



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MARKUS KOTISAARI

**SARJAPARISTON LUJUUSLASKENTA SEISMISISSÄ  
OLOSUHTEISSA**

Diplomityö

Tarkastajat: professori Reijo Kouhia ja  
yliopistonlehtori Sami Pajunen  
Tarkastajat ja aihe hyväksytty Automaatio,  
kone- ja materiaalitekniikan tiedekuntaneu-  
voston kokouksessa 5. joulukuuta 2012

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

**KOTISAARI, MARKUS:** Sarjapariston lujuuslaskenta seismisissä olosuhteissa

Diplomityö, 77 sivua

Tammikuu 2013

Pääaine: Konstruktitekniikka

Tarkastajat: professori Reijo Kouhia ja yliopistonlehtori Sami Pajunen

Avainsanat: Vastespektri-menetelmä, värähtely, sarjaparisto, hitausvoima

Sarjaparisto liitetään sähkölinjaan tarkoituksenaan kompensoida loistehoa sähkönsiirrossa. Koska sähkönsaanti on turvattava kaikissa olosuhteissa, sarjaparisto mitoitetaan kestäväksi suuria kuormituksia. Suuret kuormitukset aiheutuvat tuulen aiheuttamista voimista, jääkerroksen aiheuttamasta massan kasvusta ja maanjäristyksen aiheuttamista hitausvoimista. Tässä diplomityössä suoritettiin lujuusanalyysi Hydro-Quebec:lle toimittuihin sarjaparistoihin liittyen. Tärkeä osa työtä oli vastespektrimenetelmän ymmärtäminen ja siihen perustuva laskenta maanjäristysten aiheuttamia rasituksia määrittäessä.

Sarjapariston mallinnus ja analysointi suoritettiin elementtimenetelmään perustuvalla Ansys 14.0 –lujuuslaskentaohjelmalla. Huomattiin, että tärkeä osa analyysiä on tehokkaan laskentamallin muodostaminen, koska ratkaistavia kuormitustapauksia on paljon. Ohjelma soveltuu hyvin sarjapariston seismiseen analyysiin. Toisaalta haruspareja olisi hyvä tutkia kokeellisesti, koska köysimäisen luonteensa johdosta niiden käyttäytyminen on epälineaarista ja vastespektrimenetelmä perustuu lineaariseen rakennemalliin. Tässä työssä epälinearisuuden ongelma ratkaistiin poistamalla haruspareista aina toinen ja mallintamalla jäljelle jäänyt harus sauva-elementillä.

Sarjapariston haastavimmiksi kuormitustapauksiksi tulivat osien maksimirasituksia tarkastelemalla staattisista kuormitustapauksista lavan pitkän sivun suuntaiset tuulenpuuskat, dynaamisista kuormitustapauksista maanjäristyksen ja jääkerroksen yhdistetty kuormitus ja erityiskuormitustapaus, joka on tuulen aiheuttaman voiman ja jääkerroksen yhdistelmä rikkiäiselle rakenteelle. Sarjaparisto kestää hyvin kaikissa kuormitustapauksissa. Ainoa tapaus, jossa asiakkaan antamat varmuusluvut alittuvat on tuulenpuuskat, jolloin yhden rakenteen osan varmuusluvut ovat pienemmät kuin asiakkaan vaatimat. Toisaalta tuulen aiheuttamat voimat on laskettu varsin konservatiivisesti ja sen tähden voidaan olettaa näidenkin eristimien kestäväksi hyvin myös tuulenpuuskissa.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

**KOTISAARI, MARKUS:** Structural analysis of a series capacitor bank

Master of Science Thesis, 77 pages

January 2013

Major: Mechanics and Design

Examiner: Professor Reijo Kouhia and Associate Professor Sami Pajunen

Keywords: Response spectrum –method, vibration, series capacitor bank, inertia force, complete quadratic combination

Series capacitor bank is connected to power line to compensate reactive power in transmission. Because the supply of electricity must be guaranteed in all conditions, series capacitor bank is designed to withstand massive loads. The massive loads are a result of forces caused by wind, the increased mass of the structure caused by ice layer and inertia forces caused by earthquakes. In this work a structural analysis was performed for series capacitor banks that were supplied to Hydro-Quebec. An important part of the work was the understanding and the ability to use the response spectrum method that is used in calculating of earthquake loads.

The simulation and the analysis were done with a Finite Element Method -based structural analysis software Ansys 14.0. It was discovered that an essential part of the analysis is the building of an efficient analysis model, because there are many loading cases. Ansys 14.0 software was found suitable for the seismic analysis of series capacitor bank. On the other hand it would be good to study pairs of suspension insulators (guys) experimentally, because their stiffness is nonlinear and the response spectrum method is based on linear stiffness of a structure. In this work the problem of nonlinearity was solved by removing a guy of each pair and switching the remaining guy into a compression-tension-bar.

The most challenging loading cases when examining the forces and stresses on the structure were found to be the static cases with a wind load in the direction of the longer side of the platform, the dynamic cases with ice layer and a special loading case where the loading is caused by wind and ice layer on a broken structure. The series capacitor bank withstands in all the loading cases. The only case where the customers safety factors are passed are strong winds. In those cases the safety factors of the insulators of Spark Gap 2 are passed. On the other hand the forces that are used for wind loading are quite conservative and for that reason we can assume that those insulators withstand well also in strong wind.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen Teknillisen Yliopiston Konstruktitekniikan laitokselle vuoden 2012 aikana. Työn rahoituksen ja työtilat tarjosi Alstom Grid Oy:n PET-yksikkö.

Tahdon kiittää työni tarkastajia professori Reijo Kouhiala ja yliopistonlehtori Sami Pajusta työtä kohtaan osoittamastaan kiinnostuksesta ja neuvoista. Erityisesti tahdon kiittää esimiestäni Janne Kangasta monista sarjapariston rakenteeseen liittyvistä vastauksista ja kahden miehen aivoriihistä, jolloin pohdiskeltiin yhdessä työn sisältöä. Tämän työn tahdon omistaa vaimolleni Christinalle ja pojalleni Maxille, jotka olivat innoitukseni lähde ja syy tehdä työ nopeasti ja hyvin.

”Teittepä mitä hyvänne, tehkää kaikki Jumalan kunniaksi.”

Tampereella 30.11.2012

Markus Kotisaari

## SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
2	Sarjaparisto.....	2
	2.1 Rakenteelliset osat ja niiden ominaisuudet .....	2
	2.2 Sarjapariston kuormitustapaukset .....	4
3	Värähtelytehtävän teoriaa .....	6
	3.1 Dynamiikkaa .....	6
	3.2 Vastespektrimenetelmä .....	14
	3.3 Vaste usean vapausasteen värähtelijälle.....	22
	3.4 Kokonaisvaste .....	24
4	Sarjapariston lujuuslaskenta.....	27
	4.1 Suunnitteluvaatimukset.....	27
	4.2 Tehtävänanto .....	29
	4.3 Kuormat .....	32
	4.4 Analysoitavat kuormitustapaukset .....	36
	4.5 Sarjapariston lujuuslaskenta Ansys 14.0 -ohjelmalla.....	37
	4.6 Harukset analyysissä.....	46
	4.7 Tulosten saaminen ohjelmasta .....	49
5	Analyysin tulokset.....	51
	5.1 Tulokset kuormitustapauksissa 1-5 .....	55
	5.2 Tulokset kuormitustapauksissa 6-10.....	58
	5.3 Tulokset kuormitustapauksessa 11.....	61
	5.4 Ominaisarvoanalyysi.....	64
	5.5 Tulokset kuormitustapauksissa 13 ja 14 .....	67
	5.6 Tulokset kuormitustapauksissa 15 ja 16 .....	70
	5.7 Tulosten yhteenveto .....	73
6	Päätelmät.....	76
	Lähteet.....	77
	LIITE 1: Tulokset kuormitustapauksissa 1-5.....	78
	LIITE 2: Tulokset kuormitustapauksissa 6-10.....	88
	LIITE 3: Tulokset kuormitustapauksessa 12.....	98
	LIITE 4: Tulokset kuormitustapauksissa 13-14.....	100
	LIITE 5: Tulokset kuormitustapauksissa 15-16.....	104

## SYMBOLILUETTELO

A	Poikkipinta-ala
c	Viskoosi vaimennuskerroin
$c_k$	Kriittinen vaimennuskerroin
$\underline{D}$	Yksikkösuuntavektori
E	Kimmoenergia (kappale 3.2.3)
E	Kimmomoduuli
F	Normaalivoima
$\underline{F}$	Ulkoisten voimien vektori
$F_d$	Viskoosi vaimennusvoima
$F_i$	Hitausvoima
$F_s$	Jousivoima
f	Ominaistaaajuus
$f_s$	Sisäinen voima
g	Putoamiskiihtyvyys ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )
K	Jäykkyysmatriisi
K	Jousivakio komposiittivetoharuksen ja lautasjousipakan systeemille (kappale 4.5.3.2)
k	Jousivakio
$k_k$	Komposiittivetoharuksen jousivakio
$k_l$	Lautasjousipakan jousivakio
L	Pituus
M	Massamatriisi
$M_{\text{eff}}$	Tehollinen massa
$M_t$	Taivutusmomentti
m	Massa
N	Normaalivoima
PSA(t)	Näennäiskiihtyvyysvaste ajan funktiona
PSV(t)	Näennäisnopeusvaste ajan funktiona
p	Tuulen aiheuttama paine
R	Kiihtyvyysvaste
$R_a$	Kokonaiskiihtyvyysvaste
S	Lumen aiheuttama paine
T	Jakson aika, periodi
t	Aika
u	Siirtymä
$u_g$	Alustan siirtymäheräte
$\dot{u}$	Siirtymän ensimmäinen aikaderivaatta, nopeus
$\ddot{u}$	Siirtymän toinen aikaderivaatta, kiihtyvyys
$u_0(f, \zeta)$	Siirtymävastespektri taajuudella f ja suhteellisella vaimennuskertoimella $\zeta$

$\ddot{u}_g$	Alustan kiihtyvyysheräte
$W$	Taivutusvastus
$X$	Koordinaattiakseli lavan pidemmän sivun suunnassa
$Y$	Koordinaattiakseli lavan lyhyemmän sivun suunnassa
$Z$	Koordinaattiakseli pystysuunnassa ylöspäin
$\alpha$	Lämpölaajenemiskerroin
$\gamma$	Osallistumiskerroin
$\Delta L$	Pituuden muutos
$\Delta T$	Lämpötilan muutos
$\varepsilon$	Venymä
$\zeta$	Suhteellinen vaimennuskero
$\sigma_t$	Taivutusmomentin aiheuttama normaalijännitys
$\sigma_{\text{vert}}$	Vertailujännitys
$\sigma_x$	Normaalivoiman aiheuttama normaalijännitys
$\varphi$	Ominaismuotovektori
$\omega$	Ominaiskulmataajuus

# 1 JOHDANTO

Maanjäritykset saavat aikaan tuhoisaa jälkeä ympäri maailmaa. Sen tähden rakennukset ja muut tärkeät rakennelmat on usein analysoitu mahdollisen maanjärityksen suhteen. Erittäin tärkeää on varmistaa sähkönsaanti alueilla maanjärityksen sattuessa ja sen jälkeen. Tämän takia varsinaisten voimalaitosten lisäksi myös sähkönsiirtolinjojen tulee kestää. Tärkeä sähkölinjoihin liittyvä komponentti on sarjaparisto.

Sarjaparistoa käytetään kompensoimaan loistehoa sähkönsiirtolinjoissa. Se lisää linjojen tehonsiirtokapasiteettia ja mahdollistaa pidemmät siirtoetäisyydet. Sarjaparistoon kuuluvia laitteita ovat kondensaattorit, MOV-yksiköt, vaimennuspiirin kela ja lineaarivastus, DMOV-yksiköt, kipinäkopit, virtamuuntajat, lavakaapit ja ohituskatkaisija.

Tässä diplomityössä on tarkoitus tehdä sarjaparistolle lujuusanalyysi, mihin kuuluu oleellisena osana maanjärityskiihtyvyydet ja niistä aiheutuvat rasitukset. Analysoitavia osia sarjaparistossa ovat sarjaparistolavan ja sen päällä olevien laitteiden tukirakenteet. Näitä ovat teräspalkit, posliiniset eristimet ja komposiittivetoharukset. Analyysi tehdään Kanadalaiselle sähköyhtiölle, Hydro-Quebecille, toimitettuihin sarjaparistoihin liittyen. Tästä syystä sarjapariston tulee täyttää Hydro-Quebecin erityisvaatimukset seismisiin ja muihin kuormituksiin liittyen. Maanjärityskiihtyvyydet otetaan huomioon vastespektrimenetelmän avulla.

Tärkeä osa diplomityötä on oppia käyttämään elementtimenetelmään perustuvaa Ansys-lujuuslaskentaohjelmistoa ja ratkaista sen avulla sarjaparisto-rakenteen suurimmat rasitukset niin staattisissa kuin dynaamisissakin kuormitustapauksissa.



## 2 SARJAPARISTO

Tässä kappaleessa esitellään sarjaparistoa kokonaisuudessaan sekä sen analysoitavien osien ominaisuuksia sekä eri kuormia, joita sarjapariston tulee kestää. Sarjaparisto kytetään linjajännitteeseen. Sen päälaitteita ovat kondensaattorit. Muiden laitteiden merkitys on olla suojaamassa niitä. Lava itsessään eristetään maasta ja lisäksi laitteet lavan päällä eristetään siitä.

### 2.1 Rakenteelliset osat ja niiden ominaisuudet

Seuraavaksi käydään läpi sarjapariston rakenneosia ja niiden mekaanisia ominaisuuksia. Käsitellään myös eri osien vaikutusta lavan liikkeisiin.

#### 2.1.1 Teräspalkit

Lava on rakennettu erikokoisista I-teräspalkeista varsin jäykäksi kehikoksi. Ensisijaiset (suurimmat) palkit asetetaan lavan pidemmän sivun suuntaisesti ja toissijaiset (toiseksi suurimmat) lavan lyhyemmän sivun suuntaisesti ensisijaisten palkkien päälle. Ensisijaiset ja toissijaiset palkit muodostavat perustan lavan jäykkyydelle. Lisäksi ensisijaiset palkit on kiinnitetty toisiinsa pienemmillä L-palkeilla. Tosin L-palkkien merkitys on lähinnä olla helpottamassa asennusta.

Useimpien laitteiden alla on lisäksi pienemmistä I-palkeista muodostettu pienempi kehikko tuomassa jäykkyyttä ja siten suojaamassa laitteita ja niitä kannattelevia eristimiä. Lavan päällä on myös teräsritilä, joka helpottaa sen päällä liikkumista.



Kuva 2.1. Kuvassa näkyy teräspalkkien asettelu lavassa.

### 2.1.2 Posliinieristimet

Teräslavan päällä olevia laitteita ei rakenneta suoraan lavaan vaan eristyksen takia posliinieristimien päälle. Posliini on materiaalina huomattavasti haastavampi kuin teräs. Teräs kestää hyvin vetoa ja puristusta, mutta posliini hauraana materiaalina kestää vetoa huonosti. Vetojännitystä ei aiheuta posliinieristimille niinkään aksiaalinen voima vaan taivutusmomentti. Taivutusmomentti aiheutuu eristimien jäykästä kiinnityksestä teräslavaan.



*Kuva 2.2. Kuvassa näkyy laitteiden alla oleva palkkirakenne, eristimiä ja teräsritilä.*



*Kuva 2.3. Kuvassa näkyy lavan alla olevat posliiniset pystyeristimet ja komposiittiveto-harukset.*

Lava on eristetty maasta pitkällä (yli 5 m) posliinisilla pystyeristimillä, jotka on nivelöity molemmista päistään. Nivel ei ota vastaan taivutusmomenttia ja sen takia pystyeristimille aiheutuu vain aksiaalisia voimia. Pystyeristimet kannattelevat lavaa ja niille aiheutuukin suuret puristusvoimat.

### **2.1.3 Harukset**

Lavan vaakasuuntaista translaatioliikettä rajoittaa komposiittivetoharukset. Harukset toimivat kuin köydet, eli ne ottavat vastaan vain vetoa. Haruksien kanssa sarjaan voidaan asentaa lautasjousipakka, jolla pienennetään haruksen jäykkyyttä. Näin voidaan alentaa lavan värähtelyn ominaistajuuksia turvallisemmalle taajuusalueelle.

### **2.1.4 Lavan liike**

Sarjapariston rakenne tehdään sellaiseksi, että teräslava itsessään ja sen päälle asennetut laitteet liikkuvat yhdessä. Kaikki lavalla olevat laitteet ovat pystyeristimien päällä jäykästi kiinni teräslavassa. Lavalla olevien laitteiden suhteelliset siirtymät lavaan nähden pyritään näin pitämään pieninä. Toisaalta lavan itsessään annetaan liikkua vaakasuunnassa suhteellisen paljon. Näin pystytään pienentämään lavan päällä oleville laitteiden eristimille aiheutuvia taivutuskuormituksia.

## **2.2 Sarjapariston kuormitustapaukset**

Tyypilliset kuormitustapaukset, joita sarjapariston tulee kestää aiheutuvat omasta painosta, tuulesta, lumesta ja jäästä sekä maanjäristyksistä. Lisäksi tarkastellaan lämpötilavaihteluiden aiheuttamia kuormitustapauksia sekä erityistapauksia, jolloin jokin lavan tukirakenteista pettää. Kuormitukset vaihtelevat sarjapariston sijainnin mukaan. Toisessa sijainnissa merkitsevimmäksi tapaukseksi voi tulla tuulikuorma ja toisessa maanjäristykset.

### **2.2.1 Oma paino**

Laitteiden alla oleva teräslava on rakennettu isoista I-palkeista ja muista teräsrakenteista, jotka jo itsessään ovat raskaita. Muu paino aiheutuu pääosin laitteista, kuten kondensaattoreista, reaktorista ja kipinäkopeista. Lavan alla olevat pystyeristimet ovat myös raskaita. Sarjapariston oma paino aiheuttaa merkittäviä rasituksia lähinnä ensi- ja toissijaisille palkeille sekä lavan alla oleville pystyeristimille. Teräslavan massa on sarjaparistoilla välillä 5 – 30 tonnia ja koko sarjapariston massa on välillä 50 – 170 tonnia.

### **2.2.2 Tuuli**

Tuulen aiheuttama kuormitus on paineen kaltainen. Mitä suuremmalle pinta-alalle tuuli kohdistuu, sitä suurempi on sen aiheuttama kokonaisvoima. Tuulen nopeudella on myös

suuri merkitys aiheutuvan voiman suuruuteen. Tuulen aiheuttaman paineen voidaan ajatella olevan verrannollinen sen nopeuden neliöön.

Tuuliolosuhteita tarkasteltaessa voidaan joutua ottamaan huomioon normaalit tuuliolosuhteet sekä tuulenpuuskat. Tuulenpuuskat ovat äärimmäistapauksia tuulen nopeudelle ja niiden aiheuttamat tuulivoimat voivat olla moninkertaiset normaaliin olosuhteisiin nähden.

Tuulivoiman huomioimisessa joudutaan tekemään eri päätöksiä. Ensinnäkin tulee päättää miten sen voimakkuus lasketaan. Kohdemaassa voidaan edellyttää jonkin tietyn laskentastandardin käyttöä, mistä saadaan ohjeet tuulen aiheuttaman paineen laskemiseen. Toiseksi pitää päättää mihin tuuli kohdistuu. Onko osa rakenteesta tuulensuojassa vai kohdistuuko tuulivoima kaikkiin pintoihin.

### **2.2.3 Lumi ja jää**

Lumi ja jää aiheuttavat sarjaparisto-lavalle massan lisääntymistä. Massa lasketaan lumitai jääkerroksen paksuudesta, vaikutuspinta-alasta ja tiheydestä. Lumen vaikutus voidaan myös määritellä alaspäin suuntautuvana paineena, jota korjataan kertoimilla, jotka ottavat huomioon esimerkiksi sateen aiheuttaman paineen. Jääkuorman vaikutus voidaan laskea rakenteen pinta-alojen avulla. Jääkerroksen paksuus kerrottuna vaikutuspinta-alalla saadaan jään tilavuus, mikä aiheuttaa tiheyden kautta massan lisääntymistä.

### **2.2.4 Maanjäristys**

Maanjäristyksen aiheuttama kuormitus määritellään usein kiihtyvyysspektrinä, mikä aiheutuu rakenteeseen maassa kiinni olevien tukien kautta. Rakenteen saamat kiihtyvyydet aiheuttavat massojen kautta hitausvoimia. Maanjäristysherkillä alueella hitausvoimat saattavat aiheuttaa suurimpia kuormitustapauksia. Maanjäristys voi vaikuttaa useampaan eri suuntaan samanaikaisesti.

### **2.2.5 Yhdistetyt kuormitustapaukset**

Eri kuormitustyypin äärimmäistapauksien lisäksi tarkastellaan vielä yhdistettyjä tapauksia, jolloin useampi eri kuormitustyyppi aiheutuu samanaikaisesti. Esimerkiksi tuuli- ja jääkuorma tai jää- ja maanjäristyskuorma vaikuttavat samanaikaisesti.

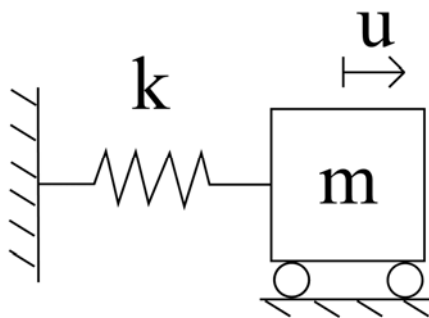
## 3 VÄRÄHTELYTEHTÄVÄN TEORIAA

Tässä kappaleessa esitellään värähtelyyn liittyviä dynamiikan käsitteitä ja suureita. Käytetään havainnollistamiseen yhden- ja kahden vapausasteen värähtelijää. Lisäksi esitellään vastespektrimenetelmä, jota käytetään myöhemmin maanjäristysrasitusten laskennassa. Sarjapariston värähtelyominaisuuksien tunteminen on tärkeä osa maanjäristyskuormien laskennassa.

### 3.1 Dynamiikkaa

Sarjaparistoon kohdistuu staattisten rasitusten lisäksi dynaamisia kuormia. Staattisia voimia ovat paino, tuulivoimat ja lämpötilavaihteluista aiheutuvat voimat. Dynaamiset voimat puolestaan aiheutuvat maanjäristyskiihtyvyyksistä. Maanjäristys aiheuttaa ajan mukana muuttuvan kiihtyvyyden, mistä usein ratkaistaan rakenteelle aiheutuva kiihtyvyysspektri. Dynaamisten rasitusten laskeminen vaatii rakenteen dynaamisten ominaisuuksien tuntemista. Seuraavaksi esitellään dynamiikan perussuureita esimerkkien avulla. Käytetään yhden ja kahden vapausasteen värähtelijöitä havaintoesimerkkeinä.

#### 3.1.1 Ominaiskulmataajuus



Kuva 3.1. Kuvassa on yhden vapausasteen vaimentamaton värähtelijä.

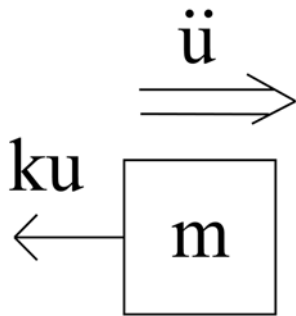
Kuva 3.1 esittää yhden vapausasteen vaimentamatonta värähtelijää. Kuvan kappaleeseen vaikuttaa kahdenlaisia voimia, jotka vaikuttavat sen liikkeisiin, jousivoima  $F_s$  ja hitausvoima  $F_i$ . Jousivoima on jousivakion ja siirtymän tulo, eli

$$F_s = ku \tag{1}$$

Jousivoima on palautusvoima, mikä pyrkii aina palauttamaan systeemin sen tasapainoasemaan. Jousivakio  $k$  määritellään sen voiman suuruudeksi, mikä aiheuttaa kappaleelle yksikön suuruisen siirtymän. Hitausvoima on massan ja kiihtyvyyden tulo, eli

$$F_i = m\ddot{u} \quad (2)$$

Hitausvoiman suunta on kiihtyvyydelle vastakkainen, se siis pyrkii vastustamaan systeemin nopeuden muutosta. Muodostetaan kuvan systeemistä vapaakappalekuva ja kirjoitetaan voimista tasapainoyhtälö.



Kuva 3.2. Kuvassa on yhden vapausasteen vaimentamattoman värähtelijän vapaakappalekuva.

$$\rightarrow \quad -ku - m\ddot{u} = 0 \quad (3)$$

Merkitsemällä vielä

$$\omega = \sqrt{k/m} \quad (4)$$

saadaan tasapainoyhtälö muotoon

$$\ddot{u} + \omega^2 u = 0 \quad (5)$$

Yhtälö 5 kuvaa kappaleen liikettä sen jälkeen kun se on poikkeutettu tasapainoasemaansa ja päästetty irti. Kappale värähtelee tasapainoasemansa molemmin puolin ja sen ominaiskulmataajuus on  $\omega$ . Ominaisaajuus määritellään ominaiskulmataajuuden avulla

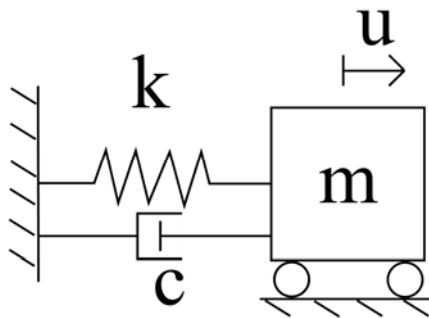
$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad [\text{Hz}] \quad (6)$$

ja jaksonaika ominaisaajuuden käänteislukuna

$$T = \frac{1}{f} \quad [\text{s}] \quad (7)$$

Jaksonaika kuvaa aikaa minkä jälkeen värähtelevä kappale on jälleen samassa asemassa.

### 3.1.2 Vaimennus

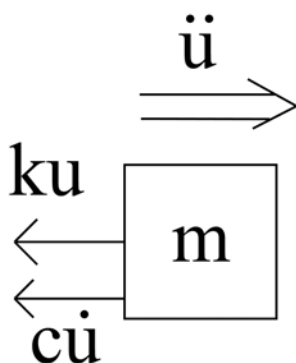


Kuva 3.3. Kuvassa on yhden vapausasteen vaimennettu värähtelijä.

Kuvassa 3.3 on kuvattu yhden vapausasteen viskoosisesti vaimennettu värähtelijä. Ero- na vaimentamattomaan tapaukseen jousivoiman ja hitausvoiman lisäksi on mukana vis- koosi vaimennusvoima  $F_d$ . Se määritellään vaimennuskertoimen ja nopeuden tulona

$$F_d = c\dot{u} \quad (8)$$

Vaimennusvoima on liikkeen suunnalle vastainen. Jos systeemissä ei olisi vaimennusta, värähtely ei loppuisi ikinä. Muodostetaan systeemistä vapaakappalekuva.



Kuva 3.4. Kuvassa on yhden vapausasteen vaimennetun värähtelijän vapaakappaleku- va.

Kirjoitetaan vapaakappalekuvasta tasapainoyhtälö

$$\rightarrow \quad -ku - c\dot{u} - m\ddot{u} = 0 \quad (9)$$

$$\ddot{u} + \frac{c}{m}\dot{u} + \frac{k}{m}u = 0 \quad (10)$$

Yhtälö 10 voidaan ratkaista sijoituksella  $u(t) = e^{\lambda t}$ , jolloin päästään muotoon

$$\lambda^2 + \frac{c}{m}\lambda + \frac{k}{m} = 0 \quad (11)$$

Yhtälöllä 11 on kaksi ratkaisua, jotka riippuvat vaimennuskertoimen  $c$  suuruudesta. Jos yhtälön diskriminantti on nolla, on sillä vain yksi juuri. Sitä  $c$ :n arvoa, jolloin diskriminantti on nolla, eli

$$\left(\frac{c_k}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m} = 0 \quad (12)$$

$$c_k = 2m\sqrt{\frac{k}{m}} = 2m\omega \quad (13)$$

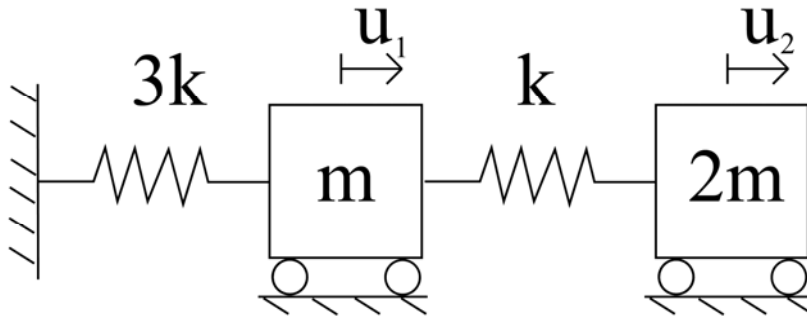
sanotaan kriittiseksi vaimennuskertoimeksi. Se kuvaa pienintä vaimennuskerrointa, joka estää systeemiä oskilloimasta. Suhteellinen vaimennus määritellään vaimennuskertoimen ja kriittisen vaimennuskertoimen suhteella

$$\zeta = \frac{c}{c_k} \quad (14)$$

### 3.1.3 Ominaispari

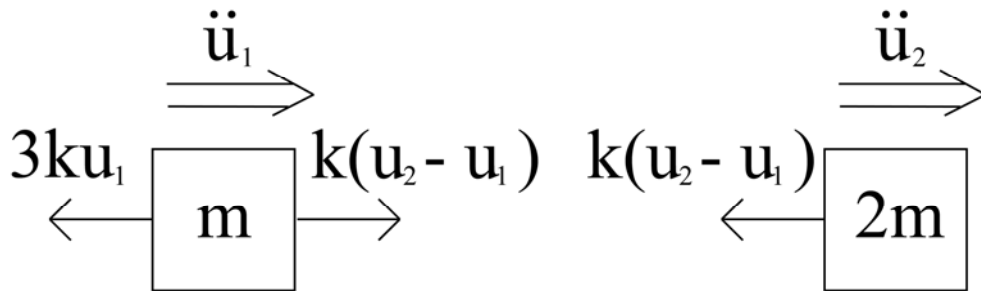
Ominaisparilla tarkoitetaan ominaiskulmataajuuden ja ominaismuodon yhdistelmää. Ominaiskulmataajuus vastaa kysymykseen millä kulmataajuudella rakenne värähtelee, ominaismuoto vastaa siihen miten rakenne värähtelee kyseisellä ominaiskulmataajuudella. Havainnollistetaan ominaismuotoa seuraavanlaisella kahden massallisen vaunun ja kahden jousen systeemillä.





Kuva 3.5. Kuvassa on kahden vapausasteen vaimentamaton värähtelijä.

Massat ovat pistemäisiä ja kummallakin on vain yksi vapausaste. Muodostetaan tilanteesta kaksi vapaakappalekuvaa ja kirjoitetaan niiden mukaiset tasapainoyhtälöt.



