



Robot Structural Analysis -ohjelman soveltuvuus sääsuojarakenteiden suunnitteluun

Tero Venäläinen

OPINNÄYTETYÖ
Maaliskuu 2020

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Insinööri
Rakennustuotanto

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Rakennustuotanto

VENÄLÄINEN, TERO:

Robot Structural Analysis -ohjelman soveltuvuus sääsuojarakenteiden suunnitteluun

Opinnäytetyö 43 sivua
Maaliskuu 2020

Opinnäytetyö tehtiin Ramirent Finland Oy:n toimeksiannosta. Työn tavoitteena oli tutkia Robot Structural Analysis -ohjelman soveltuvuutta sääsuojarakenteiden suunnitteluun.

Sääsuojarakenteiden yleistymisen sekä kasvaneiden suunnitteluvaatimusten myötä perinteisten laskentamenetelmien rinnalle tarvitaan uusia menetelmiä. Robot Structural Analysis hyödyntää rakenneanalyysissä FEM-laskentaa, jota on käytetty pysyvien rakenteiden rakennesuunnittelussa jo pitkään. Sääsuojarakenteiden suunnittelu eroaa kuitenkin huomattavasti pysyvien rakenteiden suunnittelusta ja asettaa suunnittelumenetelmille reunaehdoja, joita tutkitaan tässä työssä.

Tarkasteltavan ohjelman soveltuvuutta tutkittiin lähdekirjallisuuden avulla sekä mallintamalla laskentamalli suuren jännevälän sääsuojarakenteesta. Laskentamalliin määritettiin rakenteen geometria, materiaaliparametrit sekä vaikuttavat kuormat ja kuormitusyhdistelmät. Mallista saatuja kuormitustuloksia vertailtiin perinteisillä laskentamenetelmillä saatuihin tuloksiin. Lisäksi tutkittiin, miten rakenteen liitosten vapausasteiden muokkaaminen mallissa vaikutti rasituksiin.

Työn tuloksena saatiin laskentamalli sääsuojarakenteesta, jonka perusteella pystyttiin analysoimaan ohjelman soveltuvuutta sääsuojarakenteiden suunnitteluun. Saadut tulokset olivat suurelta osin vertailukelpoisia perinteisiin laskentamenetelmiin verrattuna. Lisäksi FEM-laskentamallin voi nähdä tuovan lisäarvoa väliaikaisten rakenteiden suunnitteluun. Kuitenkin myös epäkohtia löydettiin ja lopullinen soveltuvuuden arviointi tulee tehdä jatkotutkimusten perusteella.

Asiasanat: sääsuojarakenteet, elementtimenetelmä, laskentamalli

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Building Production

VENÄLÄINEN, TERO:

Suitability of Robot Structural Analysis for Designing Encapsulation Constructions

Bachelor's thesis 43 pages
March 2020

The thesis was done for Ramirent Finland Oy. The purpose of the thesis was to examine the suitability of Robot Structural Analysis for designing encapsulation constructions.

As temporary structures become more widespread and design requirements increase, new calculation and design methods are needed alongside traditional methods. Robot Structural Analysis utilizes the Finite Element Method (FEM) in its structural analysis, which has long been used in structural design of permanent structures. However, temporary structures significantly differ from permanent structures in terms of the design process which sets certain boundary conditions for the choice of design method.

The suitability of the program was investigated using a literature study and by modelling a calculation model of a large span weather cover system. The system's structure geometry, material parameters, effective loads and load combinations were included in the model. The loading results obtained from the model were compared with those obtained by traditional calculation methods. In addition, it was examined how modifying the degrees of freedom of structural joints in the model affected the stresses.

As a result of the work, a calculation model of the weather cover system was made, on basis of which it was possible to analyze the suitability of Robot Structural Analysis for designing encapsulation constructions. The results obtained were largely comparable to conventional calculation methods. In addition, the FEM model was seen to add value to the designing process. However, shortcomings were also identified and the final suitability assessment should be based on further investigation.

