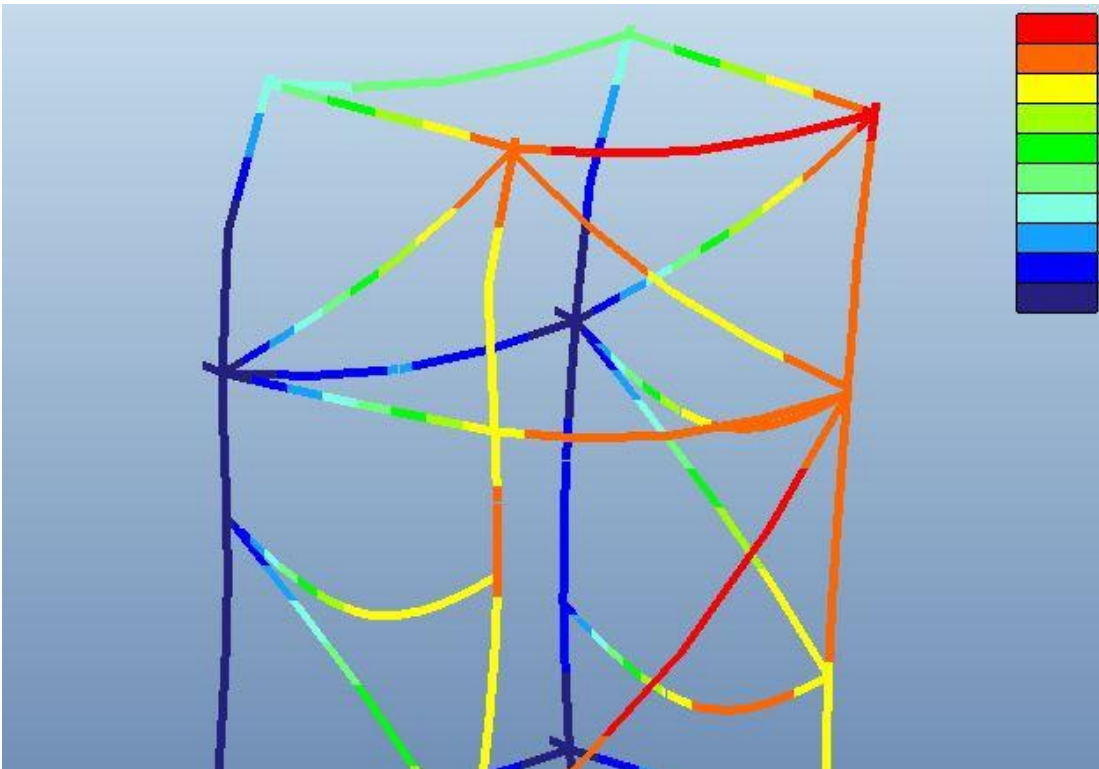
Lujuustarkastelut kuuluvat työn optimointivaiheeseen. Lujuustarkasteluja suoritettiin Creo-ohjelmiston Mechanics-lisäosan avulla sekä käsinlaskennalla. Excel-käyttöliittymä laskee profiilien poikkileikkaussuureiden ja kuormitusten avulla alustavia kestävyksiä. Käyttöliittymän tekemät lujuuslaskennat myötäilevät käsinlaskennalla tehtyjä laskuja. Käsinlaskennalla tarkasteltiin eri pilari- ja palkkityyppejä sekä liitosmenetelmiä pahimman kuormitustapauksen mukaan. Käsinlaskennan kulusta on kerrottu enemmän luvussa 5.3.3 ja tulokset on esitetty liitteissä 3-9.

Mechanicalla tehty tarkastelu tehtiin samoilla vaikuttavilla kuormilla. Vaihtelemalla pilareiden ja palkkien profiileja saatiin lopulta optimoitu rakenne, joka kestää niin jännityksiä kuin siirtymiä. Näitä tuloksia verrataan käsinlaskennalla saatuihin tuloksiin. Mechanicasta saatuja jännitystuloksia esitellään kuvassa 8. Kuten kuvasta 8 huomataan suurimmat jännitysten arvot sijoittuvat tasokannatinpalkkeihin. Runkorakenteen oma massa ja portaista aiheutuva kuormitus yhdessä tuulikuorman väännön kanssa aiheuttaa suuria jännityksiä porrastornin runkorakenteen jalkoihin.