Kuva 3.6. Kuvassa on kahden vapausasteen vaimentamattoman värähtelijän vapaakappalekuva.

$$1. \leftarrow m\ddot{u}_1 + 3ku_1 - k(u_2 - u_1) = 0 \quad (15)$$

$$2. \leftarrow 2m\ddot{u}_2 + k(u_2 - u_1) = 0 \quad (16)$$

Kirjoitetaan yhtälöt matriisimuodossa

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & 2m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 4k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\Rightarrow M\ddot{\underline{u}} + K\underline{u} = \underline{0} \quad (18)$$

Yhtälö on samannäköinen yhden vapausasteen värähtelijän yhtälön 3 kanssa sillä erolla, että suureet ovat nyt vektoreita ja matriiseja. Matriisiyhtälön toteuttaa mm. sinifunktio, jolla on seuraava ominaisuus

$$\underline{u}(t) = q \sin(\omega t) \quad (19)$$

$$\underline{\dot{u}}(t) = \omega q \cos(\omega t) \quad (20)$$

$$\underline{\ddot{u}}(t) = -\omega^2 q \sin(\omega t) = -\omega^2 u(t) \quad (21)$$

Yhtälö 21 kirjoitetaan muotoon

$$(-\omega^2 M + K)\underline{q} \sin(\omega t) = \underline{0} \quad (22)$$

Tehdään vielä sijoitus

$$\omega^2 = \lambda \quad (23)$$

$$(-\lambda M + K)\underline{q} \sin(\omega t) = \underline{0} \quad (24)$$

Epät triviaali ratkaisu saadaan kun matriisiosan determinantti on nolla, eli

$$\det(-\lambda M + K) = 0 \quad (25)$$

Ratkaistaan  $\lambda$ :n arvot.

$$\begin{aligned} \det\left(-\lambda \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & 2m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 4k & -k \\ -k & k \end{bmatrix}\right) &= \begin{vmatrix} 4k - \lambda m & -k \\ -k & k - 2\lambda m \end{vmatrix} = (4k - \lambda m)(k - 2\lambda m) - k^2 \\ &= 2\lambda^2 m^2 - 9\lambda m + 3k^2 = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

$$\Rightarrow \lambda_{1,2} = \frac{9mk \pm \sqrt{(9mk)^2 - 4 \cdot 2m^2 \cdot 3k^2}}{2 \cdot 2m^2} = \left(\frac{9}{4} \pm \sqrt{\frac{57}{16}}\right) \frac{k}{m} \quad (27)$$

Kummallekin ratkaisulle saadaan myös ominaismuoto. Ominaismuodolla ei ole absoluuttista arvoa, vaan siinä tarkastellaan systeemin vapaa-asteita kuvaavien komponenttien suhteita. Yksi tapa ratkaista ominaismuoto on ratkaista seuraava yhtälö siten, että yksi vektorin  $\underline{q}$  komponenteista asetetaan ykkösen suuruiseksi ja ratkaistaan muut komponentit:

$$(-\lambda M + K)\underline{q} = \underline{0} \quad (28)$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} 4k - \lambda m & -k \\ -k & k - 2\lambda m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$\lambda$ :n arvoja vastaavat ominaiskulmataajuudet ja ominaismuodot ovat

$$\lambda_1 \approx 0,363k/m, \quad \omega_1 \approx 0,602\sqrt{k/m}, \quad \underline{\varphi}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 3,638 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\lambda_2 \approx 4,137k/m, \quad \omega_2 \approx 2,034\sqrt{k/m}, \quad \underline{\varphi}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -0,137 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Kahden vaunun systeemi värähtelee  $\omega_1$ -kulmataajuudella siten, että vaunun kaksi siirtymä on noin kolme ja puoli kertaa saman suuruinen kuin vaunun yksi. Sama systeemi värähtelee  $\omega_2$ -kulmataajuudella siten, että vaunun kaksi siirtymä on noin seitsemäsosa ja vastakkaisuuntainen vaunun yksi siirtymään. Ominaismuodot on mahdollista normeerata eri tavoilla. Yksi tapa on normeerata arvot massamatriisin suhteen. Normeeraataan nyt ominaismuodot massamatriisin suhteen siten, että

$$\underline{\varphi}_i^T M \underline{\varphi}_i = 1 \quad (32)$$

Normeeratut ominaismuodot ovat

$$\underline{\varphi}_1 = \begin{bmatrix} 0,1908 \\ 0,6941 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (33)$$

$$\underline{\varphi}_2 = \begin{bmatrix} 0,9817 \\ -0,1345 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (34)$$

Koska normeerausyhtälössä 32 yhtälön oikealla puolella oli 1 sanotaan, että modaali-massa on 1 ja siihen liittyvät ominaismuodot ovat  $\underline{\varphi}_1$  ja  $\underline{\varphi}_2$ . Laskettujen ominaismuotojen avulla voidaan laskea muita havainnollisia suureita värähtelyyn liittyen. Määritellään osallistumiskerroin  $\gamma$  seuraavasti:

$$\gamma_i = \underline{\varphi}_i^T M \underline{D} \quad (35)$$

missä  $\underline{D}$  on suuntavektori.  $\gamma_i$  kuvaa massaa, mikä siirtyy suuntaan  $\underline{D}$  ominaismuotoon  $\underline{\varphi}_i$  liittyvällä ominaiskulmataajuudella  $\omega_i$ . Koska ominaismuodot normeerattiin modaali-massaan 1, voidaan helposti laskea  $\gamma_i$ :n avulla sen massan suuruus, mikä värähtelee kullakin ominaistajuudella. Massan arvo saadaan kaavasta

$$M_{eff,i} = \frac{\gamma_i^2}{\underline{\varphi}_i^T M \underline{\varphi}_i} = \gamma_i^2 \quad (36)$$

Kutsutaan tätä teholliseksi massaksi. Lasketaan kahden vaunun tapaukselle sen tehollisen massan suuruus, mikä liikkuu oikealle edellä lasketuilla ominaistaajuuksilla. Nyt vektori  $\underline{D}$  on

$$\underline{D} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

Lasketaan ensin  $\gamma$ :t ja niiden avulla teholliset massat:

$$\gamma_1 = \underline{\varphi}_1^T M \underline{D} = \frac{1}{\sqrt{m}} [0,1908 \quad 0,6941] \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & 2m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = 1,579\sqrt{m} \quad (38)$$

$$\gamma_2 = \underline{\varphi}_2^T M \underline{D} = \frac{1}{\sqrt{m}} [0,9817 \quad -0,1345] \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & 2m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = 0,7127\sqrt{m} \quad (39)$$

$$M_{eff,1} = \gamma_1^2 = (1,579\sqrt{m})^2 = 2,49m \quad (40)$$

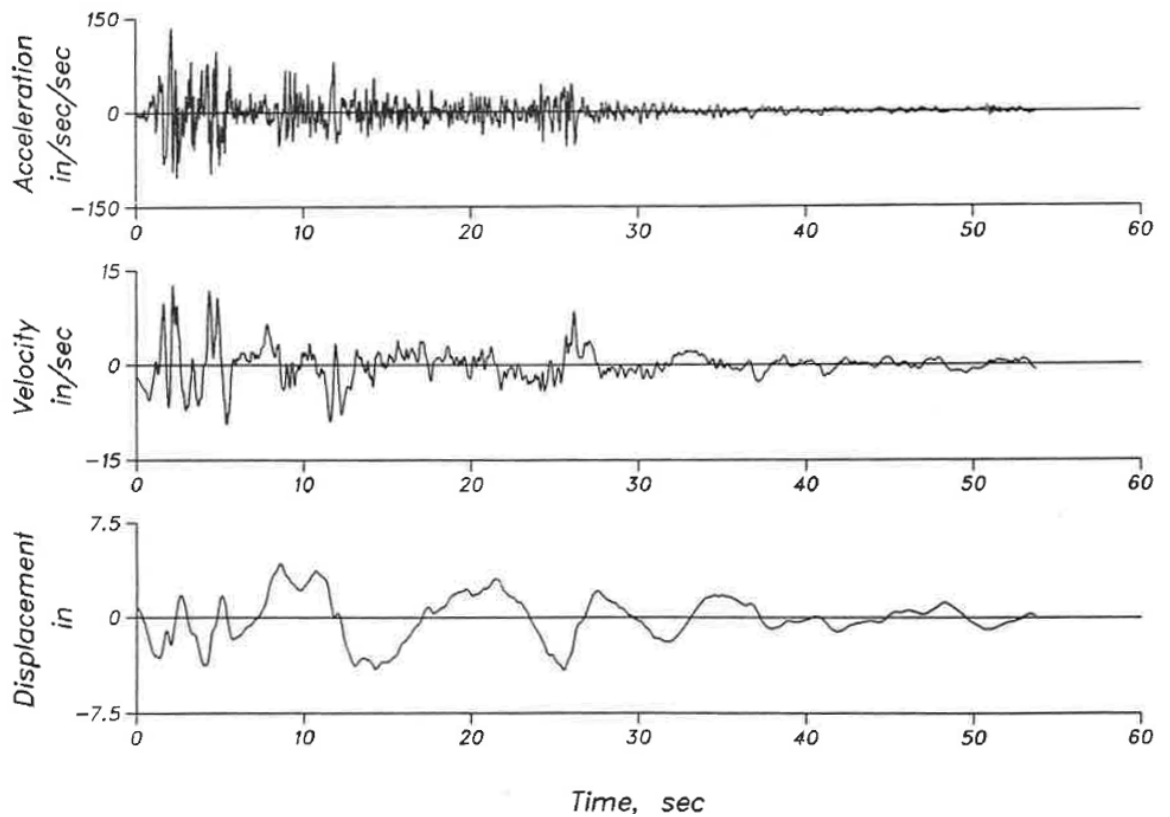
$$M_{eff,2} = \gamma_2^2 = (0,7127\sqrt{m})^2 = 0,51m \quad (41)$$

Ensimmäisellä ominaiskulmataajuudella värähtelee massaa 2,49m ja toisella 0,51m. Nähdään myös, että tehollisten massojen summa on yhtä suuri kuin systeemin kokonaismassa 3m.

### 3.2 Vastespektrimenetelmä

Seisminen mitoitus tehdään usein vastespektrimenetelmän avulla. Vastespektri kuvaa yhden vapausasteen vaimennetun värähtelijän maksimivasteita eri taajuuden arvoilla. Sen muodostamiseen käytetään useista eri maanjäristyksistä saatujen arvojen tasoitettua keskiarvoa [1].

Maanjäristystietoa saadaan esimerkiksi akselerometrillä, joka tallentaa yhden vapausasteen massa-jousi-vaimennin -systemin kiihtyvyyttä ajan funktiona tietyssä sijainnissa. Tallennettu kiihtyvyyssi tieto korjataan laitteen virheiden varalta ja sille etsitään neutraaliakseli. Saadun kiihtyvyyssi kuvaajan avulla saadaan numeerisella integroinnilla myös nopeus- ja siirtymäkuvaajat. Kuvassa 3.7 näkyy esimerkkikuvaajat kiihtyvyydestä, nopeudesta ja siirtymästä.

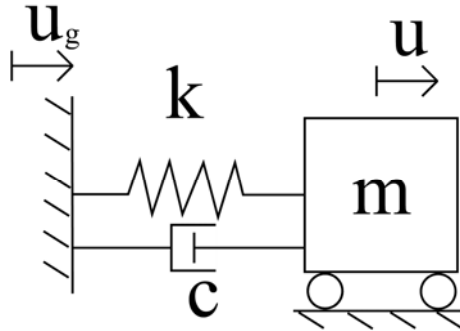


Kuva 3.7. Kuvassa näkyy akselerometrillä saatu korjattu kiihtyvyyssi ja sen avulla muodotetut nopeus- ja siirtymä-aikahistoriat [1].

Seismisen analyysin kannalta oleellista kuvaajissa on suurimmat piikit eli itseisarvoltaan suurimmat arvot, järjestyksen kesto ja taajuussisältö. Järjestyksen kestolla tarkoitetaan ensimmäisen ja viimeisen kiihtyvyyssi piikin väliä, joiden suuruus on tiettyä arvoa suurempi (esimerkiksi 0,05g [1]).

### 3.2.1 Maanjäristysherätteen aiheuttama vaste

Havainnollistetaan seuraavaksi maanjäristyksen vaikutuksia rakenteelle. Kuvassa 3.8 on massa-jousi-vaimennin –systemi, jolle aiheutuu heräte alustan liikkeestä.



Kuva 3.8. Kuvassa on yhden vapausasteen vaimennettu värähtelijä, jolle aiheutuu alustaheräte.

Vasemmanpuoleiselle seinämälle (alusta) aiheutuu siirtymä  $u_g$ . Se kuvaa maanjäristyksen aiheuttamaa siirtymää vaunun kiinnityspisteelle. Vaunun suhteellinen siirtymä alustaan nähden on  $u$ . On huomattava, että jousi aiheuttaa systeemille vaunun suhteellista siirtymää vastaavan jousivoiman. Samoin vaimennin aiheuttaa vaunun suhteellista nopeutta vastaavan vaimennusvoiman. Massan aiheuttama hitausvoima puolestaan ei aiheudu vain suhteellisesta kiihtyvyydestä vaan vaunun kokonaiskiihtyvyydestä. Systemin liikeyhtälö saa seuraavan muodon:

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_g) + c\dot{u} + ku = 0 \quad (42)$$

Jos alustan saama kiihtyvyys vielä kuvataan aikariippuvaisena terminä ja sen aiheuttama voima siirretään yhtälön oikealle puolelle, päästään seuraavaan muotoon:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (43)$$

Jaetaan vielä yhtälö puolittain massalla ja esitetään vaimennus suhteellisen vaimennuskertoimen avulla

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega\dot{u} + \omega^2 u = -\ddot{u}_g(t) \quad (44)$$

Huomataan, että kyseisen maanjäristyskiihtyvyyden aiheuttama siirtymä  $u$  ei riipu rakenteen absoluuttisesta massasta tai jousivakion arvosta. Siirtymävaste on siis yhtä suuri erilaisille ja erisuuruksille rakenteille, jos vain suhteellinen vaimennuskertoimen ja omi-

naiskulmataajuus ovat samat. Siirtymävaste voidaan ratkaista numeerisella integroinnilla yhtälöstä 44 [2].

### 3.2.2 Sisäinen voima

Sisäinen voima kuvaa rakenteeseen varastoitunutta voimaa ajanhetkellä  $t$ . Kuvan 3.8 tilanteessa sitä edustaa jousivakion ja suhteellisen siirtymän tulo,

$$f_s = ku(t) \quad (45)$$

Jos kirjoitetaan jousivakio massan ja ominaistajuuden avulla päästään seuraavaan muotoon:

$$f_s = m\omega^2 u(t) \quad (46)$$

Jos vielä tehdään merkintä

$$PSA(t) = \omega^2 u(t) \quad (47)$$

päästään muotoon:

$$f_s = mPSA(t) \quad (48)$$

$PSA(t)$  on nimeltään näennäiskiihtyvyysovaste ja se lasketaan todellisen siirtymävasteen avulla. Systemin sisäinen voima voidaan laskea siis jokaisella ajanhetkellä kun tunnetaan siirtymävaste.

### 3.2.3 Kimmoenergia

Kimmoenergia kuvaa rakenteeseen varastoitunutta energiaa. Kuvan 3.8 tapauksessa se lasketaan seuraavasti:

$$E = \frac{ku^2}{2} \quad (49)$$

Otetaan vielä käyttöön suure  $PSV$ , joka lasketaan seuraavasti:

$$PSV(t) = \omega u(t) \quad (50)$$

Nyt kimmoenergia voidaan kirjoittaa  $PSV$ :n avulla

$$E = \frac{ku^2}{2} = \frac{k(PSV/\omega)^2}{2} = \frac{mPSV^2}{2} \quad (51)$$

$PSV(t)$  on nimeltään näennäisnopeusvaste ja myös se voidaan laskea todellisen siirtymävasteen avulla. Systeemin kimmoenergia voidaan siis laskea jokaisella ajanhetkellä kun tunnetaan siirtymävaste.

### 3.2.4 Vastespektri

Vastespektri kuvaa herätteen aiheuttamaa maksimivastetta taajuuden tai periodin funktiona. Suunnittelijaa kiinnostaa usein ainakin siirtymävastespektri, koska maksimisiirtymän avulla voidaan laskea rakenteen suurimmat sisäiset voimat ja kimmoenergia. Lisäksi suunnittelussa halutaan varmistua, että vierekkäiset rakenteet eivät törmää toisiinsa. Siirtymävastespektri voidaan kirjoittaa muodossa

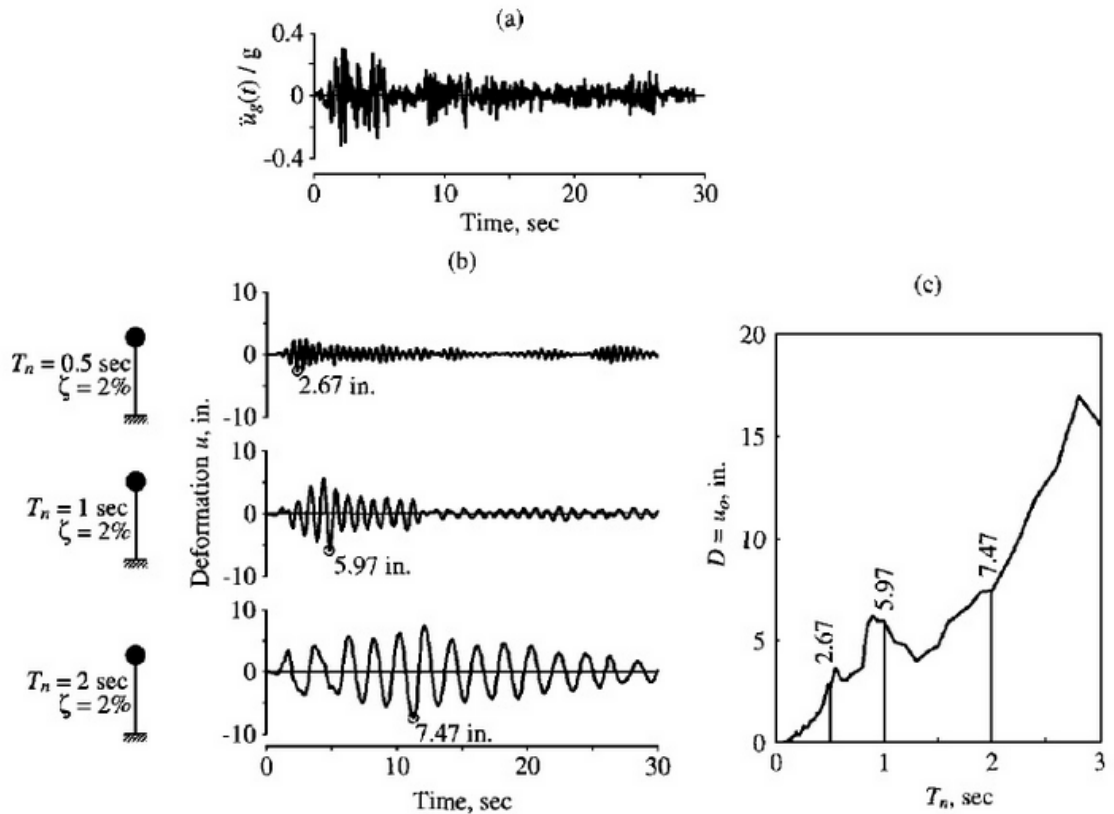
$$u_0(T, \zeta) = \max_t |u(t, T, \zeta)| \quad (52)$$

missä  $T$  on ominaisperiodi, tai muodossa

$$u_0(f, \zeta) = \max_t |u(t, f, \zeta)| \quad (53)$$

missä  $f$  on ominaistaajuus. Kuvassa 3.9. havainnollistetaan siirtymävastespektriä.





Kuva 3.9. Kuvassa näkyy alustaherätteestä johdettu yhden vapausasteen värähtelijän siirtymävastespektri [2].

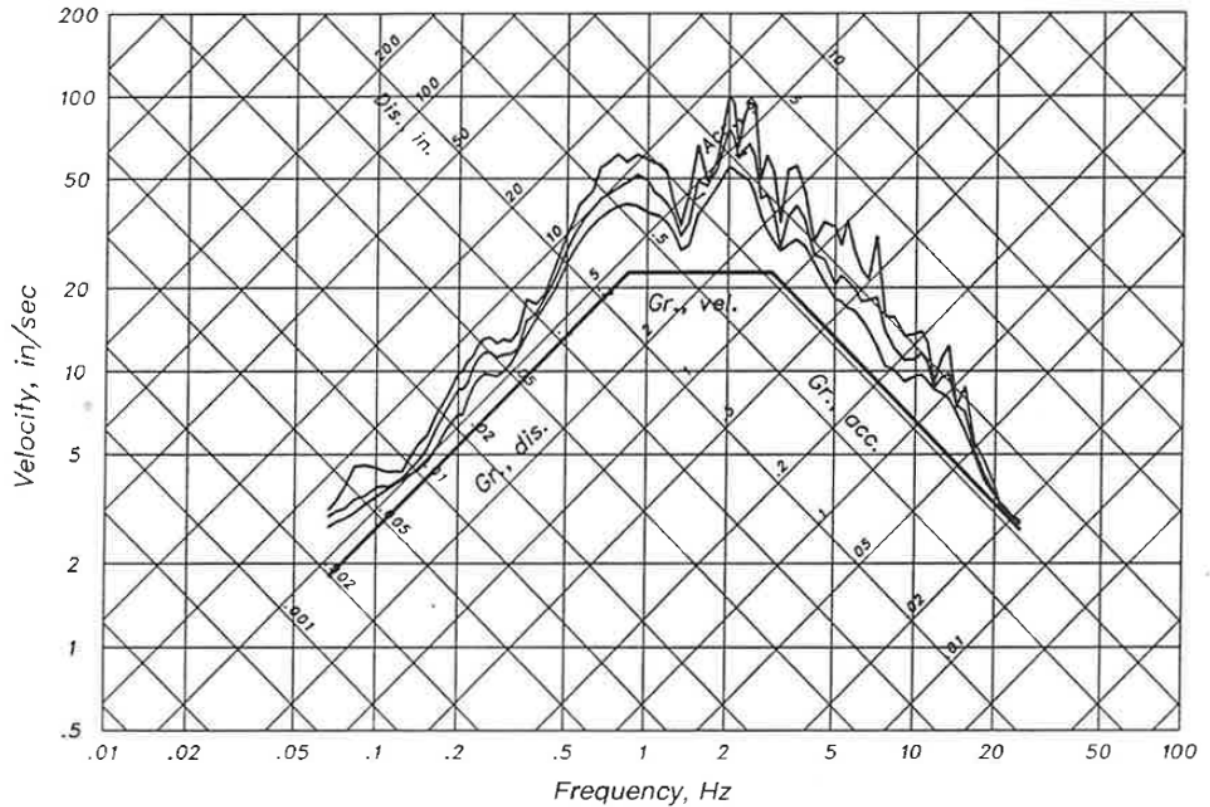
Kuvan 3.9 kohdassa (a) on maanjäristyskiihtyvyyden ajan funktiona. Kohdassa (b) on eri ominaisperiodeille muodostettu siirtymävaste ajan funktiona. Kohdassa (c) näkyy, kuinka eri taajuuksilla saadut maksimisiirtymävasteet on kuvattu periodin funktiona.

Koska siirtymävastespektri kuvaa maksimisiirtymiä eri taajuuden (tai periodin) funktiona, saadaan sen avulla myös maksimi-arvot sisäisille voimille ja kimmoenergialle eri taajuuksien arvoilla. Tästä syystä vastespektriin piirretään usein siirtymävaste, näennäiskiihtyvyys ja näennäisnopeus. Ne riippuvat toisistaan seuraavalla tavalla:

$$u_0 = \frac{PSV}{\omega} = \frac{PSA}{\omega^2} \quad (54)$$

On tärkeää huomata, että näennäisnopeus ja näennäiskiihtyvyys eivät ole todellisia nopeuksia ja kiihtyvyyksiä, vaan siirtymän avulla laskettuja suureita joilla on nopeuden ja kiihtyvyyden dimensio. Todelliset nopeudet ja kiihtyvyydet tulee ratkaista kaavasta 44.

Kuvassa 3.10 on vastespektri, jossa on kuvattuna siirtymä, näennäisnopeus ja näennäiskiihtyvyys.



Kuva 3.10. Kuvassa näkyy vastespektri eri vaimennuksen arvoilla [1].

Kuvaan 3.10 on piirretty vastespektrit eri vaimennuksen arvoilla. On tavallista, että vastespektri on piirretty nelilogaritmiselle paperille siten, että vaaka-akseli kuvaa taajuutta tai periodia, pystyakseli näennäisnopeutta ja vinot akselit näennäiskiihtyvyyttä ja siirtymää.

Samalla tavalla kuin edellä esitetty siirtymälle myös nopeudelle ja kiihtyvyydelle voidaan muodostaa vastaavat spektrit

$$\dot{u}_0(f, \zeta) = \max_t |\dot{u}(t, f, \zeta)| \quad (55)$$

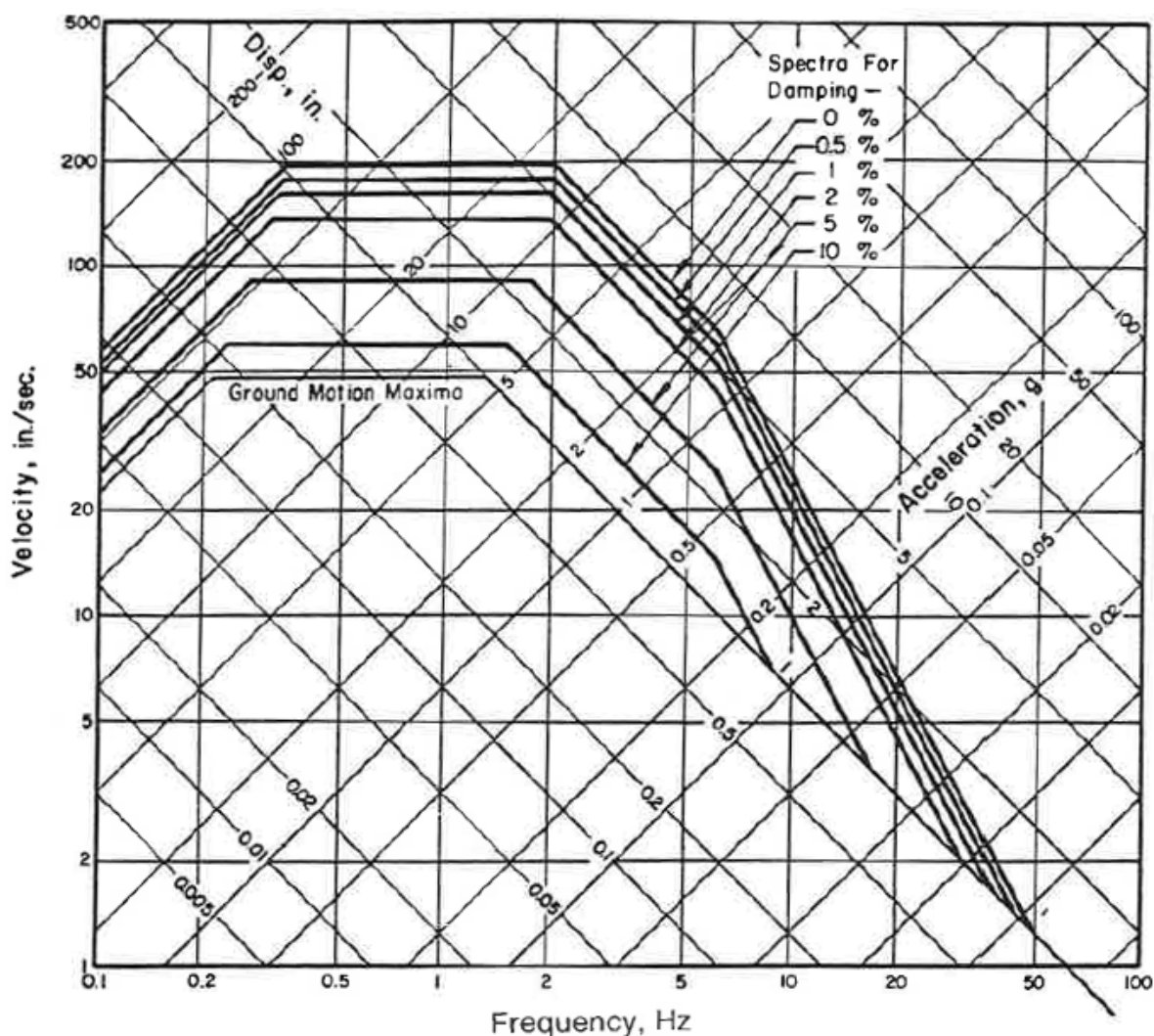
$$\ddot{u}_0(f, \zeta) = \max_t |\ddot{u}(t, f, \zeta)| \quad (56)$$

Nopeusvastespektristä voidaan lukea suoraan maksiminopeusvaste ja kiihtyvyydvastespektristä maksimikiihtyvyydvaste rakenteen ominaistajuuden ja suhteellisen vaimennuksen funktiona.

### 3.2.5 Suunnitteluspektri

Yhdestä maanjäristyksestä muodostettu vastespektri ei sellaisenaan sovellu suunnittelijan käyttöön. Varsinainen suunnitteluspektri tehdäänkin usein useamman maanjäristyk-

sen keskiarvoista ja tasoittamalla kuvaajan piikit. Näin vältetään yli- tai alimitoitamasta rakennetta. Kuvassa 3.11 on esimerkkikuva suunnitteluspektristä.



Kuva 3.11. Kuvassa näkyy suunnitteluspektri eri vaimennuksen arvoilla [1].

Suunnitteluspektri on usein normeerattu jonkun tietyn maanjäristyskiihtyvyyden arvon suhteen. Kuvassa 3.11 normeeraus on tehty 1,0 g:n suhteen. Jos spektrin arvot tarvitaan jonkun muun maanjäristyskiihtyvyyden suuruudelle, spektrin arvot skaalataan kyseiselle kiihtyvyydelle. Jos maanjäristyksen suuruus on esimerkiksi 0,5 g, spektrin arvot kerrotaan 0,5:lla. Samalla tavalla myös maaperän vaikutus voidaan ottaa huomioon. Eri maaperän tyypeille on omat kertoimensa, joilla spektrin arvoja kerrotaan. Nämä kertoimet kuvaavat maaperän kykyä voimistaa maanjäristyksen suuruutta. Pehmeä maaperä pienentää spektrin arvoja pienillä taajuuksilla ja suurentaa spektrin arvoja muilla taajuuksilla [1].

Kun katsotaan suunnitteluspektriä (kuva 3.11), siitä voidaan erottaa eri taajuusalueita. Huomataan, että pienimmillä taajuuden arvoilla siirtymät ovat suurimmillaan. Keskivä-

lin alueella näennäisnopeudet ovat suurimmillaan. Suurilla taajuuden arvoilla näennäiskiihtyvyyden arvot ovat suurimmillaan, kunnes ne alkavat pienenemään. Kun taajuudet ovat riittävän suuria, spektristä havaitaan jäykän kappaleen liike. Silloin näennäiskiihtyvyys on yhtä suuri kuin heräte (maanjäristyksen voimakkuus). Kuvassa 3.11 tämä havaitaan noin 50 Hz:n kohdalla.

### **3.2.6 Suunnitteluspektrin käyttö**

Siirtymäsuunnitteluspektri kuvaa niitä siirtymän, näennäisnopeuden ja näennäiskiihtyvyyden maksimisuuruuksia, mitä maanjäristyksestä rakenteelle aiheutuu eri värähtelytaajuuksien arvoilla. Sitä käytetään seuraavalla tavalla:

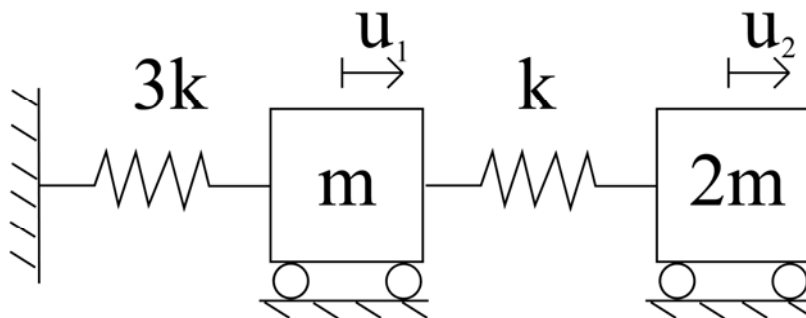
1. Arvioidaan maanjäristyksen suuruus, maaperän kerroin ja rakenteen suhteellinen vaimennuskerroin.
2. Ratkaistaan rakenteen ominaistaajuuudet.
3. Etsitään suunnitteluspektristä ominaistaajuuksia vastaavat spektrin arvot (tarvittaessa skaalataan järistyksen suuruuden ja maanperän kertoimella).
4. Yhdistetään vasteiden arvot jollain menetelmällä.
5. Lasketaan esimerkiksi rakenteen sisäiset voimat yhdistetyn vasteen avulla.

### 3.3 Vaste usean vapausasteen värähtelijälle

Todellinen tilanne harvoin on yhden vapausasteen värähtelijän kaltainen. Samoin kuin yhden vapausasteen värähtelijällä on yksi ominaistajuus, monimutkaisemmalla rakenteella on yhtä monta ominaistajuutta kuin sillä on vapausasteitakin. Usean vapausasteen vaste ratkaistaan vastespektrimenetelmällä seuraavalla tavalla.

1. Ratkaistaan rakenteen ominaisparit eli ominaistajuudet ja niitä vastaavat ominaismuodot.
2. Niiden avulla lasketaan ominaistajuuksia vastaavat osallistumiskertoimet herätteen suuntaan.
3. Luetaan vastespektristä ominaistajuuksia vastaavat vasteen arvot arvioidun vaimennuksen kohdalta.
4. Lasketaan osallistumiskertoimien avulla rakenteen eri vasteet ominaistajuuksilla.

Käydään edellä esitetyt vaiheet läpi esimerkin avulla. Ominaisajuuksia ja –muotoja käsiteltäessä oli jo esillä seuraava kahden vapausasteen värähtelijä:



Kuva 3.12. Kuvassa on kahden vapausasteen vaimentamaton värähtelijä.