Key words: finite element method, encapsulation construction

SISÄLLYS

JOHDANTO	6
1 SÄÄSUOJARAKENNE	8
1.1 Sääsuojarakenteen osat.....	8
1.2 Sääsuojatyypit.....	10
2 SÄÄSUOJARAKENTEEN SUUNNITTELU	13
2.1 Keskeiset asiakirjat	13
2.2 Lumikuorma	14
2.3 Tuulikuorma	15
2.3.1 Pintoihin vaikuttava tuulenpaine ja kitka	18
2.4 Pysyvä kuorma ja hyötykuorma	20
2.5 Kuormitusyhdistely	21
2.6 Rajatilamitoitus ja staattinen tasapaino	23
2.7 Ankkurointi ja jäykistys	24
3 SÄÄSUOJARAKENTEEN MALLINNUS	26
3.1 Haasteet laskentamallien luomisessa ja käytössä	26
3.2 Robot Structural Analysis	27
3.3 FEM-laskenta	28
4 CASE KOHDE	29
4.1 Lähtötiedot	29
4.1.1 Kuormat ja kuormitusyhdistely.....	32
4.2 Laskentatulosten tarkastelu.....	33
4.2.1 Sääsuojaristikoiden kuormitustarkastelu	34
4.2.2 Elementtitelineiden kuormitustarkastelu	37
4.2.3 Epävakausergelmat	39
4.3 Soveltuvuuden arviointi	39
5 POHDINTA	42
LÄHTEET.....	43

LYHENTEET JA TERMIT

A_{fr}	kitkakuorman vaikutusalue
c_e	altistuskerroin
c_{fr}	kitkakerroin
$c_{pe,p}$	ulkoisen paineen painekerroin
$c_{pe,s}$	ulkoisen paineen imukerroin
c_{pi}	sisäisen paineen kerroin
c_{prob}	todennäköisyyskerroin
E_d	kuormituksen suunnittelu-arvo
F_{fr}	kitkakuorma
K	muotoparametri
ρ	tuulennopeuden 10 minuutin keskiarvon vuotuinen ylittymistodennäköisyys
q_b	nopeuspaineen perusarvo
q_p	puuskanopeuspaine
R_d	kestävyyden suunnittelu-arvo
t	tuulennopeuden ääriarvon toistumisaika

JOHDANTO

Sääsuojien käyttö rakentamisessa on kasvattanut suosiotaan viimeisen kymmenen vuoden aikana. Rakennusalalla kosteudenhallinnan merkitystä on korostettu ja kosteusvaurioiden aiheuttamat haitat ovat kansantalouden ja ihmisten terveyden kannalta todettu merkittäviksi. Valtioneuvoston uusi asetus edellyttääkin rakennushankkeelta kosteudenhallintaselvitystä. Sääsuojien käyttö on yksi keskeisimmistä rakennuksen kosteudenhallintakeinoista. (Ympäristöministeriö 2017)

Sääsuojien käytön yleistymistä selittävät myös tekniset innovaatiot, jotka ovat mahdollistaneet suurempia ja monimutkaisempia sääsuojaratkaisuja. Nykyisin lähes mikä tahansa kohde pystytään suojaamaan sääsuojalla. Suuremmat sääsuojat ovat kuitenkin tuoneet haasteensa kasvaneiden kuormien ja suunnitteluvaatimusten myötä. Sääsuojiin liittyvät onnettomuudet ovatkin vielä nykyäänkin melko yleisiä ja seuraamukset voivat olla merkittävät.

Sääsuojarakenteiden suunnittelu pohjautuu ensisijaisesti valmistajan laatimiin käyttöohjeisiin. Käyttöohjeet käsittävät kuitenkin vain perusratkaisuja ja niiden soveltaminen vaativimpiin kohteisiin on vaikeaa. Rakennushankkeen päätoteuttajan onkin arvioitava, onko käyttöohje riittävä suunnitelma, vai onko rakenteesta tehtävä erillinen rakennesuunnitelma (A 26.3.2009/205). Sääsuojien suunnittelun osalta Suomen lainsäädännöstä ei kuitenkaan löydy selkeitä määräyksiä rakenteellisiin vaatimuksiin, vaan niihin sovelletaan usein työtelineille annettuja ohjeistuksia.

Suunnitteluvaatimusten kasvaessa myös sääsuojien suunnittelussa ovat yleistyneet tietokoneavusteisen mallinnus ja laskentaohjelmistot. Tässä insinöörityössä tutkitaan Robot Structural Analysis -ohjelman käyttöä ja soveltuvuutta sääsuojarakenteen suunnitteluun. Ohjelmaa tarkastellaan case kohteen avulla, jossa mallinnetaan FEM-laskentamalli sääsuojarakenteesta ohjelmalla. Tämän lisäksi tarkastellaan sääsuojarakenteen mallinnus- ja mitoitusprosessia yleisellä tasolla. Mitoitusprosessi läpikäydään olemassa olevien standardien mukaisesti.