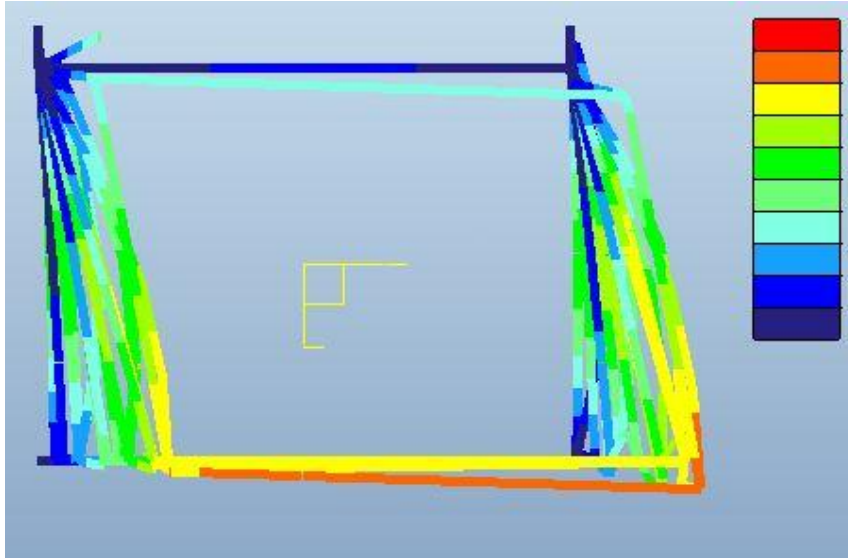
KUVA 8. Porrastornin runkorakenteen jännitykset tornin jaloissa ja tasokannattimissa (Jarno Blomberg)

Kuvassa 9 on esitetty porrastornin runkorakenteen siirtymät ja palkkien taipumat. Kuvasta huomataan hyvin, kuinka paljon tasokannatinpalkit taipuvat portaista aiheutuvan kuorman vuoksi. Työssä kului suhteellisen paljon aikaa siihen, että saatiin tasokannatinpalkkien taipumat hallintaan. Taipuma ei saanut kyseisessä mitoitustapauksessa ylittää arvoa 11,09 mm. Tasokannatinpalkkiin vaikutti portaista tulevien kuormien lisäksi myös muusta rakenteesta aiheutuvat kuormat. Näitä ei käsinlaskennassa voitu suuremmin tarkastella. Pystypilareita suurentamalla tasokannattimien taipumat saatiin lopulta hallintaan. Tämä toimenpide vaimensi muun rakenteen aiheuttamien kuormitusten vaikutusta. Myös rakenteellisia muutoksia tekemällä olisi voitu päästä sallittuihin siirtymiin ja jännityksiin pienempiä profiileja käyttämällä. Esimerkiksi päätydiagonaalien poistaminen ja muuttaminen tasokannatinpalkkien alle tuleviksi kannatintuiksi olisi saanut taipumat hallintaan.



KUVA 9. Porrastornin runkorakenteen siirtymät tornin yläpäässä (Jarno Blomberg)

Mechanica-tarkastelussa huomattiin, että vaakakuormat pyrkivät tekemään mallille niin sanottua salmiakkiefektiä (kuva 10). Todellisuudessa portaat estävät tämänsuuntaiset siirtymät, joten tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina. Saatuja tuloksia esitetään tarkemmin liitteessä 2.



KUVA 10. Siirtymät ylhäältä kuvattuna. Vaakakuormitukset pyrkivät aiheuttamaan runkorakenteeseen niin sanotun salmiakkiefektin (Jarno Blomberg)

Käsinlaskennalla ja Mechanicalla saadut profiilivalinnat esitellään taulukossa 12. Verrattaessa taulukon 13 käsinlaskennan ja Mechanican tuloksia huomataan, että käsinlaskennalla saadut profiilit ovat pienempiä ja näin ollen suuntaa antavia. Profiilien poikkileikkauksia jouduttiin Mechanicassa hieman suurentamaan, jotta siirtymät pysyivät sallituissa rajoissa. Käsinlaskennalla ei saatu määritettyä vaakapalkin todellisia kuormitusarvoja. Todellinen kuormitus muodostuu useiden eri kuormitusten yhteisvaikutuksesta. Tästä syystä vaakapalkiksi on valittu vähintään diagonaaliprofiilin suuruinen profiili. Profiiliksi valitaan aina käsinlaskennan ja Mechanican tuloksista saatu suurempi profiili, jotta rakenne varmasti kestää.