Sen ratkaisuna saatiin seuraavat ominaiskulmataajuudet, ominaismuodot ja osallistumiskertoimet suuntavektorin  $\underline{D}$  kuvatessa siirtymää oikealle:

$$\omega_1 \approx 0,602\sqrt{k/m}, \quad \underline{\varphi}_1 = \begin{bmatrix} 0,1908 \\ 0,6941 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{m}}, \quad \gamma_1 = 1,579\sqrt{m}$$

$$\omega_2 \approx 2,034\sqrt{k/m}, \quad \underline{\varphi}_2 = \begin{bmatrix} 0,9817 \\ -0,1345 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{m}}, \quad \gamma_2 = 0,7127\sqrt{m}$$

Olkoon massalla ja jäykkyykskertoimella seuraavat arvot:  $m = 7850$  kg ja  $k = 7850$  N/m. Systeemille aiheutuu maanjäristyksestä kiihtyvyyssvastespektri, mikä kuvataan kolmella

pisteellä ja niiden välisillä suorilla viivoilla log-log –koordinaatistossa (suhteellinen vaimennuskertoimen on 0,02):

*Taulukko 3.1. Taulukossa on esimerkin vastespektrin pisteet.*

Taajuus, Hz	Kiihtyvyys, g (= 9,81 m/s <sup>2</sup> )
0,05	0,7
0,20	1,5
0,50	1,1

Lasketaan ensin rakenteen ominaistajuuudet ja niitä vastaavat spektrin arvot interpolamalla:

*Taulukko 3.2. Taulukossa on esimerkin ominaistajuuksia vastaavat spektrin arvot.*

Ominaiskulmataajuus $\omega$ , 1/s	Ominaistaajuus f, Hz	Kiihtyvyys $S_a$ , m/s <sup>2</sup>
0,602	0,0958	9,8179
2,034	0,3237	12,5020

Lasketaan seuraavaksi ominaistajuuksille tulevat kiihtyvyyssasteiden arvot  $R$  kiihtyvyyksien ( $S_a$ ), osallistumiskertoimien ( $\gamma$ ) ja ominaismuotojen avulla:

$$\underline{R}_i = \gamma_i S_{a_i} \underline{\varphi}_i \quad (57)$$

$$\underline{R}_1 = \gamma_1 S_{a_1} \underline{\varphi}_1 = 1,579 \sqrt{7850 \text{ kg}} \cdot 9,8179 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \begin{bmatrix} 0,1908 \\ 0,6941 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{7850 \text{ kg}}} = \begin{bmatrix} 2,9579 \\ 10,7603 \end{bmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (58)$$

$$\underline{R}_2 = \gamma_2 S_{a_2} \underline{\varphi}_2 = 0,7127 \sqrt{7850 \text{ kg}} \cdot 12,5020 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \begin{bmatrix} 0,9817 \\ -0,1345 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{7850 \text{ kg}}} = \begin{bmatrix} 8,7471 \\ -1,1984 \end{bmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (59)$$

Usean vapausasteen värähtelijän kiihtyvyyssasteet lasketaan yhtälön (57) mukaisesti osallistumiskertoimen, spektrin arvon ja ominaismuodon avulla. Tässä vaiheessa on siis laskettu ne kiihtyvyyden arvot, mitä kahden vaunun systeemille aiheutuu sen ominaistajuuksilla.

### 3.4 Kokonaisvaste

Vastespektrimenetelmällä voidaan ratkaista eri ominaistajuuksilla rakenteelle aiheutuvat vasteet. Tärkeämpää kuin tietää ominaistajuuksien vasteet on spektrin aiheuttama kokonaisvaste. Se saadaan yhdistämällä eri taajuuksien ratkaisut. Yksinkertaisin tapa on itseisarvojen summaus (sum of absolute values, SAV). Se tehdään seuraavasti:

$$R \leq \sum_{n=1}^N |R_n| \quad (60)$$

Itseisarvojen summaus antaa ylärajan kokonaisvasteelle, koska se olettaa eri vasteiden toteutuvan samalla ajan hetkellä ja olevan saman merkkisiä keskenään. Tämä tapa on kuitenkin huono suunnittelijan kannalta, koska se voi olla liian konservatiivinen [3]. Parempi tapa laskea kokonaisvaste on neliöiden summan neliöjuuri (square root of the sum of squares, SRSS). Se perustuu todennäköisyysteoriaan ja on seuraavannäköinen:

$$R \approx \sqrt{\sum_{n=1}^N R_n^2} \quad (61)$$

Tämä ratkaisu antaa hyviä tuloksia kaksiulotteiselle systeemille [3]. Kolmiulotteisessa laskennassa vielä parempia tuloksia saadaan CQC-menetelmällä (complete quadratic combination) [1]. Se määritellään seuraavasti:

$$R_a = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N k \varepsilon_{ij} R_i R_j} \quad (62)$$

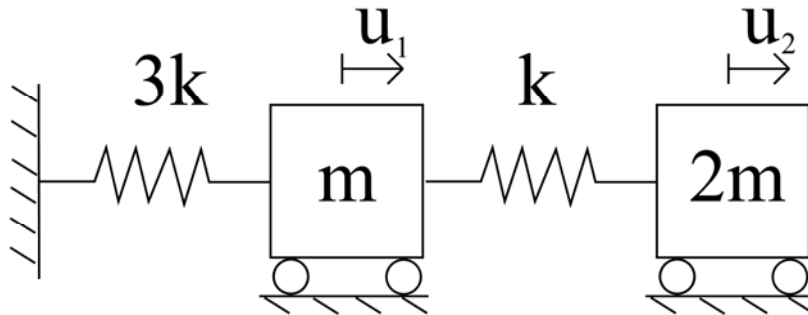
missä

$$\begin{aligned} k &= 1, \text{ jos } i = j \\ k &= 2, \text{ jos } i \neq j \end{aligned} \quad (63)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{8(\zeta_i \zeta_j)^{\frac{1}{2}} (\zeta_i + r \zeta_j) r^{\frac{3}{2}}}{(1-r^2)^2 + 4\zeta_i \zeta_j r(1+r^2) + 4(\zeta_i^2 + \zeta_j^2) r^2} \quad (64)$$

$$r = \frac{\omega_j}{\omega_i} \quad (65)$$

$\zeta_i$  on suhteellinen vaimennuskerroin ominaiskulmataajuudelle  $\omega_i$ . Usein suhteellinen vaimennuskerroin oletetaan vakioksi kaikille ominaiskulmataajuuksille. CQC-menetelmää käytetään yleisesti maanjäristyslaskennassa. Havainnollistetaan sen käyttöä suorittamalla laskenta edellä käsitellylle kahden vaunun systeemille.



Kuva 3.13. Kuvassa on kahden vapausasteen vaimentamaton värähtelijä.

Ominaiskulmataajuudet ja niille lasketut rakenteen vasteet olivat seuraavat:

$$\omega_1 \approx 0,602 \frac{1}{s}, \quad \underline{R}_1 = \begin{bmatrix} 2,9579 \\ 10,7603 \end{bmatrix} \frac{m}{s^2}$$

$$\omega_2 \approx 2,034 \frac{1}{s}, \quad \underline{R}_2 = \begin{bmatrix} 8,7471 \\ -1,1984 \end{bmatrix} \frac{m}{s^2}$$

CQC-menetelmällä yhdistetään ominaistajuuksien mukaiset kullekin vapausasteelle lasketut vasteet. Koska suhteellinen vaimennuskerroin on vakio kaikille ominaistajuuksille, menetelmä saa muodon:

$$R_a = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N k \varepsilon_{ij} R_i R_j} \quad (66)$$

missä

$$k = 1, \text{ jos } i = j$$

$$k = 2, \text{ jos } i \neq j \quad (67)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{8\zeta(\zeta + r\zeta)r^{\frac{3}{2}}}{(1-r^2)^2 + 4\zeta^2 r(1+r^2) + 8\zeta^2 r^2} \quad (68)$$



$$r = \frac{\omega_j}{\omega_i} \quad (69)$$

$R_i$  ja  $R_j$  ovat saman vapausasteen, mutta eri ominaiskulmataajuuksien vasteet. Käytännössä nyt yhdistetään CQC-menetelmällä vektoreiden  $\underline{R}_1$  ja  $\underline{R}_2$  ylärivit keskenään ja alarivit keskenään. Tuloksena saadaan:

$$\underline{R}_a = \begin{bmatrix} 9,2382 \\ 10,8249 \end{bmatrix} \frac{m}{s^2} \quad (70)$$

Kiihtyvyysspektristä aiheutuu siis vasemman puoleiselle vaunulle noin  $9,2 \text{ m/s}^2$  ja oikean puoleiselle vaunulle noin  $10,8 \text{ m/s}^2$  kiihtyvyys. Jos tahdotaan ratkaista kokonaissiirtymä, se onnistuu muuttamalla kokonaiskiihtyvyyssvaste staattiseksi voimavektoriksi ja ratkaisemalla matriisimuotoinen yhtälöryhmä

$$K\underline{u} = \underline{F} \quad (71)$$

$\underline{u}$ :n suhteen. Nyt ulkoista voimaa vastaava vektori  $\underline{F}$  saadaan seuraavasti

$$\underline{F} = M \underline{R}_a \quad (72)$$

missä  $M$  on massamatriisi ja  $\underline{R}_a$  on kokonaiskiihtyvyyssvastevektori.

## 4 SARJAPARISTON LUJUUSLASKENTA

Tässä kappaleessa käydään läpi tarkasteltavan sarjapariston rakennetta ja kuormitustapauksia, joita sen tulee kestää. Lisäksi esitellään laskennassa käytettyjä elementtejä ja elementtiverkkoa.

### 4.1 Suunnitteluvaatimukset

Sarjapariston tulee täyttää asiakkaan sille asettamat mekaaniset vaatimukset. Vaatimukset perustuvat alueella käytettävään rakennusstandardiin tai -koodiin ja mahdollisesti asiakkaan erityisvaatimuksiin, joissa tarkennetaan vaatimuksia. Tässä diplomityössä tarkasteltavan sarjapariston on täytettävä *National Building Code of Canada 2005* [4] asettamat yleiset vaatimukset ja lisäksi Hydro-Québec TransEnergyn omat erityisvaatimukset *Additional guidelines: Transmission network equipment, buildings and works paraseismic qualifications* [5]. Seuraavaksi esitellään Hydro-Québec TransEnergyn tärkeimpiä erityisvaatimuksia.

#### 4.1.1 Tarkasteltavat kuormat ja kuormitustapaukset

Sarjapariston on kestävä seuraavia kuormia ja voimia:

- Lavan ja sille asennettujen laitteiden paino
- Jään ja/tai lumen aiheuttama painon lisäys
- Tuulivoimat
- Seismiset voimat

Kuormitusyhdistelmät, jotka sarjapariston rakenneanalyysissä on otettava huomioon, ovat seuraavat:

1. (oma paino) + (jää/lumi kuorma) + (tuulikuorma X suuntaan)
2. (oma paino) + (jää/lumi kuorma) + (tuulikuorma Y suuntaan)
3. (oma paino) + (pystysuuntainen seisminen) + (vaakasuuntainen seisminen voima X suuntaan)
4. (oma paino) + (pystysuuntainen seisminen) + (vaakasuuntainen seisminen voima Y suuntaan)
5. (oma paino) + (pienempi tuulikuorma X suuntaan) + erityiskuormitus
6. (oma paino) + (pienempi tuulikuorma Y suuntaan) + erityiskuormitus
7. (oma paino) + (jääkuorma) + erityiskuormitus

X ja Y –suunnat tarkoittavat lavan kahta vaakasuuntaista pääakselia. Erityiskuormituksella tarkoitetaan tilannetta, jossa yksi lavaa kannattelevista pystyeristimistä on pettänyt.

#### 4.1.2 Varmuusluvut

Varmuusluvut eri kuormitusyhdistelmissä voi jakaa seuraavasti: staattiset kuormitustapaukset, seismiset kuormitustapaukset ja erityiskuormitustapaukset. Staattisia kuormitustapauksia ovat ne, joissa ei ole muita kuin staattisia kuormia kuten painoa ja vakio-suuruisena ilmenevää tuulivoimaa. Seismisillä tarkoitetaan sellaisia kuormitustapauksia, joissa on seismisiä voimia. Erityiskuormitustapaukset ovat niitä, joissa kuormat ovat staattisia, mutta yksi pystyeristin on poistettu. Varmuusluvut ovat alla olevassa taulukossa:

*Taulukko 4.1. Rakenteen varmuuslukuja eri kuormitustapauksissa.*

Rakennetyyppi	Vertailuvoima/jännitys	Staattiset varmuusluvut	Seismiset varmuusluvut	Erityistapausten varmuusluvut
Teräsrakenteet	myötölujuus	1,5	1,1	1,1
Alumiinirakenteet	myötölujuus	1,5	1,1	1,1
Pystyeristimet	murtolujuus	2,0	*	1,1
Harukset	murtolujuus	2,0	*	2,0

\* Arvot vaihtelevat materiaalin ja valmistajan testien mukaisesti.

#### 4.1.3 Kuormien suuruudet ja olosuhteet

Sarjapariston tulee kestää ja säilyttää toimintakykynsä seuraavanlaisissa olosuhteissa:

- Käyttölämpötila -50 - +40 °C
- Ilman muita ohjeistuksia 20 mm jääkerroksen paksuus ja 1,2 m lumikerroksen aiheuttama voima.
- Jatkuva tuulen voimakkuus 110 km/h ja 160 km/h tuulenpuuskat
- Maanjäristys sijainnin mukaisesti

#### 4.1.4 Rakenteen perustukset

Rakenteen kiinnitys maahan tulee olla sellainen, että maanjäristyksen sattuessa rakenteen kiinnitykset liikkuvat yhtenevästi. Jokainen maassa oleva tukipiste saa siis yhtä suuren ja saman suuntaisen maanjäristyksestä aiheutuvan siirtymän, nopeuden ja kiihtyvyyden.

## 4.2 Tehtävänanto

Tehtävänä on tehdä sarjaparistolle lujuusanalyysi elementtimenetelmällä. Sen on kestävä toimintakykyisenä seuraavissa olosuhteissa, jotka perustuvat asiakkaan vaatimukseen [5]:

<b>Maanjäristys:</b>	0,45 g	voimakkuus
	1,3	maan pinnan kerroin
	2 %	suhteellinen vaimennuskerroin
<b>Lämpötila:</b>	-50...+40 °C	
<b>Tuulen voimakkuus:</b>	110 km/h	jatkuva
	160 km/h	maksimi
	90 km/h	normaali
<b>Lumi:</b>	1,2 m	tiheys 2,0 kN/m <sup>3</sup>
<b>Jää:</b>	45 mm	maksimi
	30 mm	normaali
	12 mm	pieni
<b>Erityistapaus:</b>	30 mm (jää) + 90 km/h (tuuli) + hajonnut pystyeristin	

### 4.2.1 Tarkasteltavat tapaukset

Varsinaiset tarkasteltavat kuormitustilanteet perustuvat olosuhteista johdettuihin yhdistettyihin tapauksiin, joissa on mukana yksi tai useampi eri kuormitus kuten tuuli ja jää. Lopulta asiakkaan vaatimukseen perustuen tehdään lujuusanalyysi seuraavissa tilanteissa:

- I. Oma paino
- II. Oma paino + maksimi tuulen voimakkuus yhteen suuntaan (neljä tapausta)
- III. Oma paino + maksimi jääkerros tai lumikerros
- IV. Oma paino + normaali tuulen voimakkuus yhteen suuntaan (neljä tapausta) + normaali jääkerros
- V. Oma paino + maanjäristys kahteen vaakasuuntaan ja pystysuuntaan samanaikaisesti (kaksi tapausta)
- VI. Oma paino + maanjäristys kahteen vaakasuuntaan ja pystysuuntaan samanaikaisesti (kaksi tapausta) + pieni jääkerros tai lumikerros (25%)
- VII. Oma paino + normaali tuulen voimakkuus (yksi tapaus) + normaali jääkerros + hajonnut pystyeristin
- VIII. Oma paino + lämpötila -50 °C

Selvennetään vielä, mitä edellisessä listassa olevilla nimikkeillä tarkoitetaan. Omalla painolla tarkoitetaan rakenteen painon aiheuttamia rasituksia yhdessä vetoharusten esikivistysten kanssa. Tuulen suunnilla tarkoitetaan lavan sivun mukaisia suuntia. Lavan pitkä sivu on X-akselin suuntainen ja lyhyt sivu Y-akselin suuntainen. Neljällä eri tapa-

uksella tarkoitetaan, että tuuli vaikuttaa vuorotellen positiivisen ja negatiivisen X- ja Y- akselin suuntiin. Maanjäristyksen suunnat ovat X-, Y- ja Z-suunnassa. Z-suunnalla tarkoitetaan pystysuuntaa.

#### 4.2.2 Varmuusluvut

Analyysiä ei tehdä sarjapariston sähkölaitteille vaan sen kantaville rakenteille. Niitä ovat lavan muodostavat ja laitteita kannattelevat teräspalkit, laitteet lavasta eristävät eristimet ja lavaa kannattelevat pystyeristimet ja vetoharukset. Taulukkoon 4.2 on koottu analysoitavat rakenneosat, niiden sallitut voimat ja jännitykset sekä varmuusluvut näihin nähden edellä esitetyissä kuormitustilanteissa I – VIII.

Taulukko 4.2. Taulukossa on rakenteen osien varmuusluvut eri kuormitustapauksissa

Rakenneosa	Profiili /koko	Sallittu jännitys /voima	Varmuusluku:			
			I - IV	V-VI	VII	VIII
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	Ø 165 mm	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	<b>2,0</b>	<b>1,5</b>	<b>1,1</b>	<b>2,0</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)		<b>Vetovoima</b> 420 kN	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>
<b>Teräspalkit</b>		<b>Myötölujuus</b>	<b>1,5</b>	<b>1,1</b>	<b>1,1</b>	<b>1,5</b>
- Ensisijaiset	W250x73	350 MPa				
- Toissijaiset	W200x36	350 MPa				
- Lavan vinot palkit	W150x30	350 MPa				
- Kondensaattorikehikot, alempi	L100x10	355 MPa				
- Kondensaattorikehikot, ylempi	L80x8	355 MPa				
- Reaktorin kehikko	W150x30	350 MPa				
- DMOV-kehikko	UNP140	350 MPa				
- MOV-kehikko	UNP180	350 MPa				
<b>Laitteiden eristimet</b> (posliini)		<b>Murtolujuus</b>	<b>2,0</b>	<b>1,5</b>	<b>1,1</b>	<b>2,0</b>
- Kondensaattoririvi 1	Ø 145 mm	90 MPa				
- Kondensaattoririvi 2	Ø 145 mm	90 MPa				
- Kondensaattoririvi 3	Ø 145 mm	90 MPa				
- Kondensaattorien väli- eristimet	Ø 95 mm	90 MPa				
- Kipinäkoppi 1	Ø 145 mm	90 MPa				
- Kipinäkoppi 2	Ø 145 mm	90 MPa				
- Kipinäkoppi 3	Ø 145 mm	90 MPa				
- Reaktori	Ø 165 mm	90 MPa				
- DMOV	Ø 125 mm	90 MPa				
- MOV	Ø 145 mm	90 MPa				

Teräspalkkien vertailujännitykset lasketaan seuraavasti:

$$\sigma_{vert} = |\sigma_x| + |\sigma_{ty}| + |\sigma_{tz}| = \left| \frac{N}{A} \right| + \left| \frac{M_{ty}}{W_y} \right| + \left| \frac{M_{tz}}{W_z} \right| \quad (73)$$

Toisin sanoen lasketaan maksiminormaalijännitys normaalivoiman ja taivutusmomenttien avulla. Tätä voi pitää hyvänä laskutapana vertailujännitykselle, koska palkeille tulevat kuormitukset ovat niiden kolmen pää-akselin suuntaisia ja suurimmat jännitykset aiheutuvat taivutusmomenteista. Edellisellä kaavalla saadaan normaalijännityksen arvo profiilin nurkista. Leikkausjännitysten suuruus on pieni verrattuna normaalijännitykseen eikä niitä tarkastella.

Posliinieristimien vertailujännitykset lasketaan seuraavasti:

$$\sigma_{vert} = 2,5\sigma_x + \sqrt{\sigma_{ty}^2 + \sigma_{tz}^2} = 2,5 \frac{N}{A} + \sqrt{\left( \frac{M_{ty}}{W_y} \right)^2 + \left( \frac{M_{tz}}{W_z} \right)^2} \quad (74)$$

Lasketaan siis maksimitaivutusjännityksen ja 2,5 –kertaisen normaalivoiman aiheuttaman normaalijännityksen summa. Kertoimella 2,5 saadaan eristimien valmistajan mukaan muutettua normaalivoiman aiheuttama jännitys samaan muotoon taivutusjännityksen kanssa. Tämän menettelyn avulla voidaan jännitystulokset summata ja verrata yhteenlaskettua tulosta taivutusjännityksen sallittuun rajaan. Edellisellä kaavalla saadaan maksimivetojännitys pyöreän profiilin reunalta.

### 4.3 Kuormat

Sarjaparistolle aiheutuvat kuormat ovat oma paino, tuulivoimat, lumi ja jää, seismiset voimat ja lämpötilan muutoksista aiheutuvat voimat.

#### 4.3.1 Oma paino

Taulukkoon 4.3 on listattu sarjapariston eri komponenttien määriä ja massoja. Alimmalla rivillä on koko rakenteen massa, missä on mukana myös teräsosat ja eristimien massat.

*Taulukko 4.3. Taulukossa on sarjapariston laitteiden massoja.*

Komponentti	Määrä (kpl)	Kokonaismassa (kg)
Kondensaattori	672	116 300
MOV	10	2 400
Kipinäkoppi	3	5 000
Reaktori	1	8 000
Resistori	6	80
D-MOV	10	1 000
Yhteensä		160 900

Yllä olevasta taulukosta nähdään, että laitteista selvästi suurimman painon aiheuttaa kondensaattorit (116 300 kg). Sarjapariston kokonaismassa on 160 900 kg. Painon lisäksi tässä kuormitustilanteessa otetaan huomioon komposiittivetoharuksien esikiristys, jonka suuruus on 10 kN jokaisessa haruksessa.

#### 4.3.2 Tuulikuorma

Tuulikuorman suuruus lasketaan asiakkaan vaatimuksesta kaavalla:

$$p = \frac{1,2}{1,6} v^2 \quad [\text{Pa}] \quad (75)$$

missä  $v$  on tuulen nopeus (m/s) ja  $p$  on sen aiheuttama paine (Pa). Paine kohdistuu tuulen suuntaa kohtisuoraan olevaan pintaan. Eri tuulen voimakkuuksille saadaan taulukossa 4.4 esitetyt paineen arvot:

*Taulukko 4.4. Taulukossa on tuulen nopeuksia vastaavat paineen arvot.*

Tuuli	Nopeus (km/h)	Paine (Pa)
Jatkuva	110	700
Maksimi	160	1 482
Normaali	90	469

Paineiden avulla voidaan laskea tuulen aiheuttamat voimat koko rakenteelle. Suunnitelukuvista on laskettu konservatiivisesti vaikutuspinta-alat, joille tuuli kohdistuu suunnassa X ja Y. Suunnassa X rakenteen vaikutuspinta-ala on 102,7 m<sup>2</sup> ja suunnassa Y 153,7 m<sup>2</sup>. Taulukkoon 4.5 on listattu tuulen voimakkuudet ja sen aiheuttama kokonaisvoima rakenteelle.

*Taulukko 4.5. Taulukossa on tuulen aiheuttamat voimat.*

Tuuli	Voima X (kN)	Voima Y (kN)
Jatkuva	71,9	107,6
Maksimi	152,2	227,8
Normaali	48,2	72,1

Kokonaisvoima jaetaan rakenteelle siten, että pinta-alaltaan suurimmille osille kohdistuu niiden omia pinta-aloja vastaava voima ja muu voiman osuus kohdistuu ensi- ja toissijaisiin palkkeihin. Suurimmat vaikutuspinta-alat ovat kondensaattoritelineillä, kipinäkopeilla ja reaktorilla. Näille laskettujen voimien suuruudet ovat taulukossa 4.6.

*Taulukko 4.6. Taulukossa on tuulen aiheuttamat voimat eri osille.*

Rakenne	Jatkuva tuulivoima (kN)		Maksimi tuulivoima (kN)		Normaali tuulivoima (kN)	
	Voima X	Voima Y	Voima X	Voima Y	Voima X	Voima Y
Kipinäkoppi 1	4,9	4,9	10,4	10,4	3,3	3,3
Kipinäkoppi 2	5,0	5,0	10,7	10,7	3,4	3,4
Kipinäkoppi 3	4,9	4,9	10,4	10,4	3,3	3,3
Reaktori	6,6	6,6	13,9	13,9	4,4	4,4
Kondensaattoritelineet (yhteensä)	49,7	54,2	105,2	114,7	33,3	36,3

### 4.3.3 Jääkuorma

Lumi- ja jääkuorma ovat keskenään vaihtoehtoisia kuormituksia. Tarkoitus on käyttää sitä kuormitusta, kumpi on suurempi. Lumikuorma lasketaan seuraavasti [4]:

$$S = I_S (C_b C_w C_s C_a S_S + S_r) \quad (76)$$

missä  $I_S$  = merkityskerroin (1,25),  $S_S$  = lumikuorma (3 400 Pa),  $C_b$  = kattokuorman kerroin (0,8),  $C_w$  = tuulikerroin (0,75),  $C_s$  = katon kulman kerroin (1,0),  $C_a$  = katon muoto-kerroin (1,0) ja  $S_r$  = sadekuorma (600 Pa).



Lumikuorman suuruudeksi saadaan  $S = 3\,150$  Pa, joka kerrottuna lavan pinta-alalla saadaan lumikuorman suuruus voimana  $904,1$  kN. Seismisessä laskennassa on tarkoitus käyttää tehollisena voimana osuutta  $0,25 \times 904,1$  kN =  $226,0$  kN, mikä tarkoittaa 25:n prosentin osuutta maksimilumikerroksesta.

Jääkuorman suuruus lasketaan jääkerroksen paksuuden, vaikutuspinta-alan ja jään tiheyden avulla. Lopulta eri jääkerrosten aiheuttamat voimat voidaan johtaa rakenteen kokonaisuudessaan kertoimeksi, jolloin yhden millimetrin jääkerros lisää koko rakenteen painoa 1,68 %. Taulukossa 4.7 on kolmen eri jääkerroksen aiheuttamat kokonaisvoimat.

*Taulukko 4.7. Taulukossa on jääkerrosten aiheuttamat massakertoimet.*

Jään paksuus (mm)	Massakerroin	Kokonaisvoima (kN)
45	0,76	1199,6
30	0,50	789,2
12	0,20	315,7

Vertailemalla lumen ja jään aiheuttamia kuormia huomataan 45 mm:n jääkuorman aiheuttavan suuremman voiman kuin maksimilumikuorma. Myös 12 mm:n jääkerros aiheuttaa suuremman voiman kuin 25:n prosentin osuus maksimilumikuormasta. Sarjaparisto tulee siis mitoittaa kestävämmän jääkuormia, koska sen vaikutus on suurempi kuin vastaavien lumikuormien.

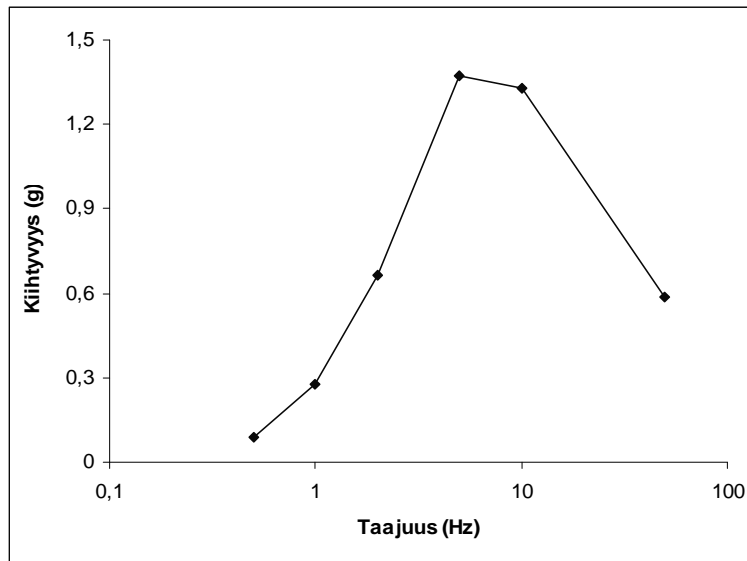
#### 4.3.4 Seisminen kuorma

Seismiset rasitukset aiheutuvat maanjäristyskiihtyvyyksistä. Niiden aiheuttamat voimat saadaan laskettua kiihtyvyysspektrin avulla. Nyt maanjäristyksen voimakkuus on  $0,45$  g. Kyseinen sarjaparisto mitoitetaan sellaisen spektrin avulla, jolle suhteellinen vaimenuskerroin on  $0,02$  ja maanpinnan vaikutuskerroin on  $1,3$ . Kiihtyvyysspektri aiheutuu rakenteelle kolmessa suunnassa samanaikaisesti siten, että se aiheutuu kokonaisuudessaan vaakasuunnassa,  $0,3$  kertaisena toisessa vaakasuunnassa ja  $0,8$  kertaisena pystysuunnassa. Spektrin arvot näkyvät taulukossa 4.8, joka perustuu asiakkaan erityisvaatimuksiin [5].

*Taulukko 4.8. Taulukossa on kiihtyvyysspektrin pisteet.*

Taajuus (Hz)	1,0 x kiihtyvyys (g)	0,3 x kiihtyvyys (g)	0,8 x kiihtyvyys (g)
0,5	0,0872	0,0262	0,0698
1	0,2782	0,0835	0,2226
2	0,6624	0,1987	0,5299
5	1,3707	0,4112	1,0966
10	1,3287	0,3986	1,0630
50	0,5850	0,1755	0,4680

50 Hz:n kohdalla nähdään jäykän kappaleen kiihtyvyys ( $1,3 \times 0,45 \text{ g}$ ). Kiihtyvyysspekt-ri on esitettyä kaaviona kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Kuvassa näkyy kiihtyvyysspekttri esitettyä puolilogaritmisellä asteikolla.

#### 4.3.5 Erityiskuormitustapaukset

Erityiskuormitustapauksessa tarkastellaan tilannetta, jossa yksi lavaa kannattelevista pystyeristimistä on murtunut. Valitaan murtuneeksi eristimeksi sellainen, jonka kuormitukset ovat suurimmillaan vastaavassa ehjässä tapauksessa. Oman painon lisäksi aiheuttavat rasitusta tuuli (90 km/h) ja jääkerros (30 mm).

#### 4.3.6 Lämpötilavaihtelu

Lämpötilan muutokset aiheuttavat rakenteessa lämpölaajenemista tai –kutistumista. Näistä siirtymistä puolestaan aiheutuu rakenteen osiin sisäisiä voimia. Tarkastellaan lämpörasituksia äärimmäislämpötilassa  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Lämpölaajenemiskertoimet teräs-, posliini-, komposiitti- ja alumiinirakenteissa ovat seuraavat:

Taulukko 4.9. Taulukossa on eri materiaalien lämpölaajenemiskertoimet.

Materiaali	Lämpölaajenemiskerroin $\alpha$ ( $1 / ^\circ\text{C}$ )
Teräs	$12 \times 10^{-6}$
Alumiini	$24 \times 10^{-6}$
Lasikuitu (komposiitti)	$7 \times 10^{-6}$
Posliini	$2 \times 10^{-6}$

#### 4.4 Analysoitavat kuormitustapaukset

Asiakkaan vaatimusten mukaisesti sarjapariston lujuusanalyysi tulee suorittaa useissa eri staattisissa ja dynaamisissa kuormitustapauksissa. Taulukkoon 4.10 on listattu tarkasteltavat staattiset tapaukset ja niiden selitykset.

*Taulukko 4.10. Taulukossa tarkasteltavat staattiset kuormitustapaukset.*

Kuormitus-tapaus	Oma paino	Tuulen suunta ja voimakkuus (km/h)	Jääkerroksen paksuus (mm)	Hajonnut pystyeristin	Lämpötila (°C)
KT1	x	-	-	-	-
KT2	x	+X160	-	-	-
KT3	x	-X160	-	-	-
KT4	x	+Y160	-	-	-
KT5	x	-Y160	-	-	-
KT6	x	-	45	-	-
KT7	x	+X90	30	-	-
KT8	x	-X90	30	-	-
KT9	x	+Y90	30	-	-
KT10	x	-Y90	30	-	-
KT11 <sup>(1)</sup>	x	90	30	x	-
KT12	x	-	-	-	-50 <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> KT11 on tapauksista KT7 – KT10 se, mikä aiheuttaa suurimman puristusvoiman pystyeristimelle. Tämä pystyeristin poistetaan mallista ja suoritetaan analyysi uudestaan kyseisellä tuulen suunnalla.

<sup>(2)</sup> Lämpötilan lähtötilanne on 22 °C. Lämpötilaero  $\Delta T$  on KT11:ssä -72 °C.

Taulukkoon 4.11 on listattu tarkasteltavat dynaamiset tapaukset ja niiden selitykset.

*Taulukko 4.11. Taulukossa tarkasteltavat dynaamiset kuormitustapaukset.*

Kuormitustapaus	Oma paino	Maanjäristyksen suunta ja voimakkuus (%) <sup>(1)</sup>	Jääkerroksen paksuus (mm)
KT13	x	X100, Y30, Z80	-
KT14	x	X30, Y100, Z80	-
KT15	x	X100, Y30, Z80	12
KT16	x	X30, Y100, Z80	12

<sup>(1)</sup> Maanjäristyksen voimakkuus tarkoittaa prosenttiosuutta spektrin suuruudesta.