Työ tehdään Ramirent Finland Oy:n toimeksiantona. Työn ensisijainen tarkoitus on tutkia, kuinka Robot Structural Analysis -ohjelma soveltuu yrityksen suunnittelukäyttöön.

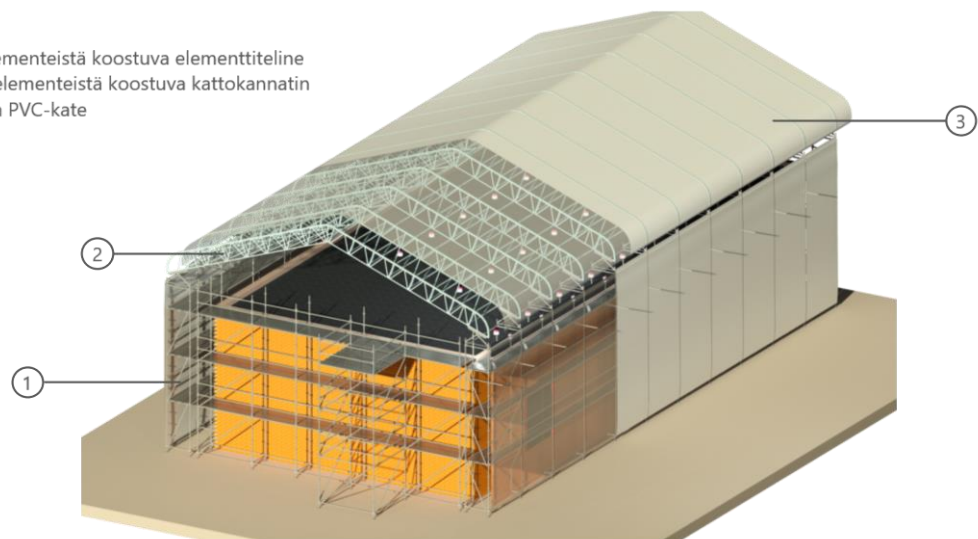
1 SÄÄSUOJARAKENNE

1.1 Sääsuojarakenteen osat

Sääsuojojalla tarkoitetaan rakentamisessa käytettävää väliaikaista rakennetta, jolla suojataan rakennuskohdetta olosuhteilta ja parannetaan työmaan turvallisuutta ja laadunhallintaa. Yleisimmin sääsuojojia käytetään suojaamaan rakennusta sen yläpohjan tai vesikatteen saneerauksen aikana, mutta ne soveltuvat minkä tahansa rakennusvaiheen aikaiseksi suojaksi. (Ratu S-1232) Myös uudisrakentamisessa sääsuojausten käyttö on lisääntynyt voimakkaasti.

Sääsuojarakenteen runko koostuu tyypillisesti kuvan 1 mukaisesti sauvaelementtitelineistä ja niiden päälle kasattavista kattokannatinelementeistä, sekä runkoon kiinnitettävästä muovikatteesta, joka toimii ulkopuolen eristävänä kerroksena.

1. Sauvaelementeistä koostuva elementtiteline
2. Ristikkoelementeistä koostuva kattokannatin
3. Suojaava PVC-kate



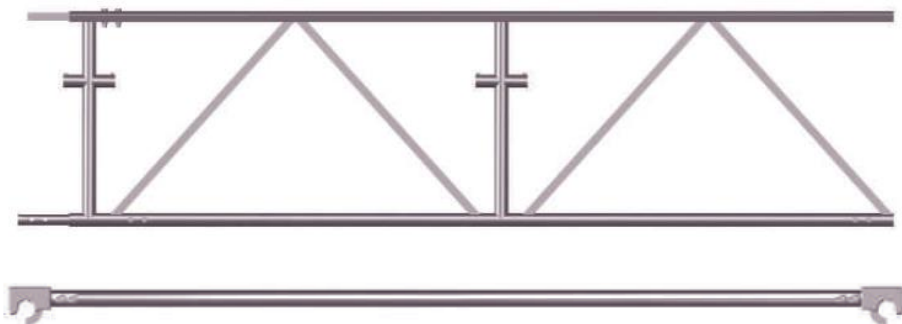
KUVA 1. Sääsuojarakenteen keskeisimmät osat (Ramirent mediapankki 2019).