TAULUKKO 13. Lujuustarkastelutuloksien vertailu

	Käsinlaskenta	Mechanica	Valitaan
Pystypilari	RHS 150x150x6	RHS 150x150x10	RHS 150x150x10
Tasokannatinpalkki	RHS 150x150x6	RHS 150x150x10	RHS 150x150x10
Vaakapalkki	RHS 80x80x5	RHS 80x80x6	RHS 80x80x6
Diagonaali	RHS 80x80x5	RHS 100x100x5	RHS 100x100x5

7 JATKOTOIMENPITEET

Opinnäytetyötä tehdessä SafeGo Oy:ssä on meneillään suuri muutosvaihe. Yritys on siirtymässä 2D-suunnittelujärjestelmästä 3D-suunnittelujärjestelmän käyttöön. Opinnäytetyö tukee tätä prosessia ja toimii eräänlaisena suunnannäyttäjänä muutokselle. Yrityksessä on kehitteillä tai tullaan kehittelemään opinnäytetyössän tekemäni runkorakenteen parametrinen mallin kaltaisia 3D-suunnitteluautomaatteja. Tuotteita voidaan jatkossa myös liittää toisiin automaatteihin. Tulevaisuudessa porrastornin runkorakenne voi hakea tarvittavat parametrit esimerkiksi suoran portaan automaattista ja näin rakentua juuri sellaiseksi runkorakenteeksi, kuin suora porras tarvitsee ympärilleen.

Myös kyseisessä porrastornin runkorakenteen parametrisessa 3D-mallissa riittää paljon jatkokehitystä. Opinnäytetyötä jouduttiin rajaamaan työn aiheen laajuuden vuoksi melko paljon. Näitä rajauksia voi jatkokehityksessä ottaa huomioon. Kehityskohteita voivat olla esimerkiksi muiden profiilien kuin neliönmuotoisten RHS-profiilien käyttö. Palkkeina ja pilareina voisivat olla esimerkiksi suorakaiteen muotoiset RHS-profiilit tai HEA-, HEB-profiilit tai pienemmissä torneissa SafeGon itse valmistama C-profiili. Muita profiileja liitettäessä parametrien määrä muuttuu ja esimerkiksi palkkien liittäminen toisiinsa on mietittävä uudestaan.

Toisena kehityksen kohteena voisi olla parametriseen malliin liitettävä verhoilu. Malliin lisättäisiin parametri, jolla määritetään onko torni verhoiltu ja millä materiaalilla. Sama toimintaperiaate käy myös kattorakenteeseen. Tämän opinnäytetyön runkorakenne on automaattisesti nelipilarinen. Todellisuudessa pilareiden määrä voi vaihdella kahdesta pilarista jopa kahdeksaan pilariin. Pilareiden määrän vaihtuvuus on myös toteutettavissa. Tornin rakennetta voi myös ajatella uusiksi siten, että portaat ikään kuin tulisivat runkorakenteen kehän ulkopuolelle. Myös porrastornin runkorakenteen optimointityötä on syytä tarkastella lisää. Optimoinnissa on tehtävä tornista erikokoisia ja -korkuisia malleja, jolloin kuormitukset muuttuvat sekä kokeilla aiemmin mainittuja eri profiilityyppejä kantaviksi rakenteiksi.

8 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tehdä suoran portaan porrastornin kantavasta runkorakenteesta parametrinen 3D-malli ja optimoida runkorakenteen rakennetta. Tuloksena saatiin aikatauluun nähden varsin hyvä parametrinen malli. Parametrisyys toimii mallissa odotettua paremmin ja runkorakenteella on varsin suuri muunneltavuus. Optimointityö jäi aikataulun vuoksi hieman odotettua suppeammaksi, mutta rakenne saatiin kuitenkin optimoitua ja lujuustarkasteltua.

Työ antaa hyvän pohjan yritykselle kehittää kyseisen runkorakenteen optimointityötä sekä laajentaa parametrisyyttä myös muiden tuotteiden mallien luomiseen. Parametrinen malli varmasti nopeuttaa suunnittelutyötä ja helpottaa myyntityötä kustannusten laskennassa. Myyjät voivat parametrisen mallin avulla mallintaa itse asiakkaiden lähtötietojen perusteella porrastornin, ja näin asiakas saa kokonaisvaltaisen kuvan siitä, mitä on tilaamassa.