## 4.5 Sarjapariston lujuuslaskenta Ansys 14.0 -ohjelmalla

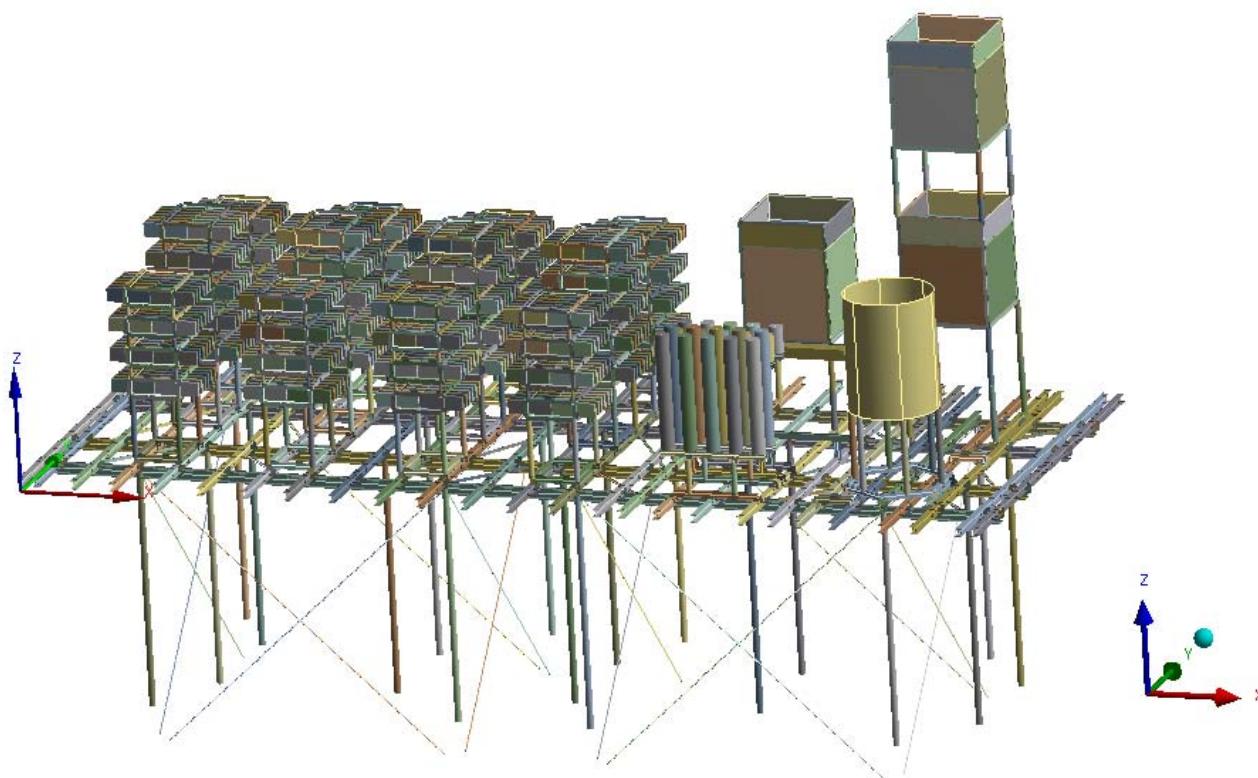
Sarjaparisto mallinnettiin ja analysoitiin Ansys R14.0 –ohjelmalla, joka perustuu elementtimenetelmään. Käytettiin Workbench-ympäristöä, johon kuuluvat geometrian luomiseen tarkoitettu CAD-ohjelma DesignModeler ja laskentaan sekä analysointiin tarkoitettu Mechanical-ohjelma.

### 4.5.1 Laskentamalli

Laskentamallista tavoiteltiin riittävän tarkkaa, jotta rakenteen eri osat saadaan analysoidua riittävän tarkasti. Toisaalta mallin piti olla riittävän kevyt laskennallisesti, koska kuormitustilanteita eli laskentatapauksia on useita. Analyysi keskittyy sarjapariston kantaviin rakenteisiin kuten teräspalkkeihin ja eristimiin ei niinkään sähkölaitteisiin kuten kondensaattorit ja reaktori.

### 4.5.2 Koordinaatisto

Mallin globaali koordinaatisto on sarjaparistolavan sivujen suuntainen. X-akseli on lavan pitkän sivun suuntainen ja Y-akseli lyhyen sivun suuntainen. Z-akseli on positiivinen pystysuuntaan. Globaali origo on ylhäältä katsottuna lavan vasemmassa alakulmassa. Koordinaatiston suunnat ja origon sijainti näkyy kuvassa 4.2.



*Kuva 4.2. Kuvassa näkyy globaalin koordinaatiston suunnat ja origo lavan vasemmassa alakulmassa.*

### 4.5.3 Elementtimalli

Riittävän tarkka ja kuitenkin riittävän nopea laskentamalli saadaan käyttämällä palkkielementtejä. Kaikki teräsrakenteet on mallinnettu palkkielementein. Niitä ovat lavan ensisijaiset-, toissijaiset- ja vinot palkit sekä laitteiden teräksiset kehikot. Myös kondensaattorit, MOV-, ja DMOV-yksiköt sekä resistorit mallinnettiin palkkielementein. Laitteita kannattelevat eristimet mallinnettiin palkkielementein. Reaktori ja kipinäkoppien seinät mallinnettiin kuorielementein. Lavaa kannattelevat pystyeristimet ja vetoharukset mallinnettiin sauvaelementein. Seuraavaksi esitellään ohjelman käyttämät elementtimallit.

#### 4.5.3.1 Palkkielementti

Palkkielementtityyppinä käytettiin ohjelman BEAM188 –elementtiä, joka perustuu Timoshenkon palkkiteoriaan [6]. Laskentaa varten se tarvitsee lähtö- ja päätösolmun sijainnin, profiilin tiedot, kimmomoduulin  $E$ , poissonin luvun  $\nu$  ja materiaaliheyden  $\rho$ . Tuloksina saadaan esimerkiksi siirtymiä, voimia ja momentteja. Jännitystulokset saadaan voimien ja momenttien avulla.

Ohjelma ei suoraan laske haluttuja vertailujännityksiä, mutta ne saadaan valmiiden jännitystulosten yhdistelmänä. Teräspalkeille halutaan tietää maksiminormaalijännitys

$$\sigma_{vert} = |\sigma_x| + |\sigma_{ty}| + |\sigma_{tz}| = \left| \frac{N}{A} \right| + \left| \frac{M_{ty}}{W_y} \right| + \left| \frac{M_{tz}}{W_z} \right|, \quad (77)$$

mikä esitettiin jo kappaleessa Tehtävänanto. Se saadaan valmiiden jännityskomponenttien summana. Samoin posliinieristimien vertailujännitys

$$\sigma_{vert} = 2,5\sigma_x + \sqrt{\sigma_{ty}^2 + \sigma_{tz}^2} = 2,5 \frac{N}{A} + \sqrt{\left( \frac{M_{ty}}{W_y} \right)^2 + \left( \frac{M_{tz}}{W_z} \right)^2}, \quad (78)$$

saadaan ohjelman laskemien jännityskomponenttien summana. Käytännössä edelliset vertailujännitykset saadaan ohjelman *Solution*-osiossa lisäämällä *User defined results*-tulokset komennoilla:

$$abs(SMISC31)+abs(SMISC32)+abs(SMISC34) \quad (79)$$

ja

$$2,5*SMISC31+sqrt(SMISC32^2+SMISC34^2) \quad (80)$$

*SMISC31* tarkoittaa normaalivoiman aiheuttamaa aksiaalista jännitystä. *SMISC32* ja *SMISC34* tarkoittavat palkin y- ja z-akselien taivutusjännityksiä profiilin reunoilla. *BEAM188* on kaksisolmuinen elementti, jossa on kolme vapausastetta molemmissa solmuissa.

#### 4.5.3.2 Sauvaelementti

Sauvaelementtinä käytettiin ohjelman *LINK180* –elementtiä [6]. Se soveltuu hyvin laavaa kannattelevien pystyeristimien ja vetoharusten mallinnukseen, koska siinä ei ole kiertymävapausasteita. Sauvaelementti voi saada vain vetoa ja puristusta akselinsa suunnassa. *LINK180* –elementillä voi myös valita, jos haluaa sillä olevan vain vetojäykkyyttä. Silloin se kuvaa hyvin köysimäistä tuentaa, minkälainen komposiittivetoharuskkin on. Laskentaa varten se tarvitsee lähtö- ja päätösolmun sijainnin, profiilin tiedot, kimmomoduulin  $E$  ja materiaaliheyden  $\rho$ . Vetoharuksen esikiristys voidaan antaa elementille lämpötilaeron avulla. Tarvittava lämpötilaero saadaan laskettua kaavasta:

$$\Delta T = \frac{F}{AE\alpha} \quad , \quad (81)$$

missä  $F$  on normaalivoima,  $A$  on poikkipinta-ala,  $E$  on kimmomoduuli ja  $\alpha$  on lämpölaajenemiskerroin.

Vetoharuksien kanssa on sarjaan asennettuna lautasjousipakka. Tämän vaikutus jäykkyyteen otetaan huomioon sarjaan kytkettyjen jousien kaavalla

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k_k} + \frac{1}{k_l} \quad , \quad (82)$$

missä  $K$  on sarjaankytketyn systeemin kokonaisjäykkyys,  $k_k$  on komposiittivetoharuksen aksiaalivetojäykkyys ja  $k_l$  on lautasjousipakan aksiaalijäykkyys.

Toisaalta jäykkyys saadaan myös seuraavasti:

$$k = \frac{AE}{L} \quad . \quad (83)$$

Yhdistämällä yhtälöt (82) ja (83) päästään seuraavaan muotoon:

$$\frac{L_{kok}}{A_{kok}E_{kok}} = \frac{L_k}{A_kE_k} + \frac{1}{k_l} \quad . \quad (84)$$

Ratkaisemalla yhtälö 85  $E_{kok}$ :n suhteen saadaan

$$E_{kok} = \frac{L_{kok}/A_{kok}}{\frac{L_k}{A_k E_k} + \frac{1}{k_l}} \quad (85)$$

Vetoharuksia kuvaaville sauvaelementeille annetaan aksiaalijäykkyys kimmomoduulin  $E_{kok}$  avulla.

Ansyksen Workbench-ympäristö ei varsinaisesti tarjoa sauvaelementtiä mallinnukseen, mutta sen saa käyttöön muuttamalla mallinnetut palkkielementit sauvaelementeiksi lyhyellä tekstisyöttöisellä käskyllä. Samalla annetaan myös muut sauvaelementin tarvittavat tiedot. LINK180 -elementin aksiaalivoimat saadaan ohjelman *Solution*-osiossa lisäämällä *User defined results*-tulos komennolla *SMISCI*.

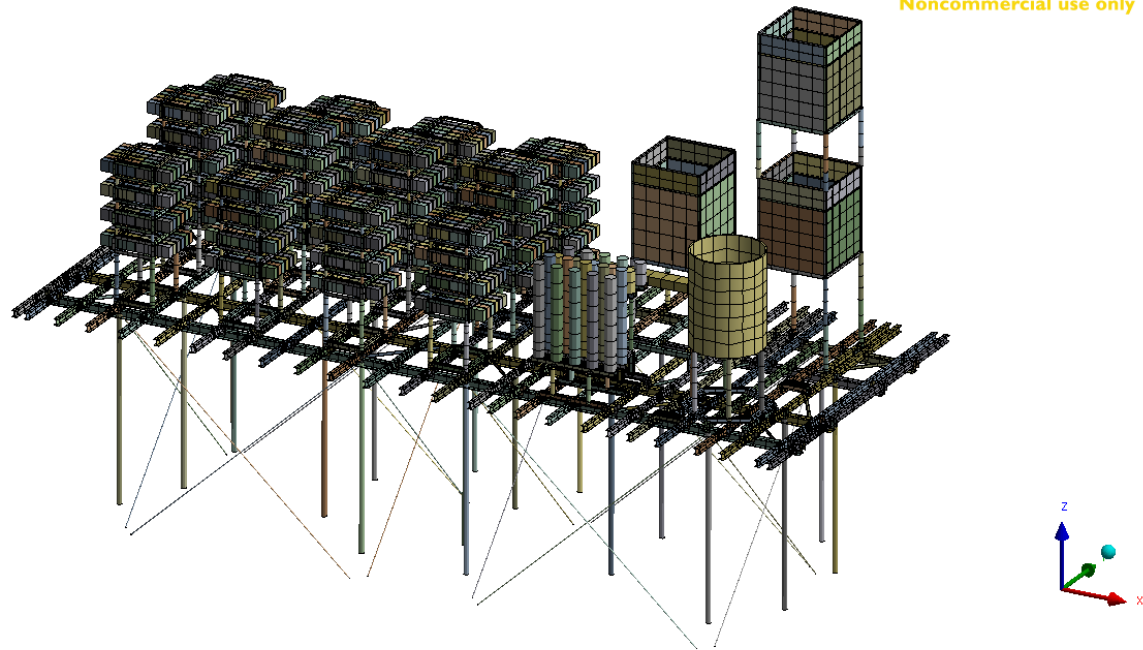
Staattisissa kuormitustapauksissa vetoharukset mallinnettiin vain vetojäykkyyttä omaavilla esikiristetyillä LINK180-elementeillä. Ne kuvaavat hyvin vetoharuksien todellista käyttäytymistä. Dynaamisissa kuormitustapauksissa käytetään vastespektrimenetelmää, minkä takia rakenteen jäykkyyden tulee olla lineaarinen. Käytännössä laskentamallissa vetoharuksien esikiristetyksen vaikutusta ei oteta huomioon. LINK180-elementti ei myöskään enää toimi vain vedossa vaan sillä on myös puristusjäykkyyttä. Liiallisen jäykkyyden estämiseksi laskentamallissa poistetaan vetoharuksista puolet. Kaikista rishtiin olevista vetoharuksista aina toinen on poistettu.

#### 4.5.3.3 Kuorielementti

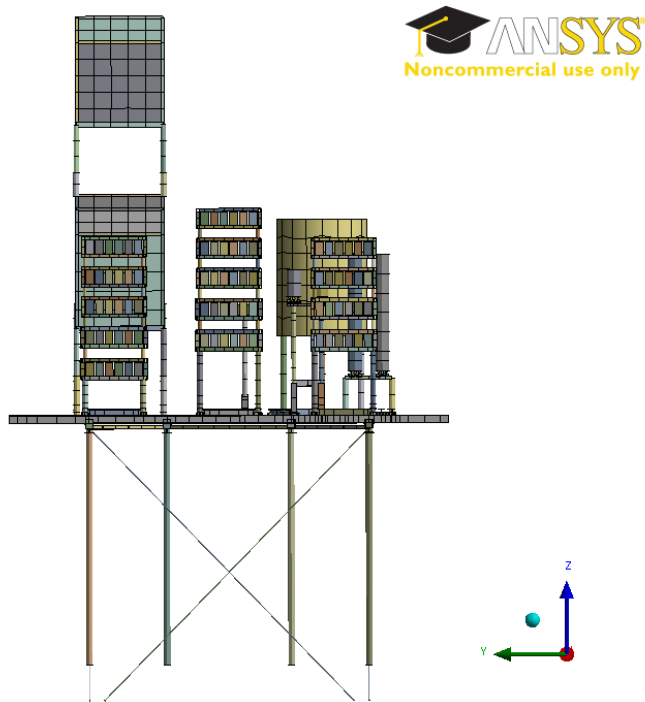
Kuorielementtinä käytettiin ohjelman SHELL181-elementtiä [6]. Se on nelisolmuinen kuorielementti, jonka jokaisella solmulla on kolme translaatio- ja kolme rotaatiovapausastetta. Kipinäköppien seinät ja reaktori mallinnettiin kuorielementein. Varsinaisesti sarjapariston analyysissä ei tarkastella kipinäköppien ja reaktorin seinämien jännityksiä, joten mallia ei näiltä osin tehty hyvin yksityiskohtaiseksi. Oleellista on saada todellista kokoa vastaava ja riittävän tiheä verkko, jotta tuulivoimien vaikutus saadaan oikeanlaisena vaikuttamaan laitteita kannatteleviin pystyeristimiin.

#### 4.5.3.4 Sarjapariston elementtiverkko

Kuvissa 4.3 - 4.6 näkyy laskennassa käytetty elementtimalli koko rakenteesta eri suunnista katsottuna.

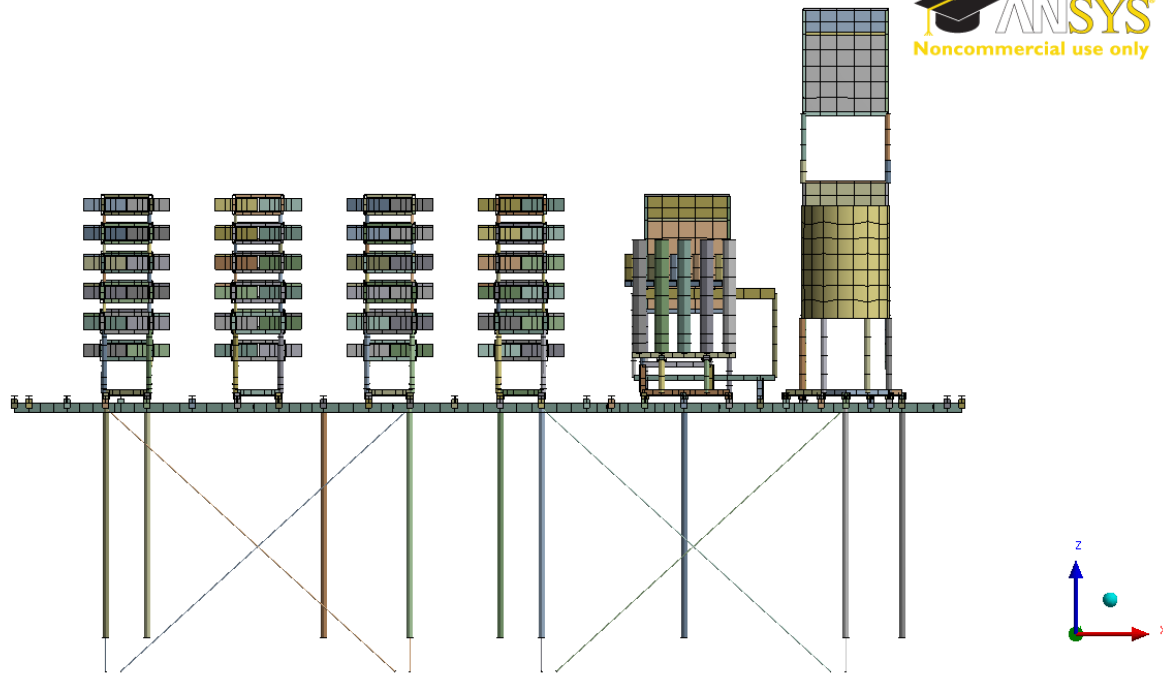


Kuva 4.3. Kuvassa näkyy laskennassa käytetty elementtiverkko.

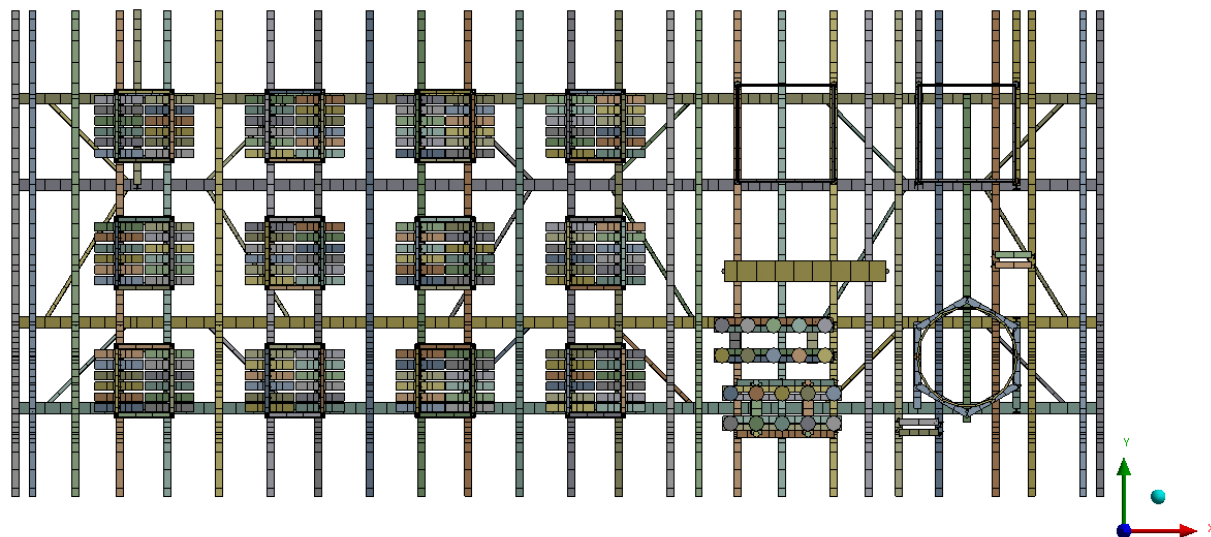


Kuva 4.4. Kuvassa näkyy rakenteen elementtiverkko globaalien koordinaatiston X-suuntaan katsottuna.



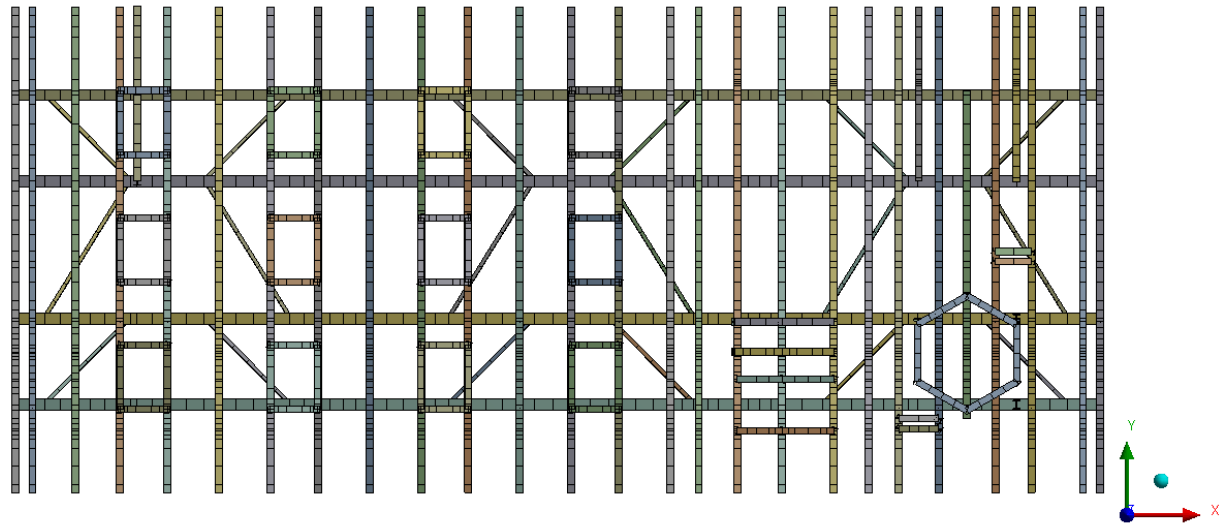


*Kuva 4.5. Kuvassa näkyy rakenteen elementtiverkko globaalien koordinaatiston Y-suuntaan katsottuna.*

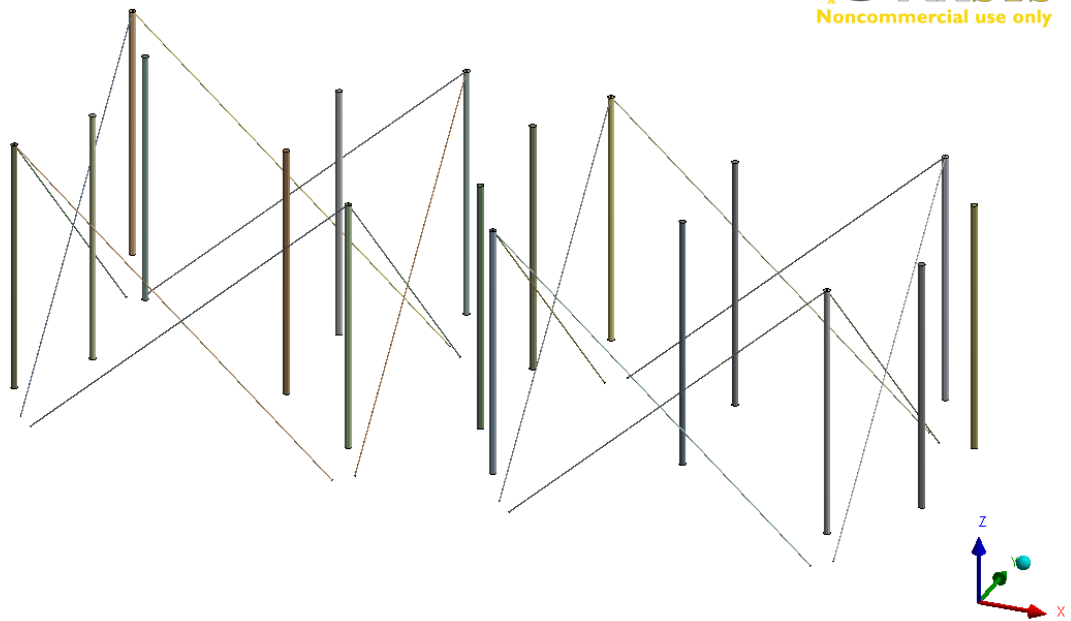


*Kuva 4.6. Kuvassa näkyy rakenteen elementtiverkko ylhäältäpäin katsottuna.*

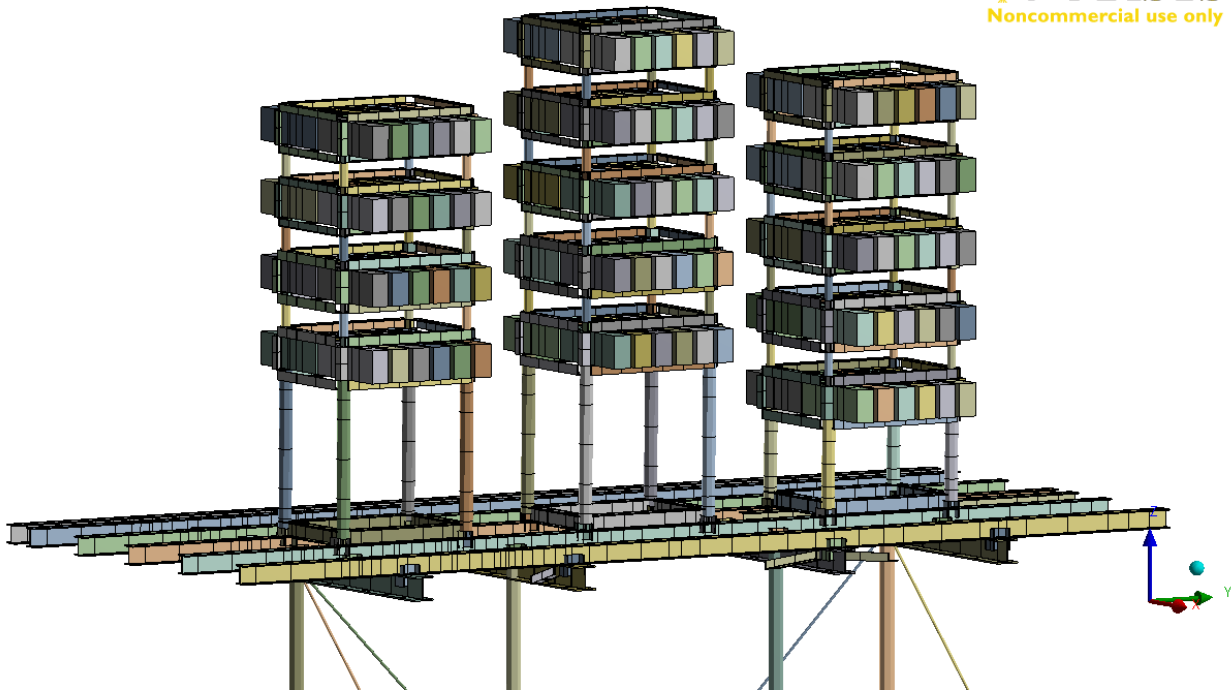
Seuraavissa kuvissa 4.7 - 4.11 näkyy rakenteen eri osien elementtiverkoitusta.



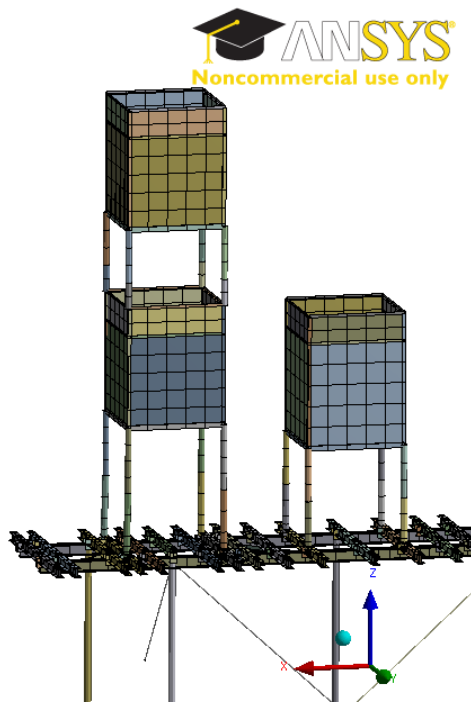
*Kuva 4.7. Kuvassa näkyy teräslavan elementtiverkko ylhäältäpäin katsottuna.*



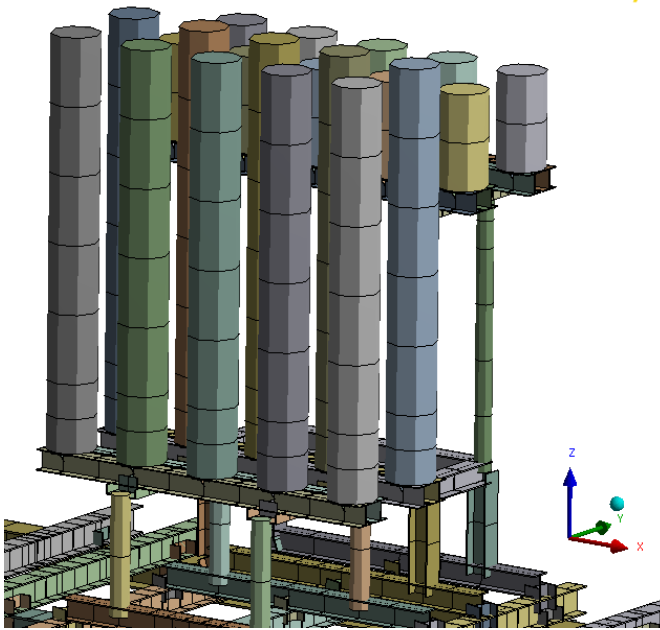
*Kuva 4.8. Kuvassa näkyy lavaa kannattelevien pystyeristimien ja vetoharusten elementtiverkko.*



*Kuva 4.9. Kuvassa näkyy kondensaattoritelineiden elementtiverkkoa.*



*Kuva 4.10. Kuvassa näkyy kipinäköppien elementtiverkkoa.*



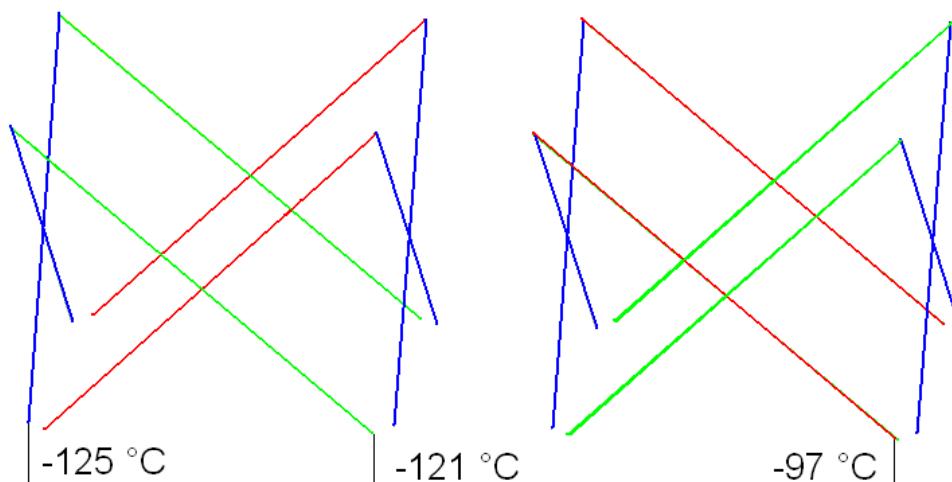
*Kuva 4.11. Kuvassa näkyy MOV- ja DMOV-yksiköiden ja niiden kehikoiden elementti-verkkoa.*

## 4.6 Harukset analyysissä

Harukset ovat laskentamallin kannalta haasteellisimpia rakenteen osia. Muilta osin sarjapariston jäykkyys on lineaarinen, eikä esikivistystä ole. Jokainen harus koostuu köysimäisestä komposiitti-eristimestä, lautasjousipakasta sekä teräksisestä vanttiruuvista, jolla saadaan harukseen esikivistys. Harus mallinnettiin yhtenä sauvaelementtinä, jolloin sen jousivakio ja esikivistys laskettiin käsin. Poikkipinta-alana käytettiin komposiittisuuden pienimmästä halkaisijasta laskettua pinta-alaa. Jousivakio laskettiin sarjaan kytkettyjen yksittäisten osien jousivakioiden avulla. Jousivakion vaikutus saadaan huomioitua laskennassa sauvaelementin kimmomoduulin  $E$  avulla. Esikivistys huomioidaan antamalla sauvaelementille vastaavan suuruinen lämpötilaero.