Elementtiteline koostuu yleisimmin teräksisistä sauvaelementeistä (kuva 2). Sauvaelementit ovat nimensä mukaisesti sauvamaisia liitoskappaleilla varustettuja kaluston osia. Telineet toimivat sääsuojan tukirakenteena, jonka kautta sääsuojarakenteen kuormat viedään maahan ja ankkureille. Telineitä voidaan myös käyttää työskentelyyn hyödyntämällä telineen taselementtejä. (RIL 142-2010)



KUVA 2. Elementtitelineen pysty- ja vaakasauva.

Sääsuojarakenteen kattokannattimet kasataan alumiinisista ristikkoelementeistä (kuva 3). Ristikkoelementeissä on päissä liitoskappaleet ja yläpaarteissa urat, johon muovikatteet voidaan kiinnittää. Kattokannattajien väliin asennetaan jäykistäviä sauva- ja ristikkoelementtejä valmistajan käyttöohjeen mukaisesti. (Layher Systems 2014)



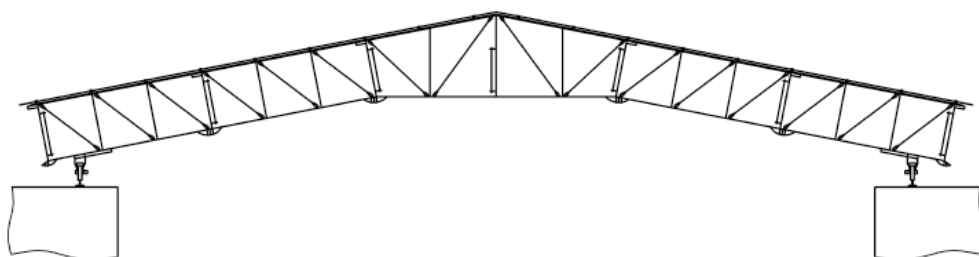
KUVA 3. Kattokannattajan ristikkoelementti ja jäykistesauva.

Yleisimmin Suomessa käytettävät elementtitelineet ja sääsuojarakenteet ovat saksalaisen Layherin valmistamia ja tässä työssä käsitellään nimenomaan Layherin ratkaisuja. Layher on maailman johtava teline- ja sääsuojakomponenttien valmistaja (Langenscheidt 2014).

1.2 Sääsuojatyytit

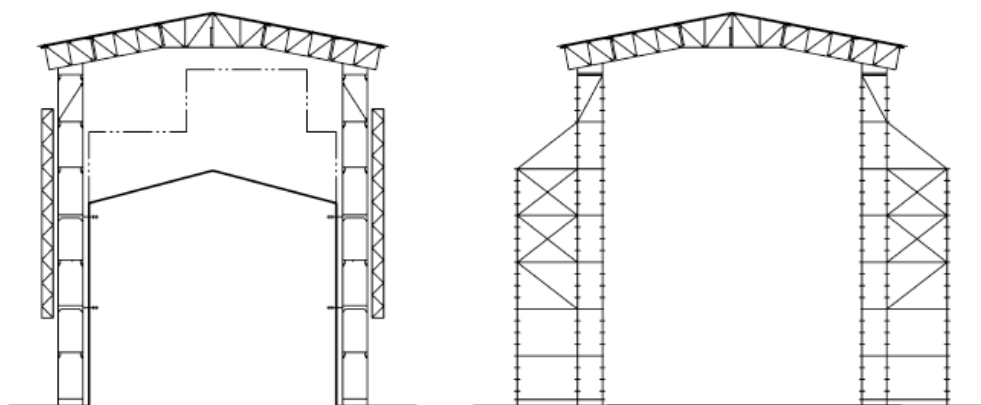
Sääsuojatyyppi tulee aina valita suojattavan työn mukaisesti. Sääsuojaa tilaava taho ei yleensä ole perehtynyt erilaisiin sääsuojaratkaisuihin, jolloin sääsuojan toimittaja on isossa roolissa sääsuojatyyppin valinnassa. Sääsuoja-standardi jaottelee sääsuojat viiteen eri kategoriaan tai tyyppiin. Jaottelu on kuitenkin vajavainen, yleiseurooppalainen, eikä tarjoa lukijalle paljoakaan käytännön lisätietoa. Sääsuoja voidaan jaotella monin eri tavoin, esimerkiksi käytetyn materiaalin, ankkurointiratkaisun tai perustusmenetelmän mukaan. (SFS-EN 16508:2015) Tässä työssä pyritään jaottelemaan sääsuoja yleisimpiin Suomessa käytettyihin ratkaisuihin soveltaen sääsuoja-standardia.