Opinnäytetyön aikataulua suunniteltaessa aliarvioitiin parametriseen mallintamiseen kuluva aika. Parametrisen mallin rakentaminen vei odotettua enemmän aikaa ja näin optimointityö jäi suunniteltua suppeammaksi. Työn aihetta jouduttiin hieman rajaamaan työn edetessä.

Opinnäytetyö oli opettavainen prosessi. Työ oli hyvin laaja ja antoi kokonaisvaltaisen kuvan teräsrakennesuunnittelusta. Työssä pääsin tutustumaan parametriseen mallintamiseen. Pääsin myös perehtymään entistä syvällisemmin Creo-ohjelmistoon ja tämän ohjelmointiin, mistä on varmasti tulevaisuudessa paljon hyötyä. Sain myös tutustua paremmin Creo-ohjelman sisältämään Mechanica-lisäosaan. Sen tarjoama lujuusohjelman hallinta ja käsinlaskennalla opitut laskentatavat ovat varmasti hyödyksi tulevaisuudessa. Opin ja hyödyin koko prosessista hyvin paljon ja uskon myös yrityksen hyötyvän opinnäytetyöni tuloksista.

LÄHTEET

Andersson, D. 2010. *Design for manufacturability*. [verkkojulkaisu] [viitattu 11.4.2010]. Saatavissa: http://www.design4manufacturability.com/DFM_article.htm

Boverkets. 1999. *Boverkets konstruktionsregler BFS 1993:58 : med ändringar t.o.m. BFS 1998:39*. Karlkrona: Boverket Publikationsservice.

Hietikko, E. 2004. *Palkki - Lujuuslaskennan perusteet*. Kuopio: Otava.

Hietikko, E. 2007. *SolidWorks -tietokoneavusteinen suunnittelu*. Kuopio: Savonia ammattikorkeakoulun julkaisusarja.

Katainen, J. 2010. *Teräsportaiden palomitoitus ja -testaus*. Oulu: Oulun yliopisto Konetekniikan osasto. Diplomityö

Kinnunen, J., Saarinen, E., Tiira, S., Ulvinen, S. & Väänänen, E. 2001. *Teräsrakenteiden suunnittelu*. 4. painos. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys r.y.

Koskela, K. 2007. *Peruspulttiliitoksen toiminta ja mitoittaminen eurokoodin mukaan*, Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö [viitattu 4.4.2012].

Saatavissa:

<https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/9661/Koskela.Kaarle.pdf?sequence=2>

Outinen, H., Salmi, T. & Vulli, P. 2007. *Lujuusopin perusteet*. Tampere: Pressus Oy.

Piironen, T. 2011. *DFM - valmistuskustannukset*. Luentomateriaali. Kuopio: Savonia ammattikorkeakoulu.

RakMK B7. 1996. *Suomen rakentamismääräyskokoelma B7*. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Saarni, R. 1996. *Teräsrakentaminen*. 3. painos. Espoo: Tampereen teknillinen korkeakoulu ja Rakennutieto Oy.

Sajaniemi, R. 1968. *Rakenteiden suunnittelu ja optimointi*. [verkkojulkaisu] [viitattu 12.1.2012]. Saatavissa: http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/1968/nro3-4/RakMek_1_3-4_1968_1.pdf

SFS-EN 1991-1-1. 2002. *Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset Kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

SFS-EN 1991-1-3. 2003. *Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat*. Helsinki: Suomen standardisoimisliittos SFS.

SFS-EN 1991-1-4. 2005a. *Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat. Osa 1-4: tuulikuormat*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1993-1-1. 2005b. *Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu..* Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

SFS-EN 1993-1-8. 2005c. *Eurocode 3:Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten suunnittelu*, Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 1988. *RIL 167-1 Teräsrakenteet I*, Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Suomen rakennusinsinöörien liitto. 2010. *Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat : eurokoodit EN 1990, EN 1991-1-1, EN 1991-1-3 ja EN 1991-1-4 : RIL 201-1-2008*, Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto.

Taipale, J. 1999. *Rakenteiden taloudellinen optimointi*. Espoo: Teknillisen korkeakoulun mekaniikan laboratorio.

Teräsrakenneyhdistys ry. 2010. *Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus - Eurocode 3-oppikirja*. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.