### 4.6.1 Esikivistys

Esikivistystä vastaava lämpötilaero on helppo laskea Sarjapariston lujuuslaskenta –kappaleessa johdetulla kaavalla (81). Kaavan (81) ongelma on kuitenkin siinä, että se ei ota huomioon lavan elastisuutta. Kaava toimii vain silloin kun sauvan kiinnityspisteiden etäisyys ei muutu. Nyt kuitenkin lava ei ole täysin jäykkä, vaan pieniä siirtymiä syntyy muun muassa rakenteen painosta. Esikivistystä vastaava lämpötilaero saatiin selville iteroimalla. Käytännössä sarjapariston oman painon ja harusten lämpötilaerojen kuormituksilla suoritettiin analyysi niin kauan kunnes löydettiin ne lämpötilaerot, joilla jokainen harus on 10 kN:n esikivistyksessä. Vastaaviksi lämpötilaeroiksi haruksille saatiin  $-97\text{ °C}$ ,  $-121\text{ °C}$  ja  $-125\text{ °C}$ . Kuvassa 4.12 näkyvät ne harukset joilla on samat lämpötilaerot.



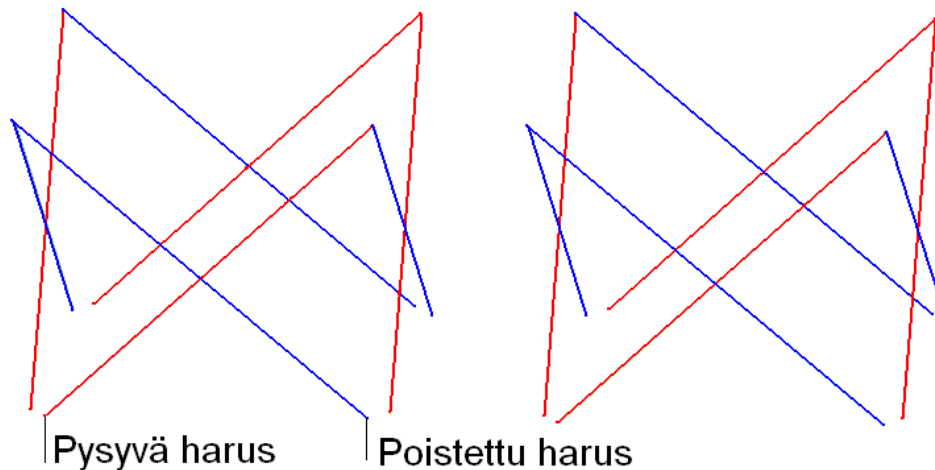
Kuva 4.12. Kuvassa näkyvät haruksille annetut lämpötilaerot ovat  $-97\text{ °C}$ ,  $-121\text{ °C}$  ja  $-125\text{ °C}$ .

#### 4.6.2 Vetosauva

Oletuksena sauvaelementti on veto-puristus-sauva. Sille voidaan kuitenkin antaa *TENSKEY*-valinta, jolloin se ottaa vain vetoa vastaan. Näin se sopii hyvin vetoharuksen mallinnukseen. Tätä ominaisuutta voidaan käyttää ainoastaan staattisissa kuormitustapauksissa, koska dynaamisissa kuormitustapauksissa, jotka edellyttävät ominaisarvoanalyysiä, ohjelma muuttaa epälineaariset jäykkyyden arvot automaattisesti lineaarisiksi.

#### 4.6.3 Harukset dynaamisessa kuormitustapauksessa

Ominaistaajuuksien ratkaiseminen edellyttää vakion suuruista jäykkyyttä ja massaa. Koska vetoharukset muuttuvat dynaamisessa kuormitustapauksessa veto-puristus-sauvoiksi, poistetaan kaikista haruspareista toinen. Kuvassa 4.13 näkyvät poistetut ja jäljelle jäävät harukset.



Kuva 4.13. Kuvassa näkyvät mallissa mukana olevat harukset sekä poistetut harukset.

Teräslavan ollessa jäykkä verrattuna haruksiin, tällä menettelyllä pystytään pääsemään lähelle samaa lavan kokonaisjäykkyyttä, mikä sillä olisi jos kaikki harukset olisivat mallissa mukana ja ne olisivat vetosauvoja. Harusten massan osuus on niin pieni koko rakenteen massasta, että joka toisen haruksen poistaminen mallista ei massan pienemisen takia merkittävästi vaikuta ominaistaajuuksien suuruuteen. Harusten esikiristystä ei huomioida ominaisarvoanalyysissä. Esikiristys vaikuttaa lavan jäykkyyteen silloin kun sen liike on lähellä tasapainoasemaa. Silloin harusparin toinen harus vähentää toisen aiheuttamaa jäykkyyttä ja yhdistetty jäykkyys on pienempi liikkeen suunnassa. Ratkaistut ominaistaajuudet ovat siis jonkun verran liian suuria. Tämä tekee vastespektrimenetelmän tuloksista konservatiivisia todellisiin rasituksiin nähden, koska spektristä saadut kiihtyvyyden arvot ovat pienempiä pienemmällä taajuuden arvoilla.

#### 4.6.4 Vaihtoehtoinen haruksien mallinnus

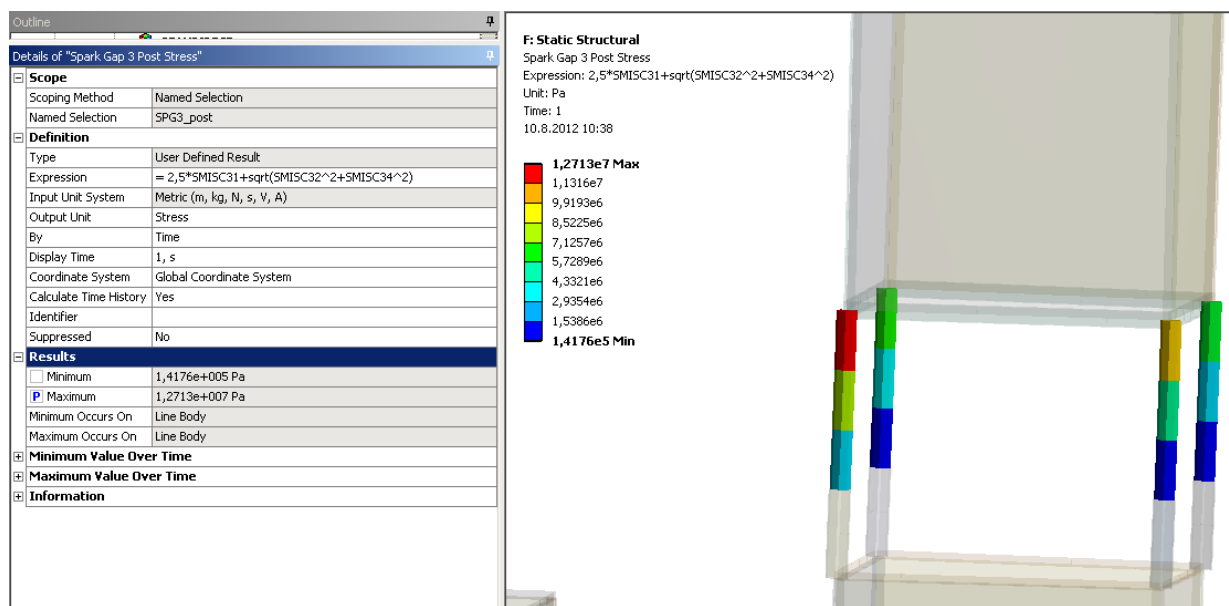
Dynaamisessa kuormitustapauksessa vaihtoehtoinen haruksien mallinnustapa on puolittaa niiden poikkipinta-alat. Harusten poikkipinta-alan puolittaminen aiheuttaa aksiaalisen jäykkyyden puoliintumisen. Näin meneteltäessä ei tarvitse poistaa puolia haruksista. Tällä tavalla mallinnettuna voidaan myös ratkaista sarjapariston ominaistajuudet harusten esikiristyksessä. Käytännössä ominaistajuuksien ratkaisun vaiheet ovat seuraavallaiset:

1. Harukset mallinnetaan vetosauvoina puolikkailla poikkipinta-aloilla.
2. Tehdään staattinen analyysi siten, että kuormituksina ovat sarjapariston paino ja haruksille lämpötilaeroina annetut esikiristykset.
3. Ratkaistaan ominaistajuudet ja muut värähtelytiedot esijännitetyssä tilassa, mikä saatiin staattisen analyysin tuloksena.

Ominaistajuudet ja muut värähtelytiedot ratkaistiin myös edellä esitetyllä tavalla, mutta esijännityksen vaikutus jäi hyvin pieneksi. Ominaistajuuksien arvot laskivat hyvin vähän (alle 5 %). Luvussa 4.6.3 esitetty harusten mallinnustapa antaa täten hieman konservatiivisia tuloksia.

## 4.7 Tulosten saaminen ohjelmasta

Sarjapariston rakenteen osat tarkastellaan eri tavoin maksimivoiman tai maksimivertailujännityksen suhteen. Myös kuormitustapauksia on useita. Näistä syistä kannattaa eri rakenneosien tarkasteltavat kuormitussuureet muodostaa omiksi tulosryhmikseen ja hakea näiden maksimivoimia ja -jännityksiä. Eri tulosryhmien maksimiarvot on helppo saada parametrisoimalla suureet. Näin laskennan jälkeen halutut tulokset saadaan nopeasti. Parametrisoidut tulokset saadaan kerralla useasta kuormitustapauksesta siistinä taulukkona ohjelman Parameter Set -näkyvässä. Kuvassa 4.14 näkyy esimerkkikuva kipinäkopin 3 pystyeristimien jännityksistä Mechanical-ohjelmassa ja kuvassa 4.15 vastaavan tuloksen näkyminen Parameter Set -näkyvässä.



Kuva 4.14. Kuvassa näkyy kipinäkopin 3 pystyeristimien jännitykset.



Outline of All Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
35	Static Structural (F1)			
36	P29	Support insulators FSUM Maximum	1,6386E+05	N
37	P30	Suspension insulators FSUM Maximum	56588	N
38	P31	Primary beams Mises Maximum	8,9493E+07	Pa
39	P32	Secondary beams Mises Maximum	1,4242E+08	Pa
40	P33	Rack beams Mises Maximum	1,4463E+08	Pa
41	P34	DMOV frame Mises Maximum	1,1571E+07	Pa
42	P35	MOV frame Mises Maximum	1,0613E+08	Pa
43	P36	Cap Stacks 1 Post Mises Maximum	1,5725E+07	Pa
44	P37	Cap Stacks 2 Post Mises Maximum	1,0922E+07	Pa
45	P38	Cap Stacks 3 Post Mises Maximum	1,4779E+07	Pa
46	P39	Cap Stacks Intermediate Mises Maximum	1,0672E+07	Pa
47	P40	Spark Gap 1 Post Mises Maximum	2,0635E+07	Pa
48	P41	Spark Gap 2 Post Mises Maximum	1,0922E+07	Pa
49	P42	Spark Gap 3 Post Mises Maximum	1,2713E+07	Pa
50	P43	Reactor Post Mises Maximum	6,1872E+06	Pa
51	P44	DMOV Post Mises Maximum	4,8686E+05	Pa
52	P45	MOV Post Mises Maximum	6,6662E+06	Pa

Kuva 4.15. Kuvassa näkyy ympyröitynä parametrisoitu maksimijännitystulos kipinäkoopin 3 pystyeristimistä.

#### 4.7.1 Tulokset dynaamisissa kuormitustapauksissa

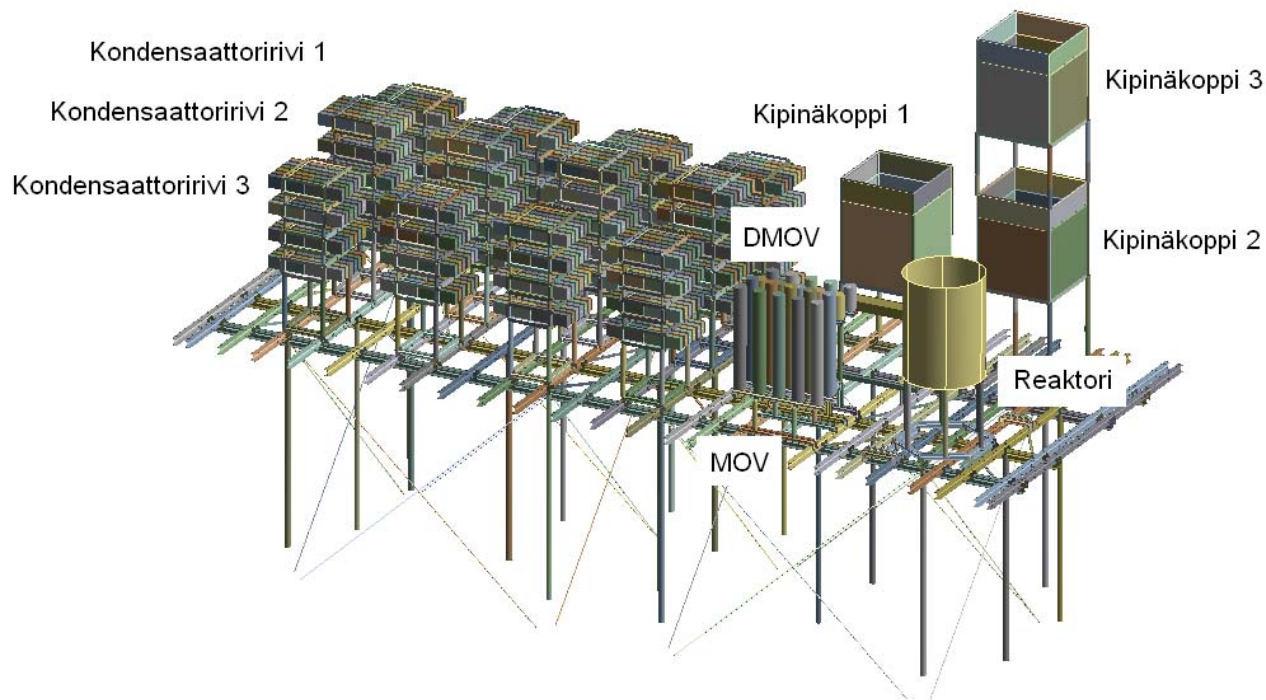
Asiakkaan vaatimusten mukaisesti dynaamisissa kuormitustapauksissa vertailuarvoissa on oltava mukana sarjapariston painon ja esikiristyksen aiheuttamat rasitukset sekä vastespektrimenetelmästä saadut rasitukset. Mechanical-ohjelma ei suoraan pysty laskemaan sellaista tehtävää. Se voidaan kuitenkin suorittaa kahden analyysin tulosten summaamisella Design Assessment –analyysissä. Käytännössä poistetaan kustakin harusparista toinen. Sitten tehdään staattinen analyysi, jossa rasitukset ovat painosta johtuvia. Seuraavaksi tehdään ominaisarvo- ja vastespektrianalyysi. Lopulta summataan tulokset Design Assessment –analyysissä. Siinä saadut maksimitulokset voidaan parametrisoida ja nähdään helposti jokaisen tulosryhmän maksimiarvot Parameter Set –näkyvässä.

Yksittäisen haruksen voimien tulokset dynaamisissa kuormitustapauksissa tulee ymmärtää harusparin tuloksena. Poistetun haruksen tulos on siis sama kuin malliin jääneen haruksen tulos.

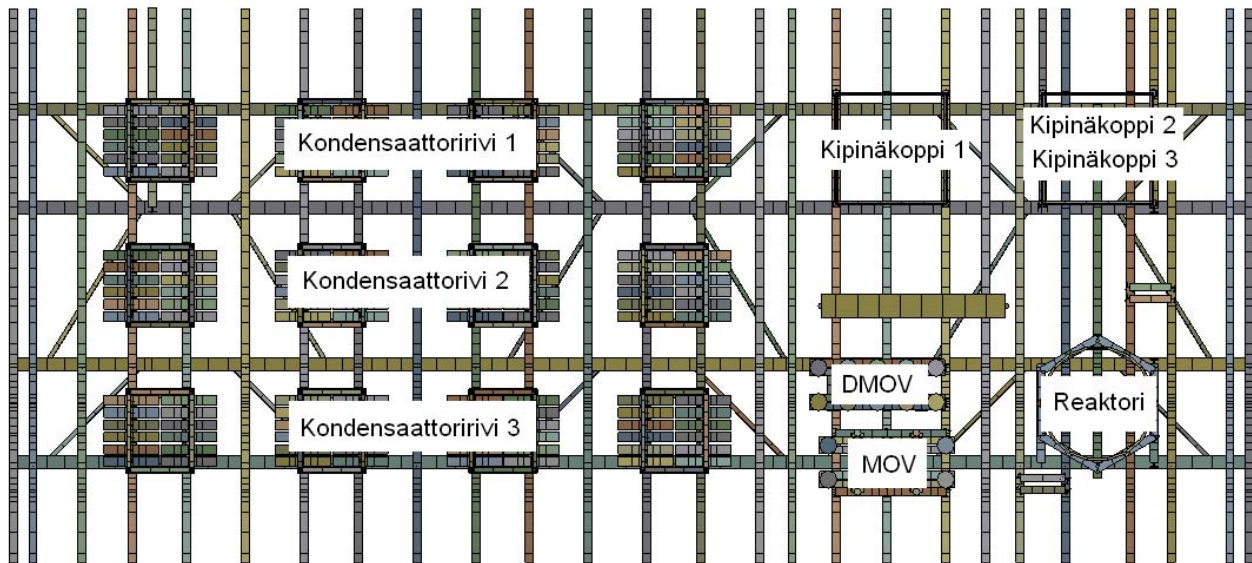
## 5 ANALYYSIN TULOKSET

Kuormitustapauksista saadut tulokset on esitetty kuudessa luvussa, joissa tuloksia esitetään ja käsitellään. Tuloksia on ryhmitelty yhteen selkeyden vuoksi. Luvuissa esitellään tulosryhmien suurimmat arvot. Yksityiskohtaisempi tulosten esittely kaikista kuormitustilanteista löytyy työn liiteosasta. Ensimmäisessä luvussa käsitellään ne staattiset kuormitustilanteet, joissa rasiasta aiheuttaa sarjapariston oma paino, harusten esikiristys ja tuulivoimat. Toisessa luvussa käsitellään ne staattiset kuormitustilanteet, joissa on mukana jääkuorma. Kolmas luku käsittelee staattista erityiskuormitustapausta, jolloin rakenteen rasiatun lavaa kannatteleva pystyeristin on pettänyt. Neljäs luku käsittelee dynaamista kuormitustilannetta. Viides luku käsittelee dynaamista kuormitustapausta, jossa on mukana jääkerros. Kuudes luku on yhteenveto suurimmista rasituksista kaikissa kuormitustapauksissa.

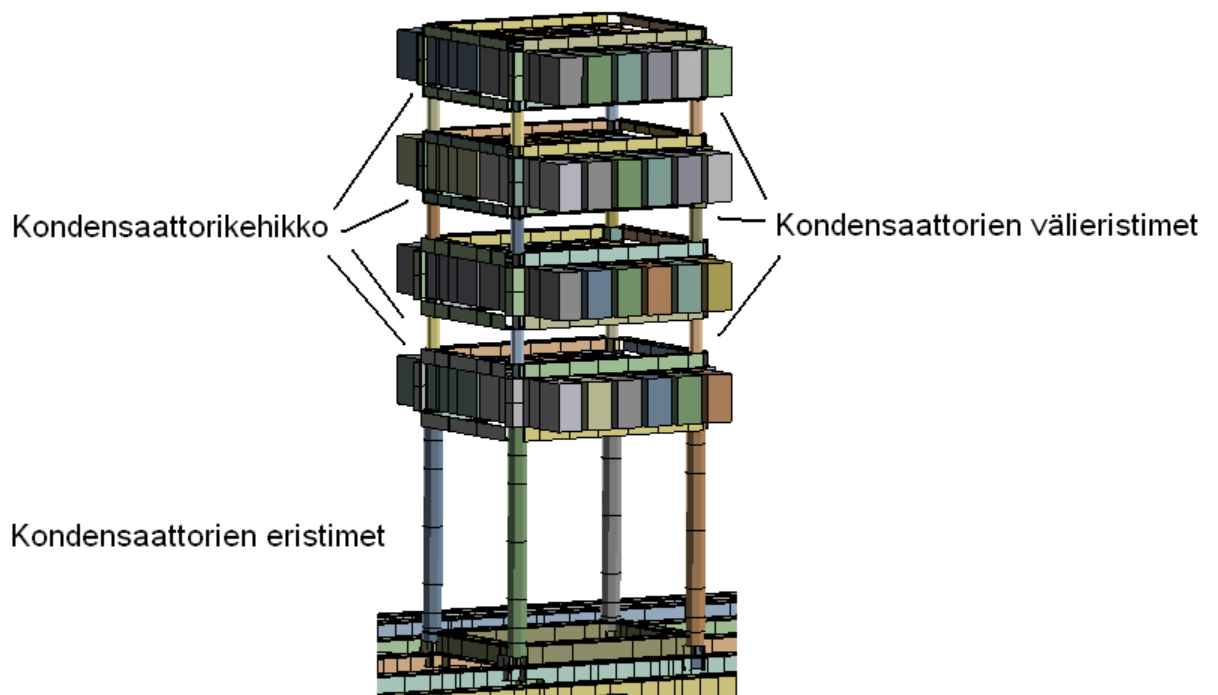
Jokaisessa kuormitustapauksessa tarkastellaan rakenteen samoja osia. Tarkasteltaviin osiin kuuluu lavaa kannattelevat pystyeristimet, vetoharukset, lavan ensisijaiset ja toissijaiset teräspalkit, laitteita tukevat pienemmät teräspalkit ja laitteiden alla olevat eristimet. Kuvissa 5.1 – 5.3 näkyvät tarkasteltavat osat.



Kuva 5.1. Kuvassa näkyvät rakenteen tarkasteltavien osien nimet.



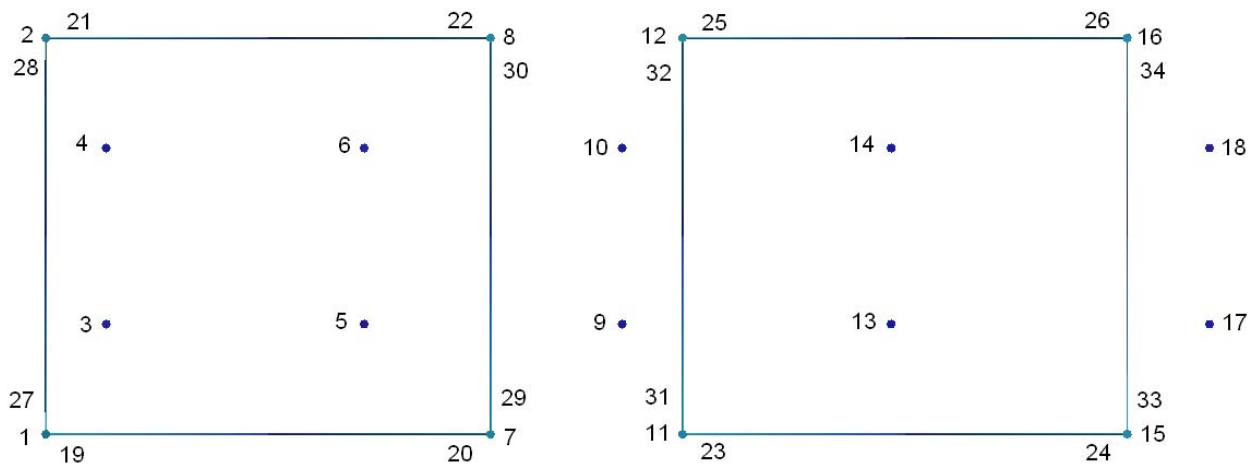
Kuva 5.2. Kuvassa näkyvät rakenteen tarkasteltavat osat ylhäältäpäin.



Kuva 5.3. Kuvassa näkyy kondensaattorien eristimet, välieristimet ja kehikko.

Jännitys- ja voimatulosten lisäksi kirjataan ylös sarjapariston tukireaktiot. Lavaa kannattelevilla pystyeristimillä tukireaktiot ovat akselin suuntaisia voimia kuten myös haruksilla. Muita tukireaktioita ei ole, koska sauvaelementti saa ainoastaan puristusta tai vetoa. Harukset voivat saada ainoastaan vetoa köysimäisen luonteensa vuoksi. Tukireaktioiden suuruudet on koottu voima- ja jännitystulosten jälkeen taulukoihin siten, että pys-

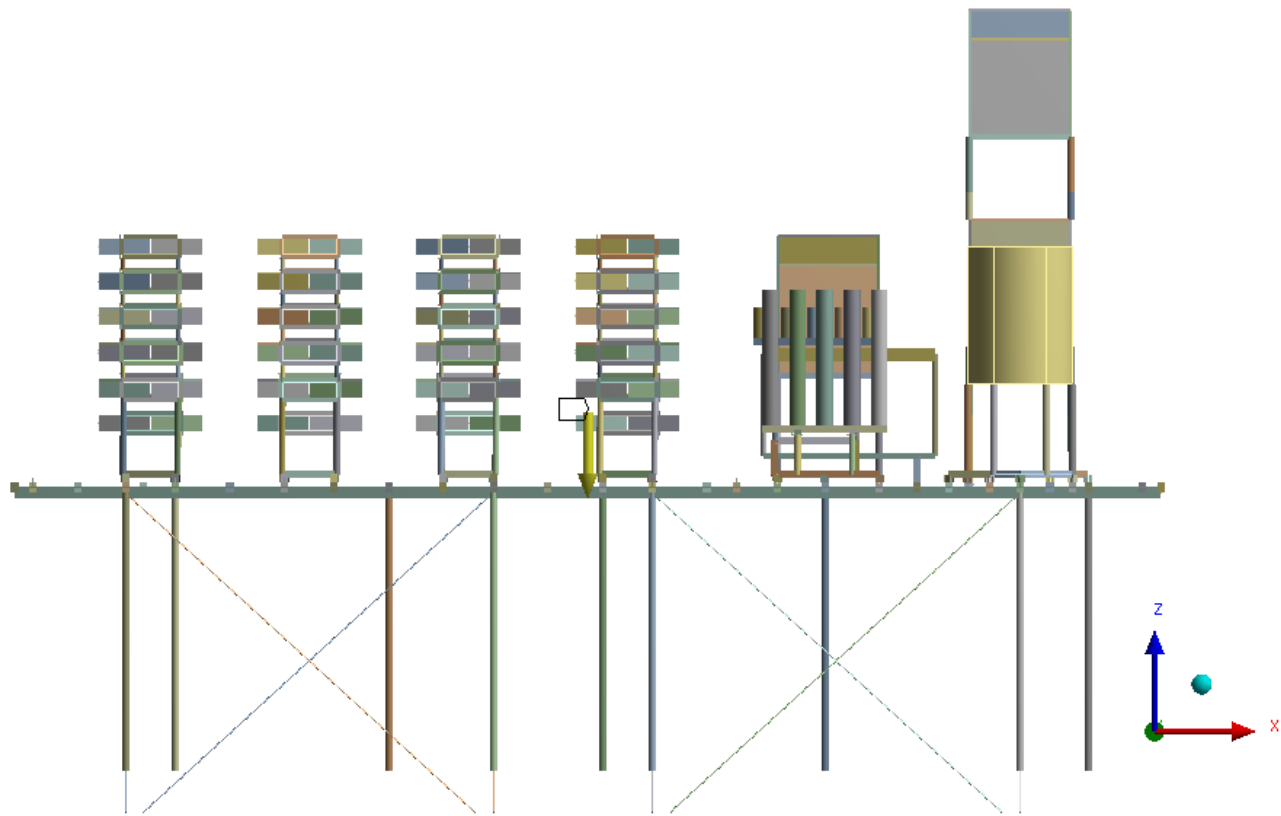
tyeristimien positiiviset tukireaktiot aiheuttavat puristusta ja harusten positiiviset arvot aiheuttavat vetoa. Tukireaktioiden numerointi on kuvan 5.4 mukainen.



*Kuva 5.4. Kuvassa näkyy tukireaktioiden numerointi, jota käytetään tuloksissa. Kuva on ylhäältäpäin siten, että kondensaattorit ovat vasemmalla.*

Tukireaktiot on numeroitu siten, että 1-18 tarkoittaa pystyeristimien tukireaktioita ja 19-34 harusten tukireaktioita.

Sarjapariston massakeskipiste on globaalin koordinaatiston pisteessä ( $X = 11,37$  m,  $Y = 5,55$  m,  $Z = 2,24$  m). Kokonaismassa on 161 tonnia. Kuvassa 5.5 on sarjapariston massakeskipiste.



*Kuva 5.5. Sarjapariston massakeskipiste sijaitsee kuvassa keskellä keltaisen nuolen lähtöpisteessä.*

## 5.1 Tulokset kuormitustapauksissa 1-5

Kuormitustapauksissa 1-5 kuormitusta aiheuttavat oma paino ja harusten esikiristys sekä tuulivoima, minkä suunta vaihtelee. Taulukkoihin 5.1. ja 5.2. on koottu kuormitustapauksissa esiintyvät suurimmat rasitukset.

*Taulukko 5.1. Rasitusten suurimmat arvot kuormitustapauksissa 1-5.*

Rakenneosa	Sallittu jännitys /voima	Max S/F (1)	n <sub>vaadittu</sub> (2)	n <sub>laskettu</sub> (3)	KT (4)
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 189	2,0	<b>3,2</b>	<b>KT5</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 94	2,0	<b>4,5</b>	<b>KT4</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]			
- Ensisijaiset	350 MPa	100,6	1,5	<b>3,5</b>	<b>KT4</b>
- Toissijaiset	350 MPa	122,3	1,5	<b>2,9</b>	<b>KT2</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	170,3	1,5	<b>2,1</b>	<b>KT4</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	12,1	1,5	<b>28,9</b>	<b>KT2</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	113,4	1,5	<b>3,1</b>	<b>KT3</b>
<b>Laitteiden eristimet</b> (posliini)	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]			
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	15,6	2,0	<b>5,8</b>	<b>KT2</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	12,2	2,0	<b>7,4</b>	<b>KT4</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	15,1	2,0	<b>6,0</b>	<b>KT2</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	13,7	2,0	<b>6,6</b>	<b>KT4</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	22,6	2,0	<b>4,0</b>	<b>KT3</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	57,5	2,0	<b>1,6</b>	<b>KT3</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	12,4	2,0	<b>7,2</b>	<b>KT2</b>
- Reaktori	90 MPa	14,3	2,0	<b>6,3</b>	<b>KT3</b>
- DMOV	90 MPa	0,5	2,0	<b>199,7</b>	<b>KT4</b>
- MOV	90 MPa	9,4	2,0	<b>9,6</b>	<b>KT4</b>

(1) Tulos on maksimivoima tai -jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

(2) Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

(3) Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

(4) Lyhenne on kyseisestä kuormitustapauksesta.

Taulukko 5.2. Tukireaktioiden suurimmat arvot kuormitustapauksissa 1-5.