Ensimmäisenä tapa pystyttää sääsuoja on perustaa sääsuojarakenteen kattoristikot kuvan 4 mukaisesti suoraan tai välikappaleen avulla johonkin olemassa olevaan rakenteeseen, kuten teräsbetonikaiteisiin. Tapaa käytetään yleisesti siltojen kansivalujen tai vedeneristystöiden aikana.



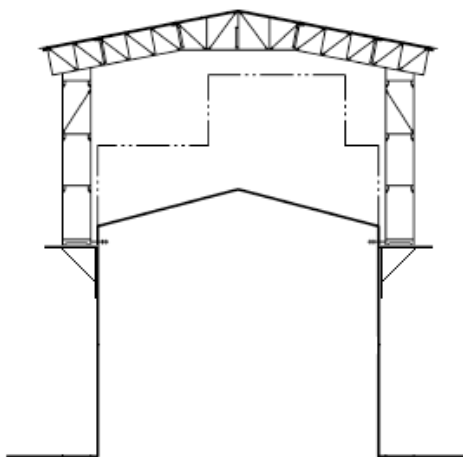
KUVA 4. Sääsuojan kattoristikko perustettuna kiinteään rakenteen päälle (SFS-EN 16508:2015).

Toisena tapana on yleisin käytetyistä vaihtoehtoista, jossa kattoristikot tuetaan elementtelineiden varaan kuvan 5 mukaisesti. Tällöin telineet voivat toimia joko vain tukirakenteena tai myös työskentelytasoina julkisivuilla. Telineet pyritään saneerauskohteissa ankkuroimaan rakennuksen julkisivurakenteisiin, mutta rakenne voidaan toteuttaa myös vapaasti seisovana, esimerkiksi uudisrakennuskohteissa, jolloin käytetään vastapainoja tai vastaavia seisontavakauden parantamiseksi.



KUVA 5. Kattoristikot perustettu elementtitelineiden varaan. Vasemmalla julkisivurakenteisiin ankkuroitu teline, oikealla vapaasti seisova rakenne (SFS-EN 16508:2015, muokattu).

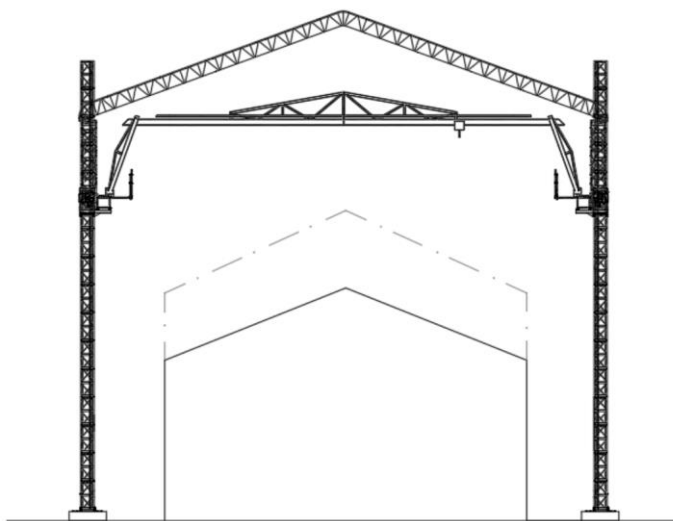
Kolmas tapa on hyödyntää konsolirakennetta sääsuojan perustamisratkaisuna. Konsolit yleensä kiinnitetään saneerauskohteessa korjattavan rakenteen julkisivuun ja niiden päälle kasataan telineet, joiden päälle kattoristikot tukeutuvat (kuva 6). Konsoleita käyttämällä voidaan rakennuksen ympäröivät alueet jättää vapaaksi telineistä, esimerkiksi kulkuteitä varten.



KUVA 6. Konsoleiden varaan perustettu sääsuojarakenne (SFS-EN 16508:2015, muokattu).