Tukireaktio <sup>(1)</sup>	F [kN]	KT <sup>(3)</sup>	Tukireaktio <sup>(2)</sup>	F [kN]	KT <sup>(3)</sup>
TR 1	164	<b>KT5</b>	TR 19	54	<b>KT2</b>
TR 2	175	<b>KT4</b>	TR 20	54	<b>KT3</b>
TR 3	123	<b>KT3</b>	TR 21	56	<b>KT2</b>
TR 4	133	<b>KT3</b>	TR 22	57	<b>KT3</b>
TR 5	149	<b>KT5</b>	TR 23	54	<b>KT2</b>
TR 6	162	<b>KT4</b>	TR 24	54	<b>KT3</b>
TR 7	170	<b>KT5</b>	TR 25	57	<b>KT2</b>
TR 8	185	<b>KT4</b>	TR 26	57	<b>KT3</b>
TR 9	103	<b>KT2</b>	TR 27	94	<b>KT4</b>
TR 10	106	<b>KT2</b>	TR 28	93	<b>KT5</b>
TR11	157	<b>KT5</b>	TR 29	89	<b>KT4</b>
TR 12	150	<b>KT4</b>	TR 30	89	<b>KT5</b>
TR 13	117	<b>KT5</b>	TR 31	88	<b>KT4</b>
TR 14	69	<b>KT3</b>	TR 32	89	<b>KT5</b>
TR 15	189	<b>KT5</b>	TR 33	89	<b>KT4</b>
TR 16	184	<b>KT4</b>	TR 34	89	<b>KT5</b>
TR 17	47	<b>KT2</b>			
TR 18	86	<b>KT2</b>			

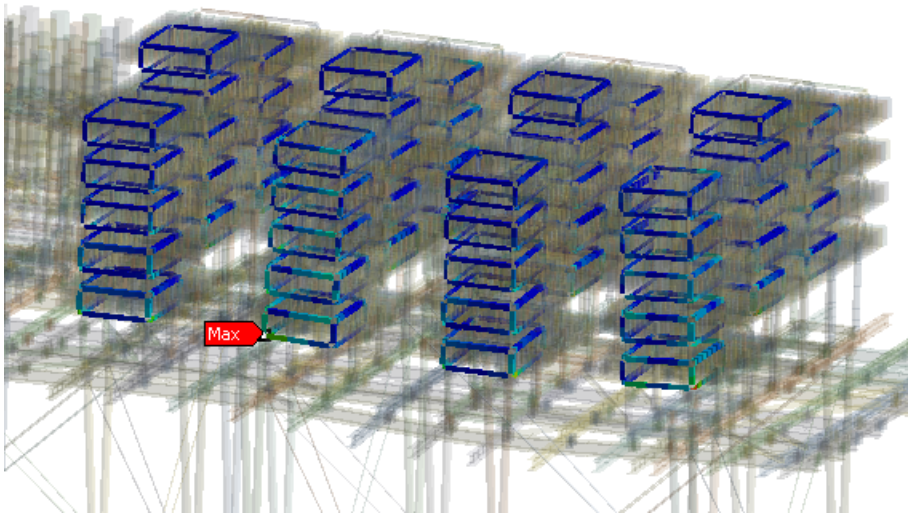
<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.

<sup>(3)</sup> Lyhenne on kyseisestä kuormitustapauksesta.

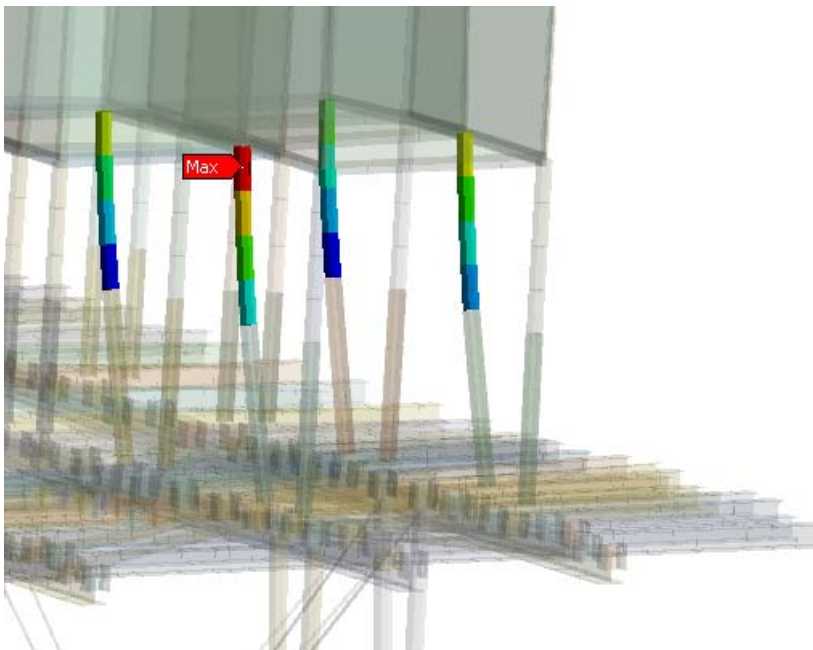
Taulukon 5.2. tuloksista nähdään, että lähes kaikille pystyeristimille aiheutuu suuri voima, kun lavaa kuormitetaan eri suuntaisella tuulella. Pienimmät voimat tulevat eristimiä vastaaville tukireaktioille 14, 17 ja 18. Nämä eristimet ovat lavan kevyemmässä päässä. Haruksista suurimmat voimat aiheutuvat niille, jotka ovat lavan Y-suuntaisen akselin suuntaisia. X-akselin suunnassa ovat harukset saavat selvästi pienempiä voimia. Tämä selittyy sillä, että Y-suunnassa lavan poikkipinta-ala tuulta vasten on suurempi kuin X-suunnassa.

Taulukosta 5.1 nähdään, että teräspalkeille aiheutuu oman painon ja tuulen takia varsin suuria jännityksiä. Pienin varmuusluku teräsrakenteilla on kondensaattorikehikoiden palkeilla 2,1 (sallittu on 1,5). Tähän tulokseen päästään kuormitustapauksessa 4. Kuvassa 5.6 näkyy kehikoiden maksimijännityksen sijainti kuormitustapauksessa 4.



*Kuva 5.6. Kuvassa näkyy kondensaattorikehikoiden suurimman jännityksen sijainti kuormitustapauksessa 4.*

Laitteiden eristimistä pienin varmuusluku 1,6 on kipinäkoppi 3:n eristimillä (sallittu on 2,0). Sallittu raja siis alittuu. Tämä tulos saadaan kuormitustilanteissa 2 ja 3. Kuvassa 5.7 näkyy kipinäkoppi 3:n eristimien maksimijännityksen sijainti kuormitustapauksessa 2.



*Kuva 5.7. Kuvassa näkyy kipinäkoppi 3:n eristimien suurimman jännityksen sijainti kuormitustapauksessa 2.*



## 5.2 Tulokset kuormitustapauksissa 6-10

Kuormitustapauksissa 6-10 kuormitusta aiheuttavat oman painon ja harusten esikiristyksen lisäksi jää sekä tuulivoima, minkä suunta vaihtelee. Tapauksessa 6 jääkerros aiheuttaa 76 %:n lisäyksen massaansa ja muissa tapauksissa 50 %:n massan lisääntymisen. Taulukkoihin 5.3. ja 5.4. on koottu kuormitustapauksissa esiintyvät suurimmat rasitukset.

Taulukko 5.3. Rasitusten suurimmat arvot kuormitustapauksissa 6-10.

Rakenneosa	Sallittu jännitys /voima	Max S/F (1)	n <sub>vaadittu</sub> (2)	n <sub>laskettu</sub> (3)	KT (4)
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 271	2,0	<b>2,2</b>	<b>KT6</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 30	2,0	<b>14,1</b>	<b>KT9</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]			
- Ensisijaiset	350 MPa	143,3	1,5	<b>2,4</b>	<b>KT6</b>
- Toissijaiset	350 MPa	171,2	1,5	<b>2,0</b>	<b>KT6</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	164,4	1,5	<b>2,2</b>	<b>KT6</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	16,6	1,5	<b>21,1</b>	<b>KT6</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	179,8	1,5	<b>1,9</b>	<b>KT6</b>
<b>Laitteiden eristimet</b> (posliini)	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]			
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	14,3	2,0	<b>6,3</b>	<b>KT8</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	3,5	2,0	<b>25,8</b>	<b>KT7</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	11,3	2,0	<b>8,0</b>	<b>KT8</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	17,1	2,0	<b>5,3</b>	<b>KT6</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	6,5	2,0	<b>13,9</b>	<b>KT7</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	15,9	2,0	<b>5,6</b>	<b>KT8</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	3,8	2,0	<b>23,7</b>	<b>KT7</b>
- Reaktori	90 MPa	8,7	2,0	<b>10,4</b>	<b>KT8</b>
- DMOV	90 MPa	0,3	2,0	<b>319,9</b>	<b>KT8</b>
- MOV	90 MPa	11,6	2,0	<b>6,7</b>	<b>KT6</b>

(1) Tulos on maksimivoima tai -jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

(2) Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

(3) Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

(4) Lyhenne on kyseisestä kuormitustapauksesta.

Taulukko 5.4. Tukireaktioiden suurimmat arvot kuormitustapauksissa 6-10.

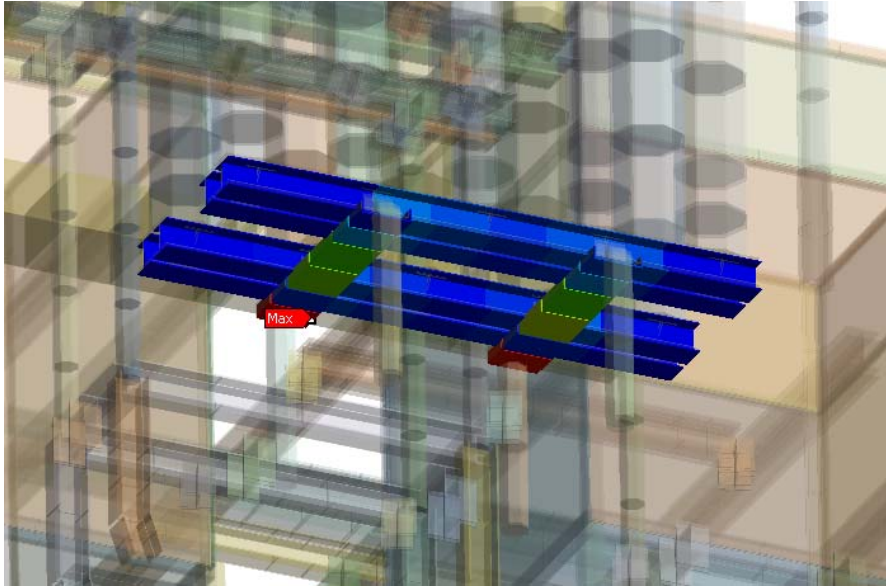
Tukireaktio <sup>(1)</sup>	F [kN]	KT <sup>(3)</sup>	Tukireaktio <sup>(2)</sup>	F [kN]	KT <sup>(3)</sup>
TR 1	126	<b>KT6</b>	TR 19	18	<b>KT7</b>
TR 2	143	<b>KT6</b>	TR 20	18	<b>KT8</b>
TR 3	227	<b>KT6</b>	TR 21	19	<b>KT7</b>
TR 4	246	<b>KT6</b>	TR 22	19	<b>KT8</b>
TR 5	247	<b>KT6</b>	TR 23	18	<b>KT7</b>
TR 6	271	<b>KT6</b>	TR 24	18	<b>KT8</b>
TR 7	122	<b>KT10</b>	TR 25	19	<b>KT7</b>
TR 8	151	<b>KT6</b>	TR 26	19	<b>KT8</b>
TR 9	195	<b>KT6</b>	TR 27	30	<b>KT9</b>
TR 10	203	<b>KT6</b>	TR 28	29	<b>KT10</b>
TR11	124	<b>KT6</b>	TR 29	28	<b>KT9</b>
TR 12	98	<b>KT9</b>	TR 30	29	<b>KT10</b>
TR 13	213	<b>KT6</b>	TR 31	28	<b>KT9</b>
TR 14	99	<b>KT6</b>	TR 32	28	<b>KT10</b>
TR 15	157	<b>KT6</b>	TR 33	28	<b>KT9</b>
TR 16	96	<b>KT9</b>	TR 34	28	<b>KT10</b>
TR 17	81	<b>KT6</b>			
TR 18	104	<b>KT6</b>			

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.

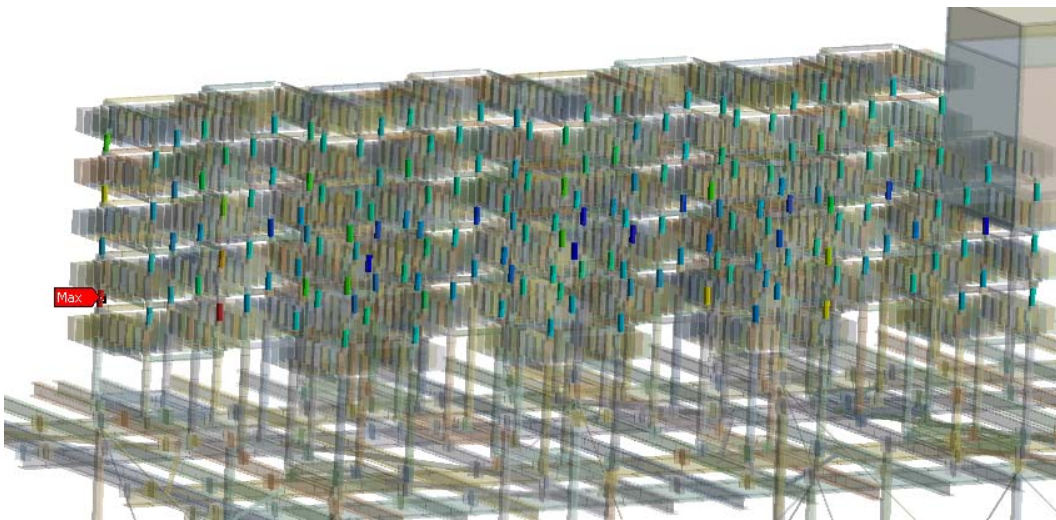
<sup>(3)</sup> Lyhenne on kyseisestä kuormitustapauksesta.

Taulukosta 5.3 nähdään, että 45 mm:n jääkerros on rakenteelle haastavampi kuin 30 mm:n jääkerroksen ja tuulen (90 km/h) yhteisvaikutus suurimmassa osassa rakenneosia. Lavan pystyeristimien maksimipuristusvoima on melko suuri (271 kN). Varmuusluku 2,2 on lähellä sallittua arvoa 2,0. Myös teräspalkkien rasitukset ovat suuret. Pienimmät varmuusluvut saadaan MOV-kehikon palkeille 1,9 (sallittu 1,5) ja lavan toissijaisille palkeille 2,0 (sallittu 1,5). Eristimistä pienin varmuus saadaan kondensaattorien väliseristimille 5,3 (sallittu 2,0). Kuvassa 5.8 näkyy MOV-kehikon palkkien suurimman jännityksen sijainti kuormitustapauksessa 6.



*Kuva 5.8. Kuvassa näkyy MOV-kehikon suurimman jännityksen sijainti kuormitustapauksessa 6. Kuva on alaviistosta.*

Kuvassa 5.9 näkyy välieristimien maksimijännityksen sijainti kuormitustapauksessa 6.



*Kuva 5.9. Kuvassa näkyy kondensaattorien välieristimien suurimman jännityksen sijainti kuormitustapauksessa 6.*

### 5.3 Tulokset kuormitustapauksessa 11

Kuormitustapaus 11 on erityiskuormitustapaus, jossa yksi lavan pystyeristimistä on pettänyt. Kuormitukseksi valitaan tapauksista 7-10 se, mikä aiheuttaa suurimmat rasitukset. Edellisessä kappaleessa päädyttiin tapaukseen 9. Huomataan, että suurin puristusvoima aiheutuu tuelle 6. Poistetaan se laskentamallista ja suoritetaan laskenta uudestaan tapauksen 9 kuormilla. Taulukoissa 5.5 ja 5.6 on tarkasteltavien rakenneosien tulokset kuormitustapauksessa 11.

Taulukko 5.5. Kuormitustapauksen 11 tulokset.

Rakenneosa	Sallittu jännitys /voima	Max S/F <sup>(1)</sup>	n <sub>vaadittu</sub> <sup>(2)</sup>	n <sub>laskettu</sub> <sup>(3)</sup>
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 327	1,1	<b>1,8</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 30	2,0	<b>14,2</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]		
- Ensisijaiset	350 MPa	151,0	1,1	<b>2,3</b>
- Toissijaiset	350 MPa	209,2	1,1	<b>1,7</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	183,2	1,1	<b>1,9</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	13,2	1,1	<b>26,5</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	158,0	1,1	<b>2,2</b>
<b>Laitteiden eristimet</b> (posliini)	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]		
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	18,2	1,1	<b>4,9</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	9,4	1,1	<b>9,5</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	6,5	1,1	<b>13,9</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	18,9	1,1	<b>4,8</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	5,1	1,1	<b>17,6</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	9,6	1,1	<b>9,3</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	2,6	1,1	<b>34,6</b>
- Reaktori	90 MPa	5,6	1,1	<b>15,9</b>
- DMOV	90 MPa	0,2	1,1	<b>486,5</b>
- MOV	90 MPa	12,1	1,1	<b>7,4</b>

<sup>(1)</sup> Tulos on maksimivoima tai -jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

<sup>(2)</sup> Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

<sup>(3)</sup> Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

Taulukossa 5.6 on pystyeristimien tukireaktiot kuormitustapauksessa 11.

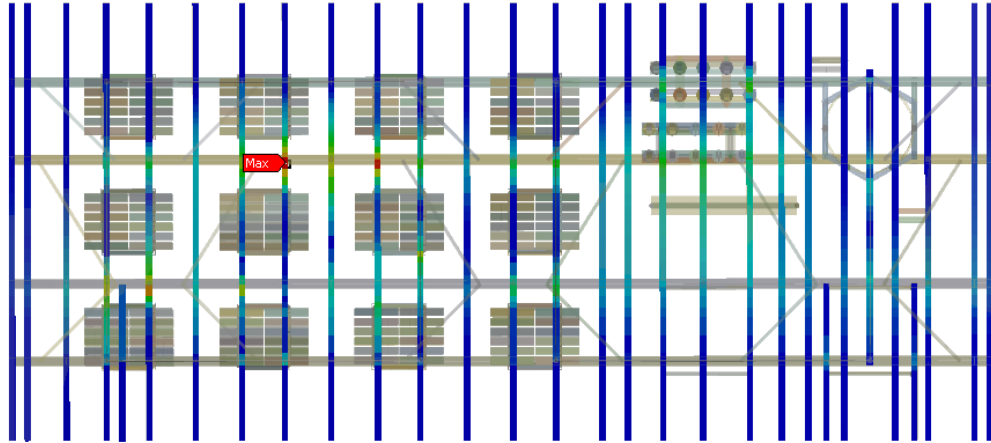
*Taulukko 5.6. Taulukossa on tukireaktiot kuormitustapauksessa 11.*

<b>Tukireaktio <sup>(1)</sup></b>	<b>F [kN]</b>	<b>Tukireaktio <sup>(2)</sup></b>	<b>F [kN]</b>
TR 1	88	TR 19	10
TR 2	131	TR 20	10
TR 3	177	TR 21	9
TR 4	280	TR 22	9
TR 5	<b>327</b>	TR 23	9
TR 6	-	TR 24	10
TR 7	44	TR 25	10
TR 8	265	TR 26	10
TR 9	192	TR 27	<b>30</b>
TR 10	188	TR 28	0
TR11	101	TR 29	28
TR 12	66	TR 30	0
TR 13	175	TR 31	27
TR 14	82	TR 32	0
TR 15	118	TR 33	28
TR 16	97	TR 34	0
TR 17	73		
TR 18	84		

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

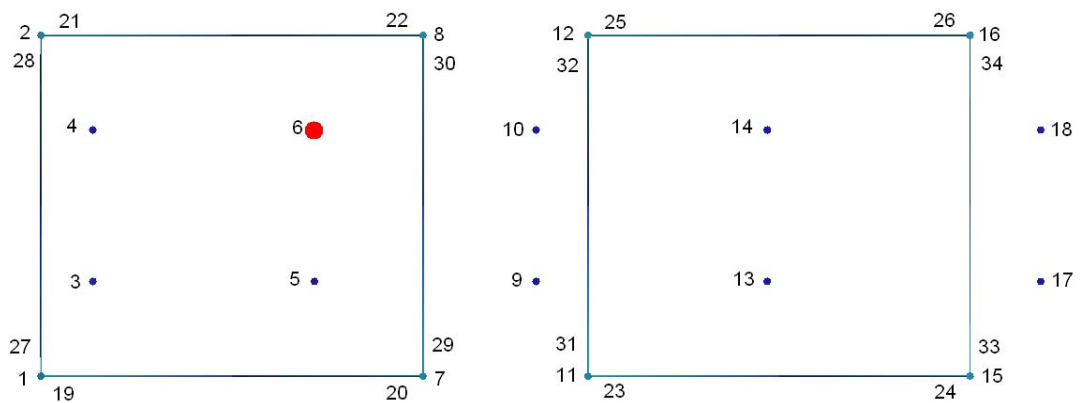
<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.

Lavan pystyeristimien maksimipuristusvoima kasvaa selvästi suuremmaksi kuin kuormitustapauksissa 1-10. Myös teräsrakenteiden varmuusluvut saavat pienimmät arvonsa juuri tässä kuormitustapauksessa. Toisaalta sallitut varmuusluvut ovat myös pienemmät. Kuvassa 5.10 näkyy lavan toissijaisten palkkien maksimijännityksen sijainti kuormitustapauksessa 11.



Kuva 5.10. Kuvassa näkyy toissijaisten palkkien maksimijännityksen sijainti kuormitustapauksessa 11. Kuva on alhaaltapäin.

Kuvassa 5.11 näkyy poistettu pystyeristin.



Kuva 5.11. Kuvassa näkyy punaisella merkittynä kuormitustapauksessa 11 poistettu pystyeristin. Kuva on ylhäältäpäin.

## 5.4 Ominaisarvoanalyysi

Ominaisarvoanalyysi antaa hyödyllistä tietoa rakenteen värähtelyyn liittyen, jota tarvitaan vastespektrimenetelmässä. Laskentamallissa poistetaan puolet haruksista liiallista jäykkyyttä aiheuttamasta. Kirjataan ylös lasketut ominaistaajuudet, osallistumiskertoimet sekä modaalimassat. Taulukkoon 5.7 on koottu tulokset.

Taulukko 5.7. Taulukossa näkyy rakenteen värähtelytietoa.

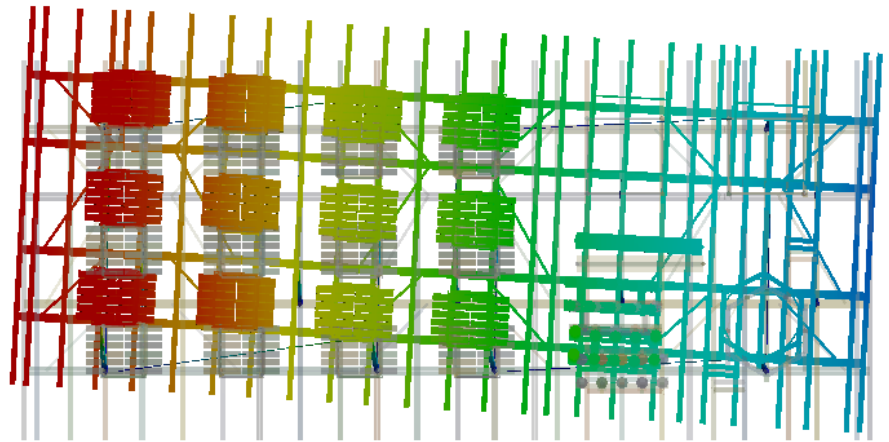
Ominaismuoto	Taajuus	Osallistumiskertoimet			Modaalimassat [t]		
	[Hz]	X	Y	Z	X	Y	Z
f <sub>1</sub>	0,61	-0,254	11,496	-0,004	0,06	132,15	0,00
f <sub>2</sub>	0,66	12,384	0,468	0,004	153,37	0,22	0,00
f <sub>3</sub>	0,74	-0,619	4,683	0,010	0,38	21,93	0,00
f <sub>4</sub>	1,50	-0,313	-0,008	-0,223	0,10	0,00	0,05
f <sub>5</sub>	1,62	-0,289	-0,027	0,211	0,08	0,00	0,04
f <sub>6</sub>	1,67	-0,034	-0,038	0,026	0,00	0,00	0,00
f <sub>7</sub>	1,71	-0,005	-0,209	0,427	0,00	0,04	0,18
f <sub>8</sub>	1,77	-0,007	-0,010	0,294	0,00	0,00	0,09
Yht. <sup>(1)</sup>					154,00	154,34	0,36
suhde <sup>(2)</sup>					<b>0,960</b>	<b>0,962</b>	<b>0,002</b>

<sup>(1)</sup> Rivillä näkyy yhteenlaskettu värähtelevän massan suuruus kahdeksalla ensimmäisellä ominaistaajuudella.

<sup>(2)</sup> Rivillä näkyy yhteenlasketun värähtelevän massan osuus rakenteen kokonaismassasta.

Taulukosta 5.7 nähdään, että ominaistaajuudet ovat lähellä toisiaan. Vastespektrimenetelmässä muotojen yhdistämiseen soveltuu Complete Quadratic Combination – menetelmä. Modaalimassoja tarkastelemalla nähdään, että kolme alinta ominaistaajuutta ovat merkittävimmät rakenteen taajuudet X- ja Y-suunnassa. Asiakkaan vaatimusten mukaisesti ainakin 90 prosenttia rakenteen massasta tulee osallistua värähtelyyn. Tämä vaatimus toteutuu näissä kahdessa suunnassa, mutta ei Z-suunnassa. Z-suuntaan oleva värähtely oletetaan tapahtuvan yli 50 hertsin taajuuksilla, eli rakenteen jäykällä taajuusalueella. Huomioidaan puuttuvan massan osuus analyysissä antamalla sille 50:n hertsin taajuudella oleva kiihtyvyyden. Kuvissa 5.12 – 5.14 näkyy kolmen alimman ominaistaajuuden ominaismuodot.

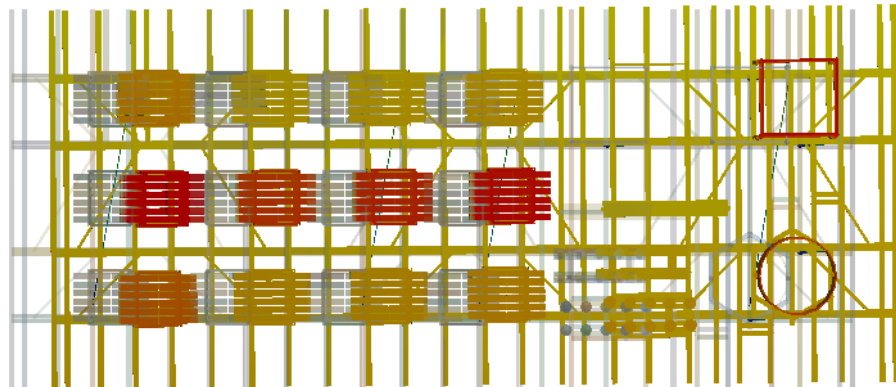
**C: Modal**  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 0,61262 Hz  
 Unit: m  
 Custom  
 20.8.2012 14:08  
 0,0038483  
**0,0037669 Max**  
 0,0029931  
 0,0025655  
 0,0021379  
 0,0017104  
 0,0012828  
 0,00085518  
 0,00042759  
**0 Min**



*Kuva 5.12. Kuvassa näkyy sarjapariston ensimmäinen ominaismuoto. Tasapainoasema näkyy harmaalla värillä.*

Kuvasta 5.12 nähdään, että ensimmäinen ominaismuoto on lavan Y-suuntaista liikettä siten, että kondensaattorien puoleinen pää liikkuu eniten. Kondensaattorien puoleinen pää on massaltaan suurempi pää.

**C: Modal**  
 Total Deformation 2  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 0,66224 Hz  
 Unit: m  
 20.8.2012 14:10  
**0,0031306 Max**  
 0,0027827  
 0,0024349  
 0,002087  
 0,0017392  
 0,0013914  
 0,0010435  
 0,00069568  
 0,00034784  
**0 Min**

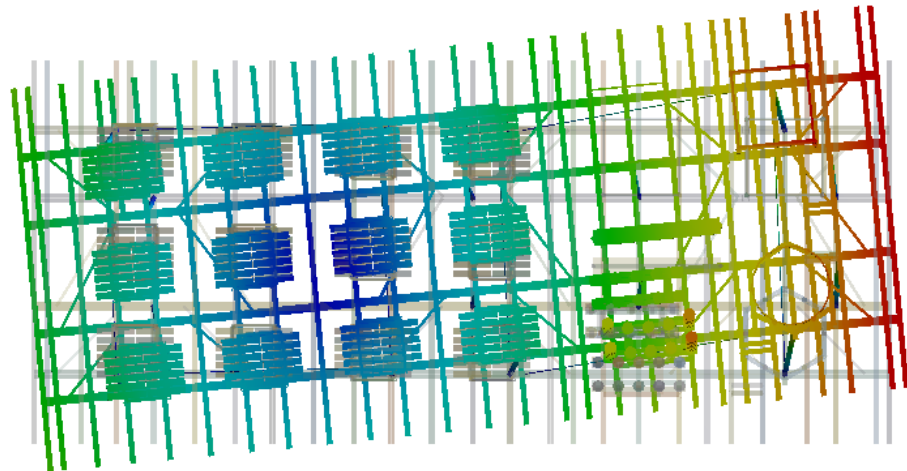
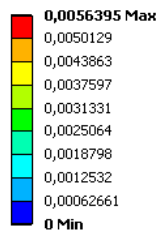


*Kuva 5.13. Kuvassa näkyy sarjapariston toinen ominaismuoto. Tasapainoasema näkyy harmaalla värillä.*

Kuvasta 5.13 nähdään, että toinen ominaismuoto on lavan X-suuntaista liikettä. Y-suuntainen liike on vähäistä.



**C: Modal**  
 Total Deformation 3  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 0,73706 Hz  
 Unit: m  
 20.8.2012 14:10



Kuva 5.14. Kuvassa näkyy sarjapariston kolmas ominaisuusmuoto. Tasapainoasema näkyy harmaalla värillä.

Kuvasta 5.14 nähdään, että kolmas ominaisuusmuoto on Y-suuntaista liikettä siten, että lavan päät liikkuvat vastakkaisiin suuntiin.

Lisäksi ratkaistaan ominaistajuuudet ja muut värähtelytiedot 12 mm:n jääkerroksen aiheuttamalla massalla. Taulukkoon 5.8 on koottu tulokset.

Taulukko 5.8. Taulukossa näkyy rakenteen värähtelytietoa 12 mm:n jääkerroksessa.

Ominaisuusmuoto	Taajuus	Osallistumiskertoimet			Modaalimassat [t]		
	[Hz]	X	Y	Z	X	Y	Z
f <sub>1</sub>	0,56	-0,278	12,593	-0,004	0,08	158,57	0,00
f <sub>2</sub>	0,6	13,566	0,513	0,004	184,05	0,26	0,00
f <sub>3</sub>	0,67	-0,679	5,130	0,011	0,46	26,32	0,00
f <sub>4</sub>	1,37	-0,343	-0,008	-0,244	0,12	0,00	0,06
f <sub>5</sub>	1,48	-0,316	-0,030	0,231	0,10	0,00	0,05
f <sub>6</sub>	1,53	-0,037	-0,042	0,029	0,00	0,00	0,00
f <sub>7</sub>	1,56	-0,005	-0,229	0,467	0,00	0,05	0,22
f <sub>8</sub>	1,61	-0,007	-0,011	0,322	0,00	0,00	0,10
Yht. <sup>(1)</sup>					184,81	185,21	0,44
suhde <sup>(2)</sup>					<b>0,960</b>	<b>0,962</b>	<b>0,002</b>

<sup>(1)</sup> Rivillä näkyy yhteenlaskettu värähtelevän massan suuruus kahdeksalla ensimmäisellä ominaistajuuudella.

<sup>(2)</sup> Rivillä näkyy yhteenlasketun värähtelevän massan osuus rakenteen kokonaismassasta.

## 5.5 Tulokset kuormitustapauksissa 13 ja 14

Kuormitustapauksissa 13 ja 14 rasitukset aiheutuvat sarjapariston painosta sekä maanjäristyskiihtyvyydestä. Kiihtyvyysspektri vaikuttaa kolmessa suunnassa. Tapauksessa 13 kiihtyvyydestä 100 prosenttia vaikuttaa X-suunnassa ja 30 prosenttia Y-suunnassa. Tapauksessa 14 kiihtyvyydestä 100 prosenttia vaikuttaa Y-suunnassa ja 30 prosenttia X-suunnassa. Molemmissa tapauksissa Z-suuntaan vaikuttaa 80 prosenttia kiihtyvyydestä. Taulukkoihin 5.9 ja 5.10 on koottu kuormitustapauksissa esiintyvät suurimmat rasitukset.

Taulukko 5.9. Rasitusten suurimmat arvot kuormitustapauksissa 13-14.

Rakenneosa	Sallittu jännitys /voima	Max S/F (1)	n <sub>vaadittu</sub> (2)	n <sub>laskettu</sub> (3)	KT (4)
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 219	1,5	<b>2,7</b>	<b>KT14</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 93	2,0	<b>4,5</b>	<b>KT14</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]			
- Ensisijaiset	350 MPa	114,9	1,1	<b>3,0</b>	<b>KT14</b>
- Toissijaiset	350 MPa	146,9	1,1	<b>2,4</b>	<b>KT13</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	187,3	1,1	<b>1,9</b>	<b>KT13</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	26,3	1,1	<b>13,3</b>	<b>KT14</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	225,6	1,1	<b>1,6</b>	<b>KT14</b>
<b>Laitteiden eristimet</b> (posliini)	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]			
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	15,2	1,5	<b>5,9</b>	<b>KT13</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	18,4	1,5	<b>4,9</b>	<b>KT14</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	19,5	1,5	<b>4,6</b>	<b>KT14</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	25,3	1,5	<b>3,6</b>	<b>KT13</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	7,1	1,5	<b>12,7</b>	<b>KT13</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	19,4	1,5	<b>4,7</b>	<b>KT13</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	4,0	1,5	<b>22,7</b>	<b>KT13</b>
- Reaktori	90 MPa	14,0	1,5	<b>6,4</b>	<b>KT13</b>
- DMOV	90 MPa	6,5	1,5	<b>13,9</b>	<b>KT13</b>
- MOV	90 MPa	14,1	1,5	<b>6,4</b>	<b>KT13</b>

(1) Tulos on maksimivoima tai -jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

(2) Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

(3) Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

(4) Lyhenne on kyseisestä kuormitustapauksesta.

Taulukko 5.10. Tukireaktioiden suurimmat arvot kuormitustapauksissa 13-14.

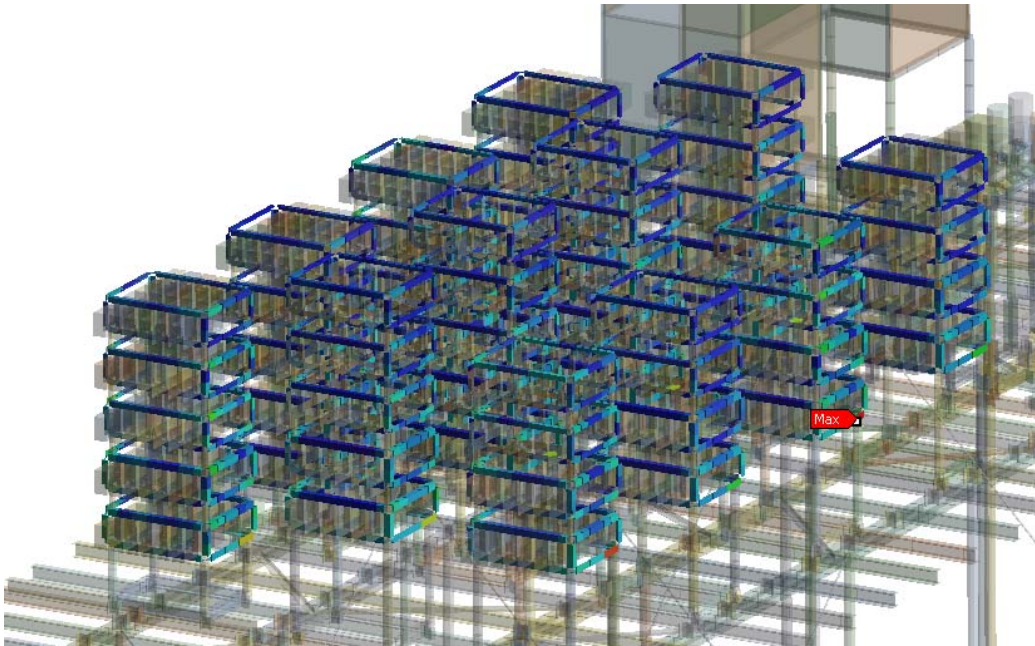
<b>Tukireaktio</b> <sup>(1)</sup>	<b>F [kN]</b>	<b>KT</b> <sup>(3)</sup>	<b>Tukireaktio</b> <sup>(2)</sup>	<b>F [kN]</b>	<b>KT</b> <sup>(3)</sup>
TR 1	116	<b>KT13</b>	TR 19	73	<b>KT13</b>
TR 2	180	<b>KT14</b>	TR 20	0	
TR 3	168	<b>KT14</b>	TR 21	70	<b>KT13</b>
TR 4	182	<b>KT13</b>	TR 22	0	
TR 5	201	<b>KT14</b>	TR 23	73	<b>KT13</b>
TR 6	219	<b>KT14</b>	TR 24	0	
TR 7	136	<b>KT13</b>	TR 25	70	<b>KT13</b>
TR 8	181	<b>KT14</b>	TR 26	0	
TR 9	141	<b>KT13</b>	TR 27	93	<b>KT14</b>
TR 10	146	<b>KT14</b>	TR 28	0	
TR11	112	<b>KT14</b>	TR 29	63	<b>KT14</b>
TR 12	117	<b>KT14</b>	TR 30	0	
TR 13	155	<b>KT13</b>	TR 31	55	<b>KT14</b>
TR 14	60	<b>KT13</b>	TR 32	0	
TR 15	167	<b>KT13</b>	TR 33	52	<b>KT14</b>
TR 16	120	<b>KT13</b>	TR 34	0	
TR 17	57	<b>KT13</b>			
TR 18	69	<b>KT13</b>			

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.

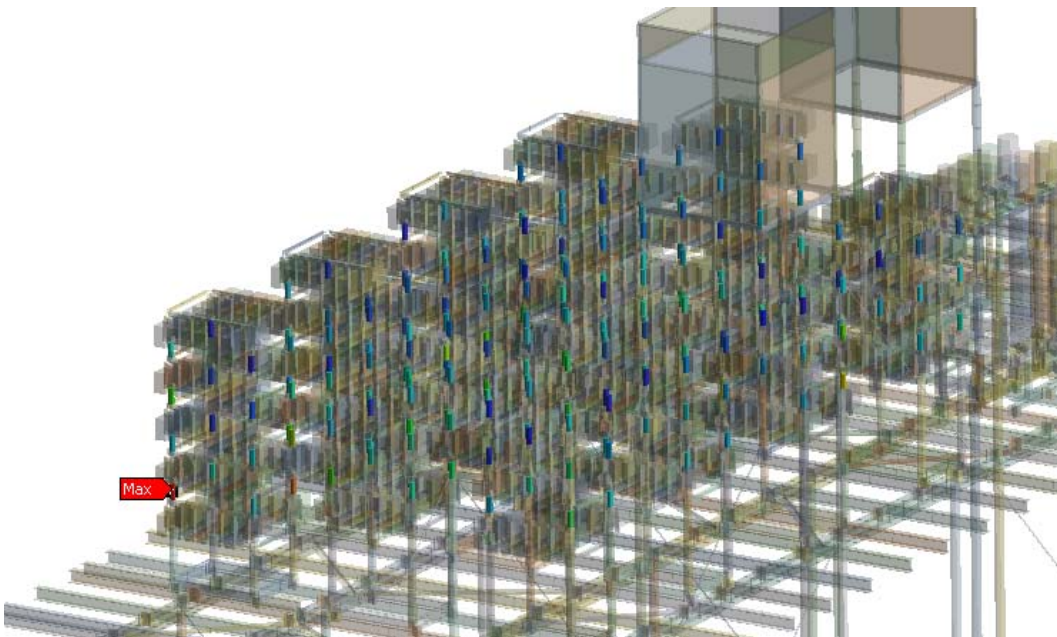
<sup>(3)</sup> Lyhenne on kyseisestä kuormitustapauksesta.

Kuormitustapauksissa 13 ja 14 suurimmat rasitukset tulevat teräspalkeista kondensaattorikehikolle ja MOV-kehikolle. Kondensaattorien väliseristimet saavat eristimistä suurimmat rasitukset. Kuvassa 5.15 näkyy kondensaattorikehikon maksimijännityksen sijainti tapauksessa 13.



*Kuva 5.15. Kuvassa näkyy kondensaattorikehikoiden maksimijännityksen sijainti tapauksessa 13.*

Kuvassa 5.16 näkyy kondensaattorien välieristimien maksimijännityksen sijainti tapauksessa 13.



*Kuva 5.16. Kuvassa näkyy kondensaattorien välieristimien maksimijännityksen sijainti tapauksessa 13.*

## 5.6 Tulokset kuormitustapauksissa 15 ja 16

Kuormitustapauksissa 15 ja 16 rasitukset aiheutuvat sarjapariston painosta, 12 mm jääkuormasta sekä maanjäristyskiihtyvyydestä. Kiihtyvyysspektri vaikuttaa kolmessa suunnassa. Tapauksessa 15 kiihtyvyydestä 100 prosenttia vaikuttaa X-suunnassa ja 30 prosenttia Y-suunnassa. Tapauksessa 16 kiihtyvyydestä 100 prosenttia vaikuttaa Y-suunnassa ja 30 prosenttia X-suunnassa. Molemmissa tapauksissa Z-suuntaan vaikuttaa 80 prosenttia kiihtyvyydestä. Taulukkoihin 5.11 ja 5.12 on koottu kuormitustapauksissa esiintyvät suurimmat rasitukset.

Taulukko 5.11. Rasitusten suurimmat arvot kuormitustapauksissa 15-16.

Rakenneosa	Sallittu jännitys /voima	Max S/F (1)	n <sub>vaadittu</sub> (2)	n <sub>laskettu</sub> (3)	KT (4)
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 262	1,5	<b>2,3</b>	<b>KT16</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 96	2,0	<b>4,4</b>	<b>KT16</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]			
- Ensisijaiset	350 MPa	137,6	1,1	<b>2,5</b>	<b>KT16</b>
- Toissijaiset	350 MPa	171,2	1,1	<b>2,0</b>	<b>KT15</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	212,7	1,1	<b>1,7</b>	<b>KT15</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	28,9	1,1	<b>12,1</b>	<b>KT16</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	262,4	1,1	<b>1,3</b>	<b>KT16</b>
<b>Laitteiden eristimet</b> (posliini)	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]			
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	17,2	1,5	<b>5,2</b>	<b>KT15</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	19,2	1,5	<b>4,7</b>	<b>KT16</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	20,8	1,5	<b>4,3</b>	<b>KT16</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	29,4	1,5	<b>3,1</b>	<b>KT15</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	7,4	1,5	<b>12,2</b>	<b>KT15</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	20,0	1,5	<b>4,5</b>	<b>KT15</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	4,2	1,5	<b>21,7</b>	<b>KT15</b>
- Reaktori	90 MPa	15,3	1,5	<b>5,9</b>	<b>KT15</b>
- DMOV	90 MPa	6,7	1,5	<b>13,5</b>	<b>KT15</b>
- MOV	90 MPa	16,4	1,5	<b>5,5</b>	<b>KT15</b>

(1) Tulos on maksimivoima tai -jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

(2) Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

(3) Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

(4) Lyhenne on kyseisestä kuormitustapauksesta.

Taulukko 5.12. Tukireaktioiden suurimmat arvot kuormitustapauksissa 15-16.

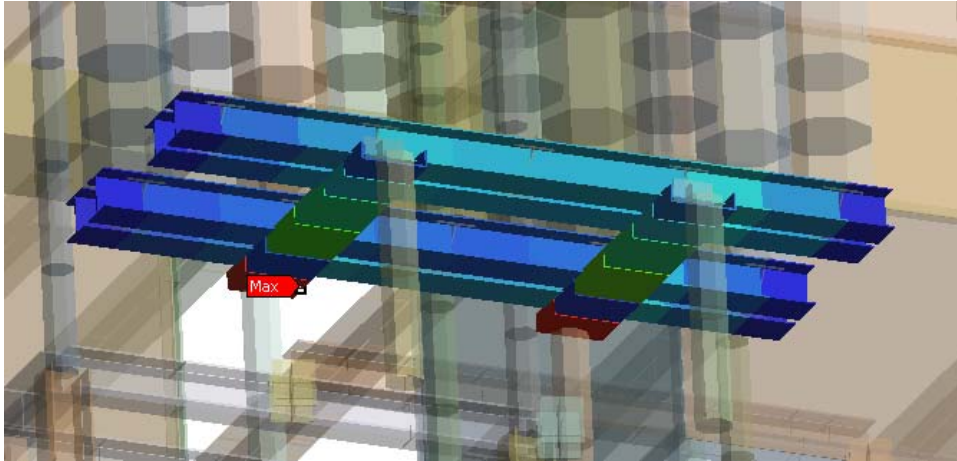
Tukireaktio <sup>(1)</sup>	F [kN]	KT <sup>(3)</sup>	Tukireaktio <sup>(2)</sup>	F [kN]	KT <sup>(3)</sup>
TR 1	138	<b>KT15</b>	TR 19	75	<b>KT15</b>
TR 2	203	<b>KT16</b>	TR 20	0	
TR 3	201	<b>KT16</b>	TR 21	72	<b>KT15</b>
TR 4	218	<b>KT15</b>	TR 22	0	
TR 5	241	<b>KT16</b>	TR 23	75	<b>KT15</b>
TR 6	262	<b>KT16</b>	TR 24	0	
TR 7	157	<b>KT15</b>	TR 25	72	<b>KT15</b>
TR 8	206	<b>KT16</b>	TR 26	0	
TR 9	169	<b>KT15</b>	TR 27	96	<b>KT16</b>
TR 10	175	<b>KT16</b>	TR 28	0	
TR11	134	<b>KT16</b>	TR 29	65	<b>KT16</b>
TR 12	133	<b>KT16</b>	TR 30	0	
TR 13	186	<b>KT15</b>	TR 31	57	<b>KT16</b>
TR 14	72	<b>KT15</b>	TR 32	0	
TR 15	195	<b>KT15</b>	TR 33	54	<b>KT16</b>
TR 16	136	<b>KT15</b>	TR 34	0	
TR 17	67	<b>KT15</b>			
TR 18	83	<b>KT15</b>			

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.

<sup>(3)</sup> Lyhenne on kyseisestä kuormitustapauksesta.

Kuormitustapauksissa 15 ja 16 suurimmat rasitukset tulevat teräspalkeista kondensaattorikehikolle ja MOV-kehikolle. Kondensaattorien väliseristimet saavat eristimistä suurimmat rasitukset. Kuvassa 5.17 näkyy MOV-kehikon maksimijännityksen sijainti tapauksessa 16.



*Kuva 5.17. Kuvassa näkyy MOV-kehikon maksimijännityksen sijainti tapauksessa 16. Kuva on edestä alaviistosta.*

## 5.7 Tulosten yhteenveto

Rakenteen eri osat saavat suurimmat rasituksensa eri kuormitustapauksissa. Taulukkoon 5.13 on koottu rakenteen tarkasteltavien osien maksimirasitukset.

Taulukko 5.13. Rasitusten suurimmat arvot eri kuormitustapauksissa.

Rakenneosa	Sallittu jännitys /voima	Max S/F (1)	n <sub>vaadittu</sub> (2)	n <sub>laskettu</sub> (3)	KT (4)
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 327	1,1	<b>1,8</b>	<b>KT11</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 96	2,0	<b>4,4</b>	<b>KT16</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]			
- Ensisijaiset	350 MPa	151,0	1,1	<b>2,3</b>	<b>KT11</b>
- Toissijaiset	350 MPa	209,2	1,1	<b>1,7</b>	<b>KT11</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	212,7	1,1	<b>1,7</b>	<b>KT15</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	28,9	1,1	<b>12,1</b>	<b>KT16</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	262,4	1,1	<b>1,3</b>	<b>KT16</b>
<b>Laitteiden eristimet</b> (posliini)	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]			
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	18,2	1,1	<b>4,9</b>	<b>KT11</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	19,2	1,1	<b>4,7</b>	<b>KT16</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	20,8	1,1	<b>4,3</b>	<b>KT16</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	29,4	1,1	<b>3,1</b>	<b>KT15</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	22,6	2,0	<b>4,0</b>	<b>KT3</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	57,5	2,0	<b>1,6</b>	<b>KT3</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	12,4	2,0	<b>7,2</b>	<b>KT2</b>
- Reaktori	90 MPa	15,3	1,1	<b>5,9</b>	<b>KT15</b>
- DMOV	90 MPa	6,7	1,1	<b>13,5</b>	<b>KT15</b>
- MOV	90 MPa	16,4	1,1	<b>5,5</b>	<b>KT15</b>

(1) Tulos on maksimivoima tai -jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

(2) Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

(3) Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

(4) Lyhenne on kyseisestä kuormitustapauksesta.

Taulukon 5.13 tuloksista nähdään, että vaikka kuormitustapauksia käytiin läpi useita erilaisia, niin suurimmat rasitukset aiheutuvat vain muutamissa niistä. Haastavimmiksi tapauksiksi osoittautuivat erityiskuormitustapaus, jäällä vahvennetut maanjäristystapaukset ja tuulenpuuskat.



### 5.7.1 Erityiskuormitustapaus

Kuormitustapauksessa 11 kuormia ovat tuuli, jää sekä katkennut pystyeristin. Tässä tapauksessa rakenteen suurimmat osat kuten lavan pystyeristimet sekä ensi- ja toissijaiset palkit ovat suurimmassa rasituksessaan. Sen selittää jään aiheuttama painon lisäys sekä yhden kantavan tuen poistuminen. Myös kondensaattoririvin 1 eristimet saavat suurimmat rasituksensa tässä tapauksessa.

Oltaisiin myös voitu kokeilla muiden lavan pystyeristimien poistamista vuorotellen mallista ainakin kondensaattoririvin 1 puoleisella lavan reunalla. Toisaalta varmuusluvut jäivät tässä tapauksessa varsin suuriksi, joten voidaan olettaa lavan kestävän varsin hyvin muidenkin tukien vuorotellen tapahtuvan poistamisen.

### 5.7.2 Jääkuorma ja maanjäristys

Kuormitustapauksissa 15 ja 16 suurimmat rasitukset ovat hitausvoimista johtuvia. Hitaisvoimat aiheutuvat maanjäristyskiihtyvyyksistä sekä massasta. Lisäksi rakenteen massa on nyt suurempi, koska jääkerros lisää sitä. Suurimmat rasitukset tulevat vetoharuksille, pienemmille teräspalkeille sekä osalle laitteiden eristimistä. Varmuusluvut ovat varsin kaukana sallituista rajoista.

Mielenkiintoista on nähdä, että massan lisäys aiheuttaa rasitusten kasvua. Hitaisvoimien avulla ajateltuna massan lisäys kasvattaa niitä massan ja kiihtyvyyden tulona. Toisaalta kiihtyvyyden arvot pienenevät, koska massan lisäys pienentää ominaistajuuksia, joiden avulla kiihtyvyys luetaan spektriltä. Kiihtyvyyden muutos on kuitenkin täysin riippuvainen siitä, millä alueella spektriä ominaistajuudet ovat ennen massan muutosta.

### 5.7.3 Tuulenpuuskat

Kipinäköppien eristimet ovat ainoat tarkasteltavat osat, joiden maksimirasitukset syntyvät tuulivoiman aiheuttamana (tapaukset 2 ja 3). Suuret rasitukset näillä eristimillä selittää kipinäköppirakenteiden korkeus sekä suuri vaikutuspinta-ala. Näistä syistä varsinkin suurilla tuulen voimakkuuksilla taivutusmomentit kasvavat suuriksi kipinäköppien tukieristimillä. Ainoa tarkasteltava osa, mikä alittaa sallitun varmuuden, on kipinäköppi 2:n eristimet. Vaikka varmuusluvun raja alittuu kahdessa tapauksessa, se ei ole suuri ongelma, koska tuulivoiman suhteen on oltu varsin konservatiivisia analyysissä. Myöskään rajan alitus ei ole kovin suuri.

### 5.7.4 Lautasjousipakan erillinen tarkastelu

Lautasjousipakalle ei ole annettu erillistä varmuuslukua kuormitustapauksissa. Sen on kuitenkin todistettu kestävän ilman hajoamista 170 kN:n dynaamisen voiman. Vertaamalla tätä voimaa siihen maksimivoimaan, joka vetoharukselle analyysissä on saatu, päädytään varmuuslukuun  $170 / 96 = 1,8$ .

### 5.7.5 Sarjapariston kestäminen

Haastavimmiksi kuormitustapauksiksi osoittautuivat erityiskuormitustapaus, jossa yksi pystyeristin on hajonnut, maanjäristys jääkerroksen kanssa sekä tuulenpuuskat. Sarjaparisto kestää kaikki vaaditut kuormitustapaukset. Varmuuslukuja tarkastelemalla ainoa rajan alitus tapahtuu kipinäkoppi 2:n alla olevissa eristimissä tuulen puuskan aiheuttamana. Eristimien murtolujuus ei kuitenkaan ylity ja laskennassa käytettyjen tuulivoimien konservatiivisuuksien takia voidaan näitäkin eristimiä pitää riittävän hyvinä ratkaisuina.

## 6 PÄÄTELMÄT

Lujuusanalyysin perusteella Hydro-Quebecille toimitetut sarjaparistot täyttävät yrityksen mekaaniset vaatimukset. Rakenteen monimutkaisuuden takia suurimmat rasitukset eivät toteudu kaikille tarkasteltaville osille samoissa kuormitustapauksissa. Eri rakenneosien maksimirasitukset esiintyvät staattisissa kuormitustapauksissa, dynaamisissa kuormitustapauksissa ja erityiskuormitustapauksissa. Staattisista kuormitustapauksista haastavin on lavan lyhyemmän sivun suunnassa vaikuttavat tuulenpuuskat. Dynaamisista kuormitustapauksista haastavin on jääkerroksen ja maanjäristyskiihtyvyyden yhdistelmät. Erityiskuormitustapaus tarkoittaa staattista analyysiä rikkiäiselle rakenteelle, johon vaikuttaa lisäksi jään ja tuulikuorman yhdistetty kuormitus.

Ansys 14.0 –ohjelma soveltuu hyvin sarjapariston analysointiin kaikissa tarvittavissa kuormitustapauksissa. Ohjelman käyttö vaatii kuitenkin harjaantumista, koska se ei esimerkiksi tarjoa sauva-elementtiä suoraan vaihtoehdoksi mallia luotaessa. Myöskään jännitystuloksia ja tukireaktioiden arvoja ohjelma ei tarjoa suoraan. Toisaalta ohjelman sähköinen ohje on varsin kattava ja sen avulla ohjelmalla pystyy tekemään paljon enemmän kuin vain valmiita valikkoja seuraamalla. Itse mallintaminen kannattaa tehdä huolella, koska tehokas malli voi säästää paljon laskenta-aikaa. Sarjaparistorakenteessa edut tulevat esiin varsin nopeasti, koska tarkasteltavia kuormitustapauksia on useita.

Vastespektrimenetelmä on tehokas tapa laskea maanjäristyksen aiheuttamat rasitukset. Toisaalta sen ongelma on lineaarisuuden vaatimus. Sarjaparistolava on tuettu maahan köysimäisillä vetoharuksilla, jolloin rakenteen käyttäytyminen on epälineaarista. Vaikka harukset käyttäytyvätkin epälineaarisesti, ne ovat rakenteessa pareittain, jolloin voidaan olettaa sarjapariston käyttäytyvän lineaarisesti. Tässä työssä epälineaarisuuden ongelma on korvattu poistamalla haruspareista aina toinen ja mallintamalla jäljellejäänyt harus sauva-elementillä.

Sarjapariston vastespektrimenetelmään perustuvan analyysin parantamiseksi olisi hyvä tehdä kokeita esikiristetyillä haruspareilla, jotta saadaan luotettavampaa tietoa siitä, kuinka hyvin lineaarinen laskentamalli kuvaa todellista epälineaarista rakennetta. Toinen vaihtoehto on korvata vastespektrimenetelmä aikahistoriamenetelmällä, jolloin lineaarisuuden vaatimus poistuu. Aikahistoriamenetelmässä rakenne ratkaistaan usealla ajanhetkellä maanjäristyskiihtyvyydelle, joka on annettu ajan suhteen. Aikahistoriamenetelmä on toisaalta laskennallisesti huomattavasti raskaampi kuin vastespektrimenetelmä, koska laskentapisteitä on runsaasti enemmän.

## LÄHTEET

- [1] Naeim, F. 1989, The Seismic Design Handbook, Van Nostrand Reinhold, New York
- [2] Chopra, A. K. 1995, Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey
- [3] Wilson, E. L. 2002, Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, Computers and Structures, Inc., Berkeley
- [4] National Building Code of Canada 2005, National Research Council Canada, Ottawa
- [5] Transmission network equipment, buildings and works paraseismic qualifications TET-APG-N-0001, 2007, Hydro Quebec TransEnergy: Additional guidelines
- [6] Ansys 14.0 Help, Ansys, Inc. (Ansys 14.0-ohjelman ohje)

## LIITE 1: TULOKSET KUORMITUSTAPAUKSISSA 1-5

### KT1: Oma paino ja esikiristys

Taulukossa L1.1 on tarkasteltavien rakenneosien tulokset kuormitustapauksessa 1.

*Taulukko L1.1. Kuormitustapauksen 1 tulokset.*

Rakenneosa	Sallittu jännitys /voima	Max S/F <sup>(1)</sup>	n <sub>vaadittu</sub> <sup>(2)</sup>	n <sub>laskettu</sub> <sup>(3)</sup>
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 148	2,0	<b>4,0</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 10	2,0	<b>40,6</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]		
- Ensisijaiset	350 MPa	78,8	1,5	<b>4,4</b>
- Toissijaiset	350 MPa	88,5	1,5	<b>4,0</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	97,7	1,5	<b>3,6</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	9,3	1,5	<b>37,8</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	103,7	1,5	<b>3,4</b>
<b>Laitteiden eristimet</b> (posliini)	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]		
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	7,6	2,0	<b>11,9</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	0,6	2,0	<b>152,0</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	6,1	2,0	<b>14,7</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	9,3	2,0	<b>9,7</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	0,8	2,0	<b>106,6</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	0,0	2,0	<b>4265,9</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	0,4	2,0	<b>241,8</b>
- Reaktori	90 MPa	3,7	2,0	<b>24,4</b>
- DMOV	90 MPa	0,2	2,0	<b>492,4</b>
- MOV	90 MPa	8,2	2,0	<b>11,0</b>

<sup>(1)</sup> Tulos on maksimivoima tai –jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

<sup>(2)</sup> Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

<sup>(3)</sup> Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

Taulukossa L1.2 on pystyeristimien tukireaktiot kuormitustapauksessa 1.

*Taulukko L1.2. Taulukossa on tukireaktiot kuormitustapauksessa 1.*

Tukireaktio <sup>(1)</sup>	F [kN]	Tukireaktio <sup>(2)</sup>	F [kN]
TR 1	89	TR 19	10
TR 2	98	TR 20	10
TR 3	117	TR 21	10
TR 4	127	TR 22	10
TR 5	136	TR 23	10
TR 6	<b>148</b>	TR 24	10
TR 7	87	TR 25	10
TR 8	104	TR 26	10
TR 9	98	TR 27	10
TR 10	102	TR 28	10
TR11	89	TR 29	10
TR 12	72	TR 30	10
TR 13	109	TR 31	10
TR 14	45	TR 32	10
TR 15	113	TR 33	10
TR 16	70	TR 34	10
TR 17	36		
TR 18	48		

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.

Taulukosta L1.1 nähdään varmuuslukuja tarkastelemalla, että jo pelkällä sarjapariston oman painon aiheuttamalla rasituksella lavan pystyeristimien maksimipuristusvoima kasvaa melko suureksi. Myös teräspalkkien rasitukset ovat suuret. Sen sijaan laitteiden eristimien varmuusluvut ovat melko suuret verrattuna vaadittuihin varmuuslukuihin.

**KT2: Oma paino, esikiristys ja tuuli +X160 km/h**

Taulukossa L1.3 on tarkasteltavien rakenneosien tulokset kuormitustapauksessa 2.

*Taulukko L1.3. Kuormitustapauksen 1 tulokset.*

<b>Rakenneosa</b>	<b>Sallittu jännitys /voima</b>	<b>Max S/F <sup>(1)</sup></b>	<b>n<sub>vaadittu</sub> <sup>(2)</sup></b>	<b>n<sub>laskettu</sub> <sup>(3)</sup></b>
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 152	2,0	<b>3,9</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 57	2,0	<b>7,4</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]		
- Ensisijaiset	350 MPa	82,1	1,5	<b>4,3</b>
- Toissijaiset	350 MPa	122,3	1,5	<b>2,9</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	156,9	1,5	<b>2,3</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	12,1	1,5	<b>28,9</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	109,0	1,5	<b>3,2</b>
<b>Laitteiden eristimet (posliini)</b>	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]		
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	15,6	2,0	<b>5,8</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	10,8	2,0	<b>8,3</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	15,1	2,0	<b>6,0</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	10,1	2,0	<b>8,9</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	20,8	2,0	<b>4,3</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	56,4	2,0	<b>1,6</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	12,4	2,0	<b>7,2</b>
- Reaktori	90 MPa	6,6	2,0	<b>13,5</b>
- DMOV	90 MPa	0,4	2,0	<b>220,9</b>
- MOV	90 MPa	7,5	2,0	<b>11,9</b>

<sup>(1)</sup> Tulos on maksimivoima tai -jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

<sup>(2)</sup> Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

<sup>(3)</sup> Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

Taulukossa L1.4 on pystyeristimien tukireaktiot kuormitustapauksessa 2.

*Taulukko L1.4. Taulukossa on tukireaktiot kuormitustapauksessa 2.*

<b>Tukireaktio</b> <sup>(1)</sup>	<b>F [kN]</b>	<b>Tukireaktio</b> <sup>(2)</sup>	<b>F [kN]</b>
TR 1	69	TR 19	54
TR 2	80	TR 20	0
TR 3	111	TR 21	56
TR 4	122	TR 22	0
TR 5	139	TR 23	54
TR 6	<b>152</b>	TR 24	0
TR 7	115	TR 25	<b>57</b>
TR 8	138	TR 26	0
TR 9	103	TR 27	12
TR 10	106	TR 28	7
TR11	89	TR 29	10
TR 12	65	TR 30	10
TR 13	104	TR 31	10
TR 14	21	TR 32	11
TR 15	138	TR 33	8
TR 16	94	TR 34	12
TR 17	47		
TR 18	86		

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.



**KT3: Oma paino, esikiristys ja tuuli –X160 km/h**

Taulukossa L1.5 on tarkasteltavien rakenneosien tulokset kuormitustapauksessa 3.

*Taulukko L1.5. Kuormitustapauksen 3 tulokset.*

<b>Rakenneosa</b>	<b>Sallittu jännitys /voima</b>	<b>Max S/F <sup>(1)</sup></b>	<b>n<sub>vaadittu</sub> <sup>(2)</sup></b>	<b>n<sub>laskettu</sub> <sup>(3)</sup></b>
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 145	2,0	<b>4,1</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 57	2,0	<b>7,4</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]		
- Ensisijaiset	350 MPa	82,6	1,5	<b>4,2</b>
- Toissijaiset	350 MPa	98,5	1,5	<b>3,6</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	152,1	1,5	<b>2,3</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	6,4	1,5	<b>54,5</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	113,4	1,5	<b>3,1</b>
<b>Laitteiden eristimet (posliini)</b>	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]		
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	15,5	2,0	<b>5,8</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	9,9	2,0	<b>9,1</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	14,2	2,0	<b>6,3</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	13,1	2,0	<b>6,9</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	22,6	2,0	<b>4,0</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	57,5	2,0	<b>1,6</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	12,2	2,0	<b>7,4</b>
- Reaktori	90 MPa	14,3	2,0	<b>6,3</b>
- DMOV	90 MPa	0,3	2,0	<b>290,5</b>
- MOV	90 MPa	8,9	2,0	<b>10,2</b>

<sup>(1)</sup> Tulos on maksimivoima tai –jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

<sup>(2)</sup> Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

<sup>(3)</sup> Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

Taulukossa L1.6 on pystyeristimien tukireaktiot kuormitustapauksessa 3.

*Taulukko L1.6. Taulukossa on tukireaktiot kuormitustapauksessa 3.*

<b>Tukireaktio</b> <sup>(1)</sup>	<b>F [kN]</b>	<b>Tukireaktio</b> <sup>(2)</sup>	<b>F [kN]</b>
TR 1	131	TR 19	0
TR 2	140	TR 20	54
TR 3	123	TR 21	0
TR 4	133	TR 22	57
TR 5	132	TR 23	0
TR 6	<b>145</b>	TR 24	54
TR 7	80	TR 25	0
TR 8	95	TR 26	<b>57</b>
TR 9	93	TR 27	8
TR 10	98	TR 28	12
TR 11	112	TR 29	10
TR 12	103	TR 30	11
TR 13	114	TR 31	10
TR 14	69	TR 32	10
TR 15	110	TR 33	13
TR 16	69	TR 34	8
TR 17	25		
TR 18	9		

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.

**KT4: Oma paino, esikiristys ja tuuli +Y160 km/h**

Taulukossa L1.7 on tarkasteltavien rakenneosien tulokset kuormitustapauksessa 4.