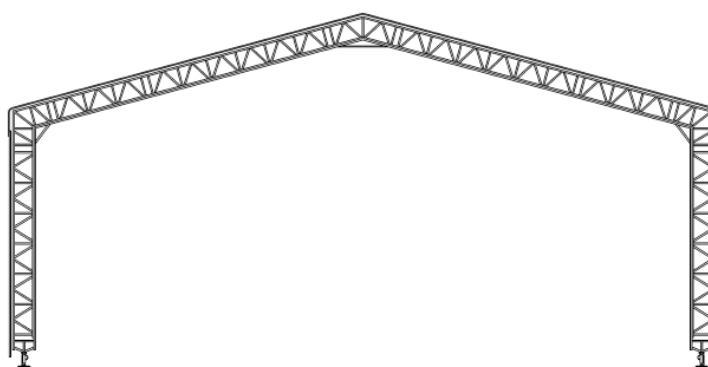
Neljäs sääsuojaustapa on varsinkin puukerrostalorakentamisen myötä yleistyneet Extoler-sääsuojat (kuva 7). Extoler-sääsuoja perustetaan moottoroitujen teräspilarien varaan ja varsinaista suojakattoa pystytään liikuttamaan haluttuun korkeuteen tarpeen mukaan. Kyseisessä sääsuojassa on integroitu siltanosturi,

jolla pystytään nostamaan esimerkiksi rakennuksen elementit paikalleen, ilman erillistä nosturia.



KUVA 7. Extoler-sääsuoja siltanosturilla (Ramirent 2019).

Viidentenä tapana voidaan pitää kauttaaltaan ristikkoelementeistä kasattavaa kehärakenteista kuvan 8 mukaista sääsuojaa. Sääsuojan kehärakenne muodostuu alumiinisista kattoristikoista ja niihin liitettävistä jaloista. Kyseistä sääsuojatyyppiä käytetään tyypillisesti esimerkiksi väliaikaisvarastoina, jolloin jäänneväli on pieni. (Layher Systems 2014)



KUVA 8. Ristikkorakenteinen sääsuoja (SFS-EN 16508:2015).

2 SÄÄSUOJARAKENTEEN SUUNNITTELU

2.1 Keskeiset asiakirjat

Yksinomaan sääsuojien suunnittelua koskevaa lainsäädäntöä ei Suomessa vielä ole. Joissakin lähteissä sääsuojat rinnastetaan erikoistelineiksi ja ne sisällytetään osaksi telinetyön rakennesuunnitelmaa (Talonrakennusteollisuus 2017). Tämän takia sääsuojien suunnittelussa sovelletaan pitkälti telineille tarkoitettua ohjeistusta. Elementtitelineen rakennesuunnittelua ohjaa Valtioneuvoston asetus 205/2009 ja maankäyttö- ja rakennuslaki.

Elementtitelineen ensisijainen suunnittelun asiakirja on valmistajan laatima käyttöohje. Käyttöohje määrittää rakenteen kokoamisohjeet, rakenneosien sallitut kuormat, sekä jäykistys- ja ankkurointiratkaisut eri tapauksille. (Layher Allround 2013) Yksikertaisissa rakenteissa, jotka ovat toteutettu käyttöohjeen mukaisesti, ei vaadita erillistä rakennesuunnitelmaa käyttöohjeen lisäksi. Jos elementtitelineen käyttöohjeessa ei ole riittäviä tietoja tai työteline poikkeaa käyttöohjeesta, elementtitelineestä on tehtävä rakennesuunnitelma. (VNa 205/2009)

Valtioneuvoston asetus määrittelee rakennesuunnitelmassa esitettävät asiat. Vaikka asetus koskeekin vain elementtitelineitä, voidaan sitä soveltaen käyttää myös sääsuojarakenteen suunnittelun ohjeena. Rakennesuunnitelmasta tulee käydä ilmi muun muassa sääsuojan rakenne, materiaalit, dimensiot, käyttötarcoitus, mitoituksessa käytetyt kuormat ja kuormitusyhdistelmät, sekä rakenteen lujuuden, jäykkyyden ja seisontavakauden riittävyuden osoittamiseksi laaditut laskelmat. Rakennesuunnitelman laatijalta vaaditaan vähintään teknillisen alan ammattikorkeakoulututkinto, sitä vastaava aiempi tutkinto tai teknikkotason tutkinto ja perehtyneisyys telinerakenteisiin. (VNa 205/2009)

Euroopan standardisointikomitean julkaisema EN 16508:2015 sääsuojastandardi ohjaa sääsuojarakenteiden suunnittelua myös Suomessa. Se mukaillee julkaistuja eurokoodeja, mutta sallii väliaikaisten rakenteiden, kuten sääsuojien, suunnittelussa käytettävän kevyempiä kuormia ja kuormitusyhdistelykertoimia

kuin pysyville rakenteille. Standardien käyttö pohjautuu kuitenkin vapaaehtoisuuteen.