*Taulukko L1.7. Kuormitustapauksen 4 tulokset.*

<b>Rakenneosa</b>	<b>Sallittu jännitys /voima</b>	<b>Max S/F <sup>(1)</sup></b>	<b>n<sub>vaadittu</sub> <sup>(2)</sup></b>	<b>n<sub>laskettu</sub> <sup>(3)</sup></b>
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 185	2,0	<b>3,2</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 94	2,0	<b>4,5</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]		
- Ensisijaiset	350 MPa	100,6	1,5	<b>3,5</b>
- Toissijaiset	350 MPa	101,8	1,5	<b>3,4</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	170,3	1,5	<b>2,1</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	11,5	1,5	<b>30,4</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	103,9	1,5	<b>3,4</b>
<b>Laitteiden eristimet (posliini)</b>	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]		
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	13,0	2,0	<b>6,9</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	12,2	2,0	<b>7,4</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	12,0	2,0	<b>7,5</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	13,7	2,0	<b>6,6</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	12,0	2,0	<b>7,5</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	30,5	2,0	<b>3,0</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	9,6	2,0	<b>9,3</b>
- Reaktori	90 MPa	8,3	2,0	<b>10,9</b>
- DMOV	90 MPa	0,5	2,0	<b>199,7</b>
- MOV	90 MPa	9,4	2,0	<b>9,6</b>

<sup>(1)</sup> Tulos on maksimivoima tai -jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

<sup>(2)</sup> Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

<sup>(3)</sup> Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

Taulukossa L1.8 on pystyeristimien tukireaktiot kuormitustapauksessa 4.

*Taulukko L1.8. Taulukossa on tukireaktiot kuormitustapauksessa 4.*

<b>Tukireaktio</b> <sup>(1)</sup>	<b>F [kN]</b>	<b>Tukireaktio</b> <sup>(2)</sup>	<b>F [kN]</b>
TR 1	69	TR 19	9
TR 2	175	TR 20	10
TR 3	106	TR 21	9
TR 4	133	TR 22	9
TR 5	121	TR 23	10
TR 6	162	TR 24	10
TR 7	56	TR 25	10
TR 8	<b>185</b>	TR 26	9
TR 9	103	TR 27	<b>94</b>
TR 10	91	TR 28	0
TR 11	74	TR 29	89
TR 12	150	TR 30	0
TR 13	99	TR 31	88
TR 14	31	TR 32	0
TR 15	90	TR 33	89
TR 16	184	TR 34	0
TR 17	33		
TR 18	24		

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.

**KT5: Oma paino, esikiristys ja tuuli –Y160 km/h**

Taulukossa L1.9 on tarkasteltavien rakenneosien tulokset kuormitustapauksessa 5.

*Taulukko L1.9. Kuormitustapauksen 5 tulokset.*

<b>Rakenneosa</b>	<b>Sallittu jännitys /voima</b>	<b>Max S/F <sup>(1)</sup></b>	<b>n<sub>vaadittu</sub> <sup>(2)</sup></b>	<b>n<sub>laskettu</sub> <sup>(3)</sup></b>
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 189	2,0	<b>3,2</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 93	2,0	<b>4,5</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]		
- Ensisijaiset	350 MPa	90,8	1,5	<b>3,9</b>
- Toissijaiset	350 MPa	97,8	1,5	<b>3,6</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	128,3	1,5	<b>2,8</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	7,2	1,5	<b>48,8</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	105,4	1,5	<b>3,3</b>
<b>Laitteiden eristimet (posliini)</b>	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]		
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	9,1	2,0	<b>9,9</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	12,2	2,0	<b>7,4</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	15,1	2,0	<b>5,9</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	10,4	2,0	<b>8,6</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	10,7	2,0	<b>8,4</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	25,8	2,0	<b>3,5</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	9,8	2,0	<b>9,2</b>
- Reaktori	90 MPa	8,3	2,0	<b>10,9</b>
- DMOV	90 MPa	0,3	2,0	<b>300,7</b>
- MOV	90 MPa	7,2	2,0	<b>12,5</b>

<sup>(1)</sup> Tulos on maksimivoima tai –jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

<sup>(2)</sup> Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

<sup>(3)</sup> Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

Taulukossa L1.10 on pystyeristimien tukireaktiot kuormitustapauksessa 5.

*Taulukko L1.10. Taulukossa on tukireaktiot kuormitustapauksessa 5.*

Tukireaktio <sup>(1)</sup>	F [kN]	Tukireaktio <sup>(2)</sup>	F [kN]
TR 1	164	TR 19	10
TR 2	77	TR 20	9
TR 3	122	TR 21	9
TR 4	118	TR 22	10
TR 5	149	TR 23	10
TR 6	134	TR 24	9
TR 7	170	TR 25	10
TR 8	78	TR 26	10
TR 9	86	TR 27	0
TR 10	105	TR 28	<b>93</b>
TR11	157	TR 29	0
TR 12	47	TR 30	89
TR 13	117	TR 31	0
TR 14	57	TR 32	89
TR 15	<b>189</b>	TR 33	0
TR 16	8	TR 34	89
TR 17	36		
TR 18	69		

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.

## LIITE 2: TULOKSET KUORMITUSTAPAUKSISSA 6-10

### KT6: Oma paino, esikiristys ja 45 mm:n jääkerros

Taulukossa L2.1 on tarkasteltavien rakenneosien tulokset kuormitustapauksessa 6.

Taulukko L2.1. Kuormitustapauksen 6 tulokset.

Rakenneosa	Sallittu jännitys /voima	Max S/F <sup>(1)</sup>	n <sub>vaadittu</sub> <sup>(2)</sup>	n <sub>laskettu</sub> <sup>(3)</sup>
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 271	2,0	<b>2,2</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 10	2,0	<b>41,4</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]		
- Ensisijaiset	350 MPa	143,3	1,5	<b>2,4</b>
- Toissijaiset	350 MPa	171,2	1,5	<b>2,0</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	164,4	1,5	<b>2,2</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	16,6	1,5	<b>21,1</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	179,8	1,5	<b>1,9</b>
<b>Laitteiden eristimet (posliini)</b>	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]		
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	13,6	2,0	<b>6,6</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	1,0	2,0	<b>85,9</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	10,0	2,0	<b>9,0</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	17,1	2,0	<b>5,3</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	2,8	2,0	<b>31,8</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	1,0	2,0	<b>85,9</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	0,2	2,0	<b>400,1</b>
- Reaktori	90 MPa	6,4	2,0	<b>14,1</b>
- DMOV	90 MPa	0,1	2,0	<b>649,3</b>
- MOV	90 MPa	13,5	2,0	<b>6,7</b>

<sup>(1)</sup> Tulos on maksimivoima tai -jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

<sup>(2)</sup> Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

<sup>(3)</sup> Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

Taulukossa L2.2 on pystyeristimien tukireaktiot kuormitustapauksessa 6.

*Taulukko L2.2. Taulukossa on tukireaktiot kuormitustapauksessa 6.*

<b>Tukireaktio <sup>(1)</sup></b>	<b>F [kN]</b>	<b>Tukireaktio <sup>(2)</sup></b>	<b>F [kN]</b>
TR 1	126	TR 19	10
TR 2	143	TR 20	9
TR 3	227	TR 21	9
TR 4	246	TR 22	9
TR 5	247	TR 23	9
TR 6	<b>271</b>	TR 24	10
TR 7	120	TR 25	10
TR 8	151	TR 26	10
TR 9	195	TR 27	10
TR 10	203	TR 28	9
TR11	124	TR 29	9
TR 12	94	TR 30	10
TR 13	213	TR 31	9
TR 14	99	TR 32	10
TR 15	157	TR 33	10
TR 16	80	TR 34	10
TR 17	81		
TR 18	104		

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.

Taulukosta 5.24 nähdään varmuuslukuja tarkastelemalla, että lavan pystyeristimien maksimipuristusvoima kasvaa melko suureksi (271 kN). Varmuusluku 2,2 on lähellä sallittua arvoa 2,0. Myös teräspalkkien rasitukset ovat suuret. Pienimmät varmuusluvut saadaan MOV-kehikon palkeille 1,9 (sallittu 1,5) ja lavan toissijaisille palkeille 2,0 (sallittu 1,5). Eristimistä pienin varmuus saadaan kondensaattorien väliseristimille 5,3 (sallittu 2,0).



**KT7: Oma paino, esikiristys, 30 mm:n jääkerros ja tuuli +X90 km/h**

Taulukossa L2.3 on tarkasteltavien rakenneosien tulokset kuormitustapauksessa 7.

*Taulukko L2.3. Kuormitustapauksen 7 tulokset.*

<b>Rakenneosa</b>	<b>Sallittu jännitys /voima</b>	<b>Max S/F <sup>(1)</sup></b>	<b>n<sub>vaadittu</sub> <sup>(2)</sup></b>	<b>n<sub>laskettu</sub> <sup>(3)</sup></b>
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 234	2,0	<b>2,6</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 19	2,0	<b>22,4</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]		
- Ensisijaiset	350 MPa	124,7	1,5	<b>2,8</b>
- Toissijaiset	350 MPa	160,4	1,5	<b>2,2</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	156,3	1,5	<b>2,3</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	14,7	1,5	<b>23,8</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	151,0	1,5	<b>2,3</b>
<b>Laitteiden eristimet (posliini)</b>	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]		
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	13,7	2,0	<b>6,6</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	3,5	2,0	<b>25,8</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	11,1	2,0	<b>8,1</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	14,5	2,0	<b>6,2</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	6,5	2,0	<b>13,9</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	15,7	2,0	<b>5,7</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	3,8	2,0	<b>23,7</b>
- Reaktori	90 MPa	5,5	2,0	<b>16,3</b>
- DMOV	90 MPa	0,0	2,0	<b>2752,1</b>
- MOV	90 MPa	11,1	2,0	<b>8,1</b>

<sup>(1)</sup> Tulos on maksimivoima tai -jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

<sup>(2)</sup> Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

<sup>(3)</sup> Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

Taulukossa L2.4 on pystyeristimien tukireaktiot kuormitustapauksessa 7.

*Taulukko L2.4. Taulukossa on tukireaktiot kuormitustapauksessa 2.*

Tukireaktio <sup>(1)</sup>	F [kN]	Tukireaktio <sup>(2)</sup>	F [kN]
TR 1	96	TR 19	18
TR 2	111	TR 20	1
TR 3	195	TR 21	<b>19</b>
TR 4	212	TR 22	1
TR 5	213	TR 23	18
TR 6	<b>234</b>	TR 24	1
TR 7	106	TR 25	19
TR 8	133	TR 26	1
TR 9	172	TR 27	10
TR 10	178	TR 28	9
TR11	100	TR 29	10
TR 12	72	TR 30	10
TR 13	184	TR 31	9
TR 14	81	TR 32	10
TR 15	134	TR 33	9
TR 16	69	TR 34	10
TR 17	77		
TR 18	104		

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.

**KT8: Oma paino, esikiristys, 30 mm:n jääkerros ja tuuli –X90 km/h**

Taulukossa L2.5 on tarkasteltavien rakenneosien tulokset kuormitustapauksessa 8.

*Taulukko L2.5. Kuormitustapauksen 8 tulokset.*

<b>Rakenneosa</b>	<b>Sallittu jännitys /voima</b>	<b>Max S/F <sup>(1)</sup></b>	<b>n<sub>vaadittu</sub> <sup>(2)</sup></b>	<b>n<sub>laskettu</sub> <sup>(3)</sup></b>
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 232	2,0	<b>2,6</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 19	2,0	<b>22,2</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]		
- Ensisijaiset	350 MPa	122,7	1,5	<b>2,9</b>
- Toissijaiset	350 MPa	138,8	1,5	<b>2,5</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	140,7	1,5	<b>2,5</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	13,0	1,5	<b>27,0</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	157,2	1,5	<b>2,2</b>
<b>Laitteiden eristimet (posliini)</b>	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]		
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	14,3	2,0	<b>6,3</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	2,2	2,0	<b>41,3</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	11,3	2,0	<b>8,0</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	15,9	2,0	<b>5,7</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	8,3	2,0	<b>10,9</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	15,9	2,0	<b>5,6</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	2,7	2,0	<b>33,0</b>
- Reaktori	90 MPa	8,7	2,0	<b>10,4</b>
- DMOV	90 MPa	0,3	2,0	<b>319,9</b>
- MOV	90 MPa	11,6	2,0	<b>7,8</b>

<sup>(1)</sup> Tulos on maksimivoima tai –jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

<sup>(2)</sup> Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

<sup>(3)</sup> Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

Taulukossa L2.6 on pystyeristimien tukireaktiot kuormitustapauksessa 8.

*Taulukko L2.6. Taulukossa on tukireaktiot kuormitustapauksessa 8.*

Tukireaktio <sup>(1)</sup>	F [kN]	Tukireaktio <sup>(2)</sup>	F [kN]
TR 1	116	TR 19	1
TR 2	130	TR 20	18
TR 3	199	TR 21	1
TR 4	216	TR 22	<b>19</b>
TR 5	211	TR 23	1
TR 6	<b>232</b>	TR 24	18
TR 7	95	TR 25	1
TR 8	119	TR 26	19
TR 9	168	TR 27	9
TR 10	176	TR 28	10
TR11	107	TR 29	9
TR 12	84	TR 30	10
TR 13	187	TR 31	10
TR 14	96	TR 32	10
TR 15	126	TR 33	11
TR 16	61	TR 34	9
TR 17	70		
TR 18	80		

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.

**KT9: Oma paino, esikiristys, 30 mm:n jääkerros ja tuuli +Y90 km/h**

Taulukossa L2.7 on tarkasteltavien rakenneosien tulokset kuormitustapauksessa 9.

*Taulukko L2.7. Kuormitustapauksen 9 tulokset.*

<b>Rakenneosa</b>	<b>Sallittu jännitys /voima</b>	<b>Max S/F <sup>(1)</sup></b>	<b>n<sub>vaadittu</sub> <sup>(2)</sup></b>	<b>n<sub>laskettu</sub> <sup>(3)</sup></b>
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 238	2,0	<b>2,5</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 30	2,0	<b>14,1</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]		
- Ensisijaiset	350 MPa	123,4	1,5	<b>2,8</b>
- Toissijaiset	350 MPa	153,9	1,5	<b>2,3</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	161,8	1,5	<b>2,2</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	14,6	1,5	<b>24,1</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	154,3	1,5	<b>2,3</b>
<b>Laitteiden eristimet (posliini)</b>	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]		
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	12,4	2,0	<b>7,3</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	3,2	2,0	<b>27,8</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	8,4	2,0	<b>10,7</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	16,1	2,0	<b>5,6</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	4,3	2,0	<b>20,8</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	9,6	2,0	<b>9,3</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	2,6	2,0	<b>34,7</b>
- Reaktori	90 MPa	5,6	2,0	<b>16,0</b>
- DMOV	90 MPa	0,0	2,0	<b>1958,6</b>
- MOV	90 MPa	11,8	2,0	<b>7,6</b>

<sup>(1)</sup> Tulos on maksimivoima tai -jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

<sup>(2)</sup> Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

<sup>(3)</sup> Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

Taulukossa L2.8 on pystyeristimien tukireaktiot kuormitustapauksessa 9.

*Taulukko L2.8. Taulukossa on tukireaktiot kuormitustapauksessa 9.*

Tukireaktio <sup>(1)</sup>	F [kN]	Tukireaktio <sup>(2)</sup>	F [kN]
TR 1	95	TR 19	10
TR 2	139	TR 20	10
TR 3	194	TR 21	10
TR 4	216	TR 22	9
TR 5	208	TR 23	9
TR 6	<b>238</b>	TR 24	10
TR 7	85	TR 25	10
TR 8	146	TR 26	10
TR 9	172	TR 27	<b>30</b>
TR 10	174	TR 28	0
TR11	94	TR 29	28
TR 12	98	TR 30	0
TR 13	182	TR 31	28
TR 14	84	TR 32	0
TR 15	117	TR 33	28
TR 16	96	TR 34	0
TR 17	73		
TR 18	85		

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.

**KT10: Oma paino, esikiristys, 30 mm:n jääkerros ja tuuli -Y90 km/h**

Taulukossa L2.9 on tarkasteltavien rakenneosien tulokset kuormitustapauksessa 10.

*Taulukko L2.9. Kuormitustapauksen 10 tulokset.*

<b>Rakenneosa</b>	<b>Sallittu jännitys /voima</b>	<b>Max S/F <sup>(1)</sup></b>	<b>n<sub>vaadittu</sub> <sup>(2)</sup></b>	<b>n<sub>laskettu</sub> <sup>(3)</sup></b>
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 229	2,0	<b>2,6</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 29	2,0	<b>14,4</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]		
- Ensisijaiset	350 MPa	123,9	1,5	<b>2,8</b>
- Toissijaiset	350 MPa	145,4	1,5	<b>2,4</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	142,9	1,5	<b>2,5</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	13,2	1,5	<b>26,6</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	154,8	1,5	<b>2,3</b>
<b>Laitteiden eristimet (posliini)</b>	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]		
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	11,0	2,0	<b>8,2</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	3,1	2,0	<b>29,5</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	10,4	2,0	<b>8,6</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	14,6	2,0	<b>6,1</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	5,8	2,0	<b>15,5</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	7,5	2,0	<b>11,9</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	2,9	2,0	<b>31,3</b>
- Reaktori	90 MPa	5,6	2,0	<b>16,1</b>
- DMOV	90 MPa	0,3	2,0	<b>319,1</b>
- MOV	90 MPa	11,0	2,0	<b>8,2</b>

<sup>(1)</sup> Tulos on maksimivoima tai -jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

<sup>(2)</sup> Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

<sup>(3)</sup> Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

Taulukossa L2.10 on pystyeristimien tukireaktiot kuormitustapauksessa 10.

*Taulukko L2.10. Taulukossa on tukireaktiot kuormitustapauksessa 10.*

<b>Tukireaktio</b> <sup>(1)</sup>	<b>F [kN]</b>	<b>Tukireaktio</b> <sup>(2)</sup>	<b>F [kN]</b>
TR 1	125	TR 19	10
TR 2	108	TR 20	9
TR 3	199	TR 21	9
TR 4	211	TR 22	10
TR 5	217	TR 23	10
TR 6	<b>229</b>	TR 24	9
TR 7	122	TR 25	10
TR 8	112	TR 26	10
TR 9	167	TR 27	0
TR 10	179	TR 28	<b>29</b>
TR11	120	TR 29	0
TR 12	65	TR 30	29
TR 13	188	TR 31	0
TR 14	92	TR 32	28
TR 15	149	TR 33	0
TR 16	40	TR 34	28
TR 17	74		
TR 18	99		

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.



## LIITE 3: TULOKSET KUORMITUSTAPAUKSESSA 12

Kuormitustapaus 12 käsittelee lämpötilamuutoksista aiheutuvia rasituksia. Rajoitutaan tarkastelemaan lämpötilaa  $-50^{\circ}\text{C}$ . Koska silloin lämpötilan muutos on suurin ( $-72^{\circ}\text{C}$ ). Lähtötilan lämpötila on  $+22^{\circ}\text{C}$ . Muita rasituksia aiheutuu ainoastaan sarjapariston painosta sekä harusten esikiristyksestä.

### KT12: Oma paino, esikiristys ja lämpötila $-50^{\circ}\text{C}$

Taulukossa L3.1 on tarkasteltavien rakenneosien tulokset kuormitustapauksessa 12.

Taulukko L3.1. Kuormitustapauksen 12 tulokset.

Rakenneosa	Sallittu jännitys /voima	Max S/F <sup>(1)</sup>	n <sub>vaadittu</sub> <sup>(2)</sup>	n <sub>laskettu</sub> <sup>(3)</sup>
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 147	2,0	<b>4,1</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 14	2,0	<b>29,7</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]		
- Ensisijaiset	350 MPa	77,5	1,5	<b>4,5</b>
- Toissijaiset	350 MPa	83,6	1,5	<b>4,2</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	100,9	1,5	<b>3,5</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	9,0	1,5	<b>38,8</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	105,4	1,5	<b>3,3</b>
<b>Laitteiden eristimet</b> (posliini)	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]		
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	6,9	2,0	<b>13,0</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	0,6	2,0	<b>153,9</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	5,5	2,0	<b>16,3</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	9,2	2,0	<b>9,8</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	1,4	2,0	<b>66,6</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	0,3	2,0	<b>316,6</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	1,9	2,0	<b>46,9</b>
- Reaktori	90 MPa	3,7	2,0	<b>24,3</b>
- DMOV	90 MPa	0,3	2,0	<b>310,9</b>
- MOV	90 MPa	7,9	2,0	<b>11,3</b>

<sup>(1)</sup> Tulos on maksimivoima tai –jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

<sup>(2)</sup> Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

<sup>(3)</sup> Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

Taulukossa L3.2 on pystyeristimien tukireaktiot kuormitustapauksessa 12.

*Taulukko L3.2. Taulukossa on tukireaktiot kuormitustapauksessa 12.*

Tukireaktio <sup>(1)</sup>	F [kN]	Tukireaktio <sup>(2)</sup>	F [kN]
TR 1	89	TR 19	<b>14</b>
TR 2	99	TR 20	5
TR 3	113	TR 21	14
TR 4	124	TR 22	5
TR 5	134	TR 23	6
TR 6	<b>147</b>	TR 24	14
TR 7	94	TR 25	6
TR 8	112	TR 26	14
TR 9	95	TR 27	11
TR 10	98	TR 28	11
TR11	96	TR 29	11
TR 12	79	TR 30	11
TR 13	106	TR 31	11
TR 14	42	TR 32	11
TR 15	116	TR 33	12
TR 16	73	TR 34	11
TR 17	33		
TR 18	45		

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.

Osa jännityksistä ja voimista on pienempiä kuin kuormitustapauksessa 1, jolloin ainoastaan paino ja esikristitys aiheuttivat kuormitusta. Lämpölaajeneminen ei aiheuta kuitenkaan suuria muutoksia rakenteen rasituksiin.

## LIITE 4: TULOKSET KUORMITUSTAPAUKSISSA 13-14

### KT13: Oma paino ja maanjäristys X100, Y30, Z80

Taulukossa L4.1 on tarkasteltavien rakenneosien tulokset kuormitustapauksessa 13.

*Taulukko L4.1. Kuormitustapauksen 13 tulokset.*

Rakenneosa	Sallittu jännitys /voima	Max S/F <sup>(1)</sup>	n <sub>vaadittu</sub> <sup>(2)</sup>	n <sub>laskettu</sub> <sup>(3)</sup>
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 217	1,5	<b>2,8</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 73	2,0	<b>5,8</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]		
- Ensisijaiset	350 MPa	114,8	1,1	<b>3,0</b>
- Toissijaiset	350 MPa	146,9	1,1	<b>2,4</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	187,3	1,1	<b>1,9</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	17,5	1,1	<b>20,0</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	214,5	1,1	<b>1,6</b>
<b>Laitteiden eristimet</b> (posliini)	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]		
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	15,2	1,5	<b>5,9</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	14,8	1,5	<b>6,1</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	15,6	1,5	<b>5,8</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	25,3	1,5	<b>3,6</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	7,1	1,5	<b>12,7</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	19,4	1,5	<b>4,7</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	4,0	1,5	<b>22,7</b>
- Reaktori	90 MPa	14,0	1,5	<b>6,4</b>
- DMOV	90 MPa	6,5	1,5	<b>13,9</b>
- MOV	90 MPa	14,1	1,5	<b>6,4</b>

<sup>(1)</sup> Tulos on maksimivoima tai –jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

<sup>(2)</sup> Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

<sup>(3)</sup> Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

Taulukossa L4.2 on pystyeristimien tukireaktiot kuormitustapauksessa 13.

*Taulukko L4.2. Taulukossa on tukireaktiot kuormitustapauksessa 13.*

<b>Tukireaktio <sup>(1)</sup></b>	<b>F [kN]</b>	<b>Tukireaktio <sup>(2)</sup></b>	<b>F [kN]</b>
TR 1	116	TR 19	<b>73</b>
TR 2	137	TR 20	0
TR 3	167	TR 21	70
TR 4	182	TR 22	0
TR 5	200	TR 23	73
TR 6	<b>217</b>	TR 24	0
TR 7	136	TR 25	70
TR 8	162	TR 26	0
TR 9	141	TR 27	28
TR 10	145	TR 28	0
TR11	110	TR 29	20
TR 12	93	TR 30	0
TR 13	155	TR 31	17
TR 14	60	TR 32	0
TR 15	167	TR 33	18
TR 16	120	TR 34	0
TR 17	57		
TR 18	69		

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.

**KT14: Oma paino ja maanjäristys X30, Y100, Z80**

Taulukossa L4.3 on tarkasteltavien rakenneosien tulokset kuormitustapauksessa 14.

*Taulukko L4.3. Kuormitustapauksen 14 tulokset.*

<b>Rakenneosa</b>	<b>Sallittu jännitys /voima</b>	<b>Max S/F <sup>(1)</sup></b>	<b>n<sub>vaadittu</sub> <sup>(2)</sup></b>	<b>n<sub>laskettu</sub> <sup>(3)</sup></b>
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 219	1,5	<b>2,7</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 93	2,0	<b>4,5</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]		
- Ensisijaiset	350 MPa	114,9	1,1	<b>3,0</b>
- Toissijaiset	350 MPa	133,8	1,1	<b>2,6</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	181,0	1,1	<b>2,0</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	26,3	1,1	<b>13,3</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	225,6	1,1	<b>1,6</b>
<b>Laitteiden eristimet (posliini)</b>	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]		
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	15,0	1,5	<b>6,0</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	18,4	1,5	<b>4,9</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	19,5	1,5	<b>4,6</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	24,9	1,5	<b>3,6</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	3,7	1,5	<b>24,2</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	11,4	1,5	<b>7,9</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	3,1	1,5	<b>29,2</b>
- Reaktori	90 MPa	10,2	1,5	<b>8,9</b>
- DMOV	90 MPa	3,9	1,5	<b>22,9</b>
- MOV	90 MPa	13,6	1,5	<b>6,6</b>

<sup>(1)</sup> Tulos on maksimivoima tai -jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

<sup>(2)</sup> Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

<sup>(3)</sup> Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

Taulukossa L4.4 on pystyeristimien tukireaktiot kuormitustapauksessa 14.

*Taulukko L4.4. Taulukossa on tukireaktiot kuormitustapauksessa 14.*

Tukireaktio <sup>(1)</sup>	F [kN]	Tukireaktio <sup>(2)</sup>	F [kN]
TR 1	116	TR 19	28
TR 2	180	TR 20	0
TR 3	168	TR 21	28
TR 4	182	TR 22	0
TR 5	201	TR 23	28
TR 6	<b>219</b>	TR 24	0
TR 7	123	TR 25	28
TR 8	181	TR 26	0
TR 9	140	TR 27	<b>93</b>
TR 10	146	TR 28	0
TR11	112	TR 29	63
TR 12	117	TR 30	0
TR 13	155	TR 31	55
TR 14	60	TR 32	0
TR 15	154	TR 33	52
TR 16	118	TR 34	0
TR 17	53		
TR 18	69		

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.

## LIITE 5: TULOKSET KUORMITUSTAPAUKSISSA 15-16

### KT15: Oma paino, 12 mm:n jääkuorma ja maanjäristys X100, Y30, Z80

Taulukossa L5.1 on tarkasteltavien rakenneosien tulokset kuormitustapauksessa 15.

*Taulukko L5.1. Kuormitustapauksen 15 tulokset.*

Rakenneosa	Sallittu jännitys /voima	Max S/F <sup>(1)</sup>	n <sub>vaadittu</sub> <sup>(2)</sup>	n <sub>laskettu</sub> <sup>(3)</sup>
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 260	1,5	<b>2,3</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 75	2,0	<b>5,6</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]		
- Ensisijaiset	350 MPa	137,5	1,1	<b>2,5</b>
- Toissijaiset	350 MPa	171,2	1,1	<b>2,0</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	212,7	1,1	<b>1,7</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	19,8	1,1	<b>17,7</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	251,9	1,1	<b>1,4</b>
<b>Laitteiden eristimet</b> (posliini)	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]		
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	17,2	1,5	<b>5,2</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	15,4	1,5	<b>5,9</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	17,0	1,5	<b>5,3</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	29,4	1,5	<b>3,1</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	7,4	1,5	<b>12,2</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	20,0	1,5	<b>4,5</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	4,2	1,5	<b>21,7</b>
- Reaktori	90 MPa	15,3	1,5	<b>5,9</b>
- DMOV	90 MPa	6,7	1,5	<b>13,5</b>
- MOV	90 MPa	16,4	1,5	<b>5,5</b>

<sup>(1)</sup> Tulos on maksimivoima tai –jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

<sup>(2)</sup> Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

<sup>(3)</sup> Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

Taulukossa L5.2 on pystyeristimien tukireaktiot kuormitustapauksessa 15.

*Taulukko L5.2. Taulukossa on tukireaktiot kuormitustapauksessa 15.*

<b>Tukireaktio</b> <sup>(1)</sup>	<b>F [kN]</b>	<b>Tukireaktio</b> <sup>(2)</sup>	<b>F [kN]</b>
TR 1	138	TR 19	<b>75</b>
TR 2	161	TR 20	0
TR 3	200	TR 21	72
TR 4	218	TR 22	0
TR 5	239	TR 23	75
TR 6	<b>260</b>	TR 24	0
TR 7	157	TR 25	72
TR 8	188	TR 26	0
TR 9	169	TR 27	29
TR 10	174	TR 28	0
TR11	132	TR 29	20
TR 12	110	TR 30	0
TR 13	186	TR 31	18
TR 14	72	TR 32	0
TR 15	195	TR 33	19
TR 16	136	TR 34	0
TR 17	67		
TR 18	83		

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.



**KT16: Oma paino, 12 mm:n jääkuorma ja maanjäristys X30, Y100, Z80**

Taulukossa L5.3 on tarkasteltavien rakenneosien tulokset kuormitustapauksessa 16.

*Taulukko L5.3. Kuormitustapauksen 16 tulokset.*

<b>Rakenneosa</b>	<b>Sallittu jännitys /voima</b>	<b>Max S/F <sup>(1)</sup></b>	<b>n<sub>vaadittu</sub> <sup>(2)</sup></b>	<b>n<sub>laskettu</sub> <sup>(3)</sup></b>
<b>Lavan pystyeristimet</b> (posliini)	<b>Puristusvoima</b> 600 kN	[kN] 262	1,5	<b>2,3</b>
<b>Vetoharukset</b> (komposiitti)	<b>Vetovoima</b> 420 kN	[kN] 96	2,0	<b>4,4</b>
<b>Teräspalkit</b>	<b>Myötölujuus</b>	[MPa]		
- Ensisijaiset	350 MPa	137,6	1,1	<b>2,5</b>
- Toissijaiset	350 MPa	158,7	1,1	<b>2,2</b>
- Kondensaattorikehikot	355 MPa	206,6	1,1	<b>1,7</b>
- DMOV-kehikko	350 MPa	28,9	1,1	<b>12,1</b>
- MOV-kehikko	350 MPa	262,4	1,1	<b>1,3</b>
<b>Laitteiden eristimet (posliini)</b>	<b>Murtolujuus</b>	[MPa]		
- Kondensaattoririvi 1	90 MPa	16,4	1,5	<b>5,5</b>
- Kondensaattoririvi 2	90 MPa	19,2	1,5	<b>4,7</b>
- Kondensaattoririvi 3	90 MPa	20,8	1,5	<b>4,3</b>
- Kondensaattorien väli- eristimet	90 MPa	29,1	1,5	<b>3,1</b>
- Kipinäkoppi 1	90 MPa	4,0	1,5	<b>22,7</b>
- Kipinäkoppi 2	90 MPa	12,1	1,5	<b>7,4</b>
- Kipinäkoppi 3	90 MPa	3,3	1,5	<b>27,4</b>
- Reaktori	90 MPa	11,3	1,5	<b>8,0</b>
- DMOV	90 MPa	4,1	1,5	<b>21,9</b>
- MOV	90 MPa	16,0	1,5	<b>5,6</b>

<sup>(1)</sup> Tulos on maksimivoima tai -jännitys riippuen tarkasteltavasta osasta.

<sup>(2)</sup> Luku on vaadittu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

<sup>(3)</sup> Luku on laskettu varmuusluku kyseisessä kuormitustapauksessa.

Taulukossa L5.4 on pystyeristimien tukireaktiot kuormitustapauksessa 16.

*Taulukko L5.4. Taulukossa on tukireaktiot kuormitustapauksessa 16.*

<b>Tukireaktio <sup>(1)</sup></b>	<b>F [kN]</b>	<b>Tukireaktio <sup>(2)</sup></b>	<b>F [kN]</b>
TR 1	138	TR 19	29
TR 2	203	TR 20	0
TR 3	201	TR 21	29
TR 4	218	TR 22	0
TR 5	241	TR 23	29
TR 6	<b>262</b>	TR 24	0
TR 7	144	TR 25	29
TR 8	206	TR 26	0
TR 9	169	TR 27	<b>96</b>
TR 10	175	TR 28	0
TR11	134	TR 29	65
TR 12	133	TR 30	0
TR 13	186	TR 31	57
TR 14	72	TR 32	0
TR 15	183	TR 33	54
TR 16	133	TR 34	0
TR 17	63		
TR 18	82		

<sup>(1)</sup> Tulos on pystyeristimen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa puristusvoimaa.

<sup>(2)</sup> Tulos on vetoharuksen tukireaktio. Positiivinen arvo tarkoittaa vetovoimaa.