2.2 Lumikuorma

Sääsuojarakenteen lumikuorman ominaisarvon suuruus määräytyy eurooppalaisen standardin määrittelemien kuormaluokkien mukaisesti. Kuormaluokat ja ominaisarvot on esitetty taulukossa 1.

Lumikuormaluokka	Ohjeistus	Kuorma kN/m ²
SL 1	Ei lumikuormaa (minimikuorma)	0,1
SL 2a	Perustuu lumenpoistosuunnitelmaan*	0,25
SL 2b	Perustuu lumenpoistosuunnitelmaan*	0,6
SL 3	Täysi lumikuorma	EN 1991-1-3 mukaisesti

* Lumenpoistosuunnitelma voi perustua lumenpudotukseen, lämmitykseen tms.

TAULUKKO 1. Sääsuojarakenteille käytettävät lumikuormaluokat (SFS-EN 16508:2015, suomennettu).

Sääsuojan sijaitessa sisätiloissa voidaan edellä mainitut kuormat jättää huomiotta. Jos lumiriskiä ei ole, käytetään SL1 luokan minimikuormitusta, joka huomioi luonnonkuormat, kuten sateen ja rakeet. Yleisimmin Suomessa käytössä on lumikuormaluokka SL 2a, jolloin tilaaja ja toimittaja laativat lumenpoistosuunnitelman. Lumenpoistosuunnitelma voi perustua lämmitykseen, lumenpudotukseen tai vastaavaan keinoon. SL 3 luokan mukainen kuorma lasketaan eurokoodin mukaisesti, kuten kiinteille rakenteille. (SFS-EN 16508:2015)

Työtelineissä ei lumikuormaa oteta huomioon. Työtasot, myös käyttämättömät, tulee olla vapaana lumesta ja jäädästä (RIL 142-2010).

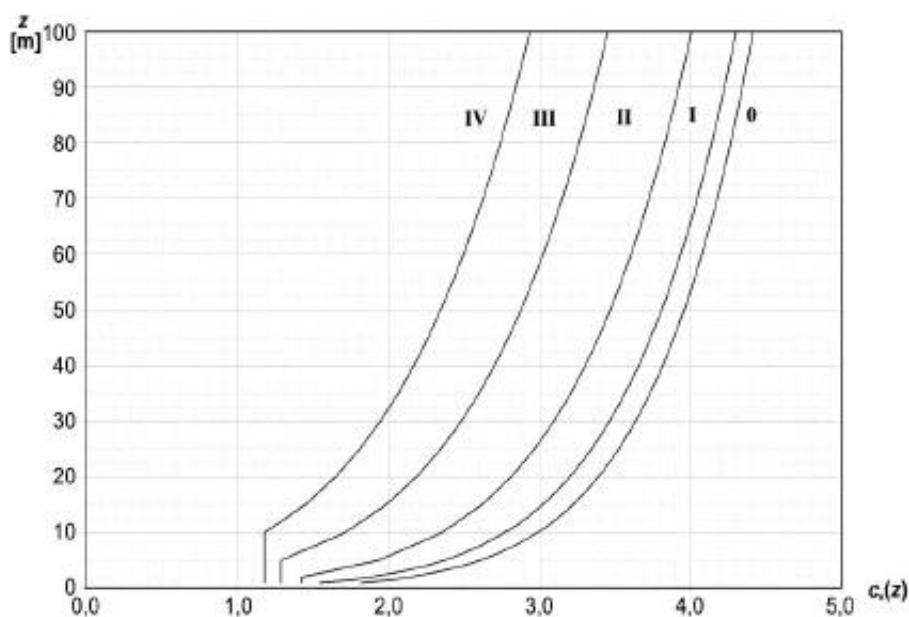
2.3 Tuulikuorma

Sääsuojarakenteen tuulikuormaa määrittäessä lasketaan ensiksi puuskano-
peuspaine eurokoodin EN 1991-1-4 mukaisesti, kuten pysyville rakenteille seu-
raavasti

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b, \quad (1)$$

jossa $c_e(z)$ on altistuserroin
 q_b on nopeuspaineen perusarvo

Altistuserroin saadaan kuvasta 9, kun on määritelty rakennuspaikan maasto-
luokka ja sääsuojarakenteen lakipisteen korkeus.



KUVA 9. Altistuserroimen $c_e(z)$ kuvaajat maastoluokissa 0-IV (SFS-EN 1991-1-4).

Maastoluokan määrittelyssä ei oteta huomioon yksittäisiä mäkiä tai harjanteita, jotka voivat aiheuttaa tuulen nopeuspaineeseen lisäyksen. Jos rakennuspaikan pinnanmuodot ovat rakenteelle epäedulliset, tulee kuvaajasta saatua arvoa korjata pinnanmuotokerroimella. Eurokoodi määrittelee, että korjaus tarvitaan, jos maaston kaltevuus ylittää arvon 0,05. Pinnanmuotokerroin määritellään eurokoodin mukaisesti. (RIL 201-1-2011)

Merkittävä ero väliaikaisten ja kiinteiden rakenteiden tuulikuorman määrittämisen välillä on todennäköisyyskerroin c_{prob} . Säsuojan käyttöikä poikkeaa eurokoodin perusteena olevasta tuulivoiman toistumisajasta 50 vuotta, joten tuulennopeuden perusarvoa voidaan alentaa lausekkeella 2 saatavalla kertoimella. RIL:n suunnitteluohjeessa todennäköisyyskerroin annetaan kuvan 10 mukaisena kuvaajana. (SFS-EN 16508:2015)

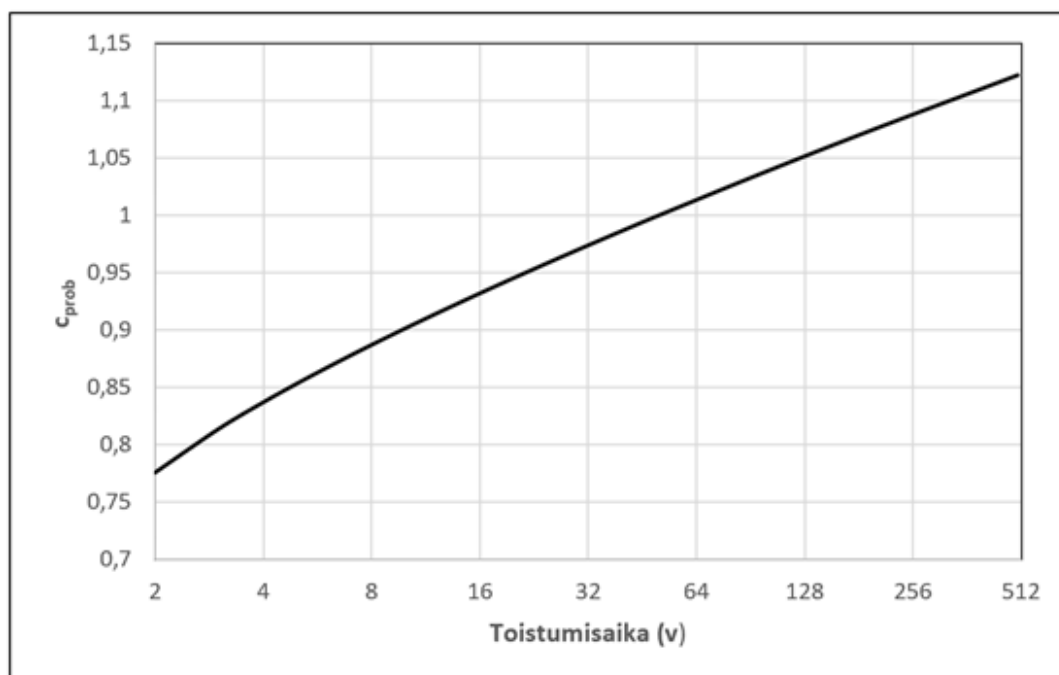
$$c_{prob} = \left(\frac{1-K \cdot \ln(-\ln(1-p))}{1-K \cdot \ln(-\ln(0,98))} \right)^n, \quad (2)$$

jossa K on muotoparametri, jonka suositusarvo on 0,2,
 n on eksponentti, jonka suositusarvo on 0,5 ja
 p on tuulennopeuden 10 minuutin keskiarvon vuotuinen ylittymistodennäköisyys, $0 \leq p < 1$.

Tuulennopeuden 10 minuutin keskiarvon vuotuinen ylittymistodennäköisyys saadaan lausekkeesta

$$p = \frac{1}{t}, \quad (3)$$

jossa t on tuulennopeuden ääriarvon toistumisaika vuosina, $t > 1$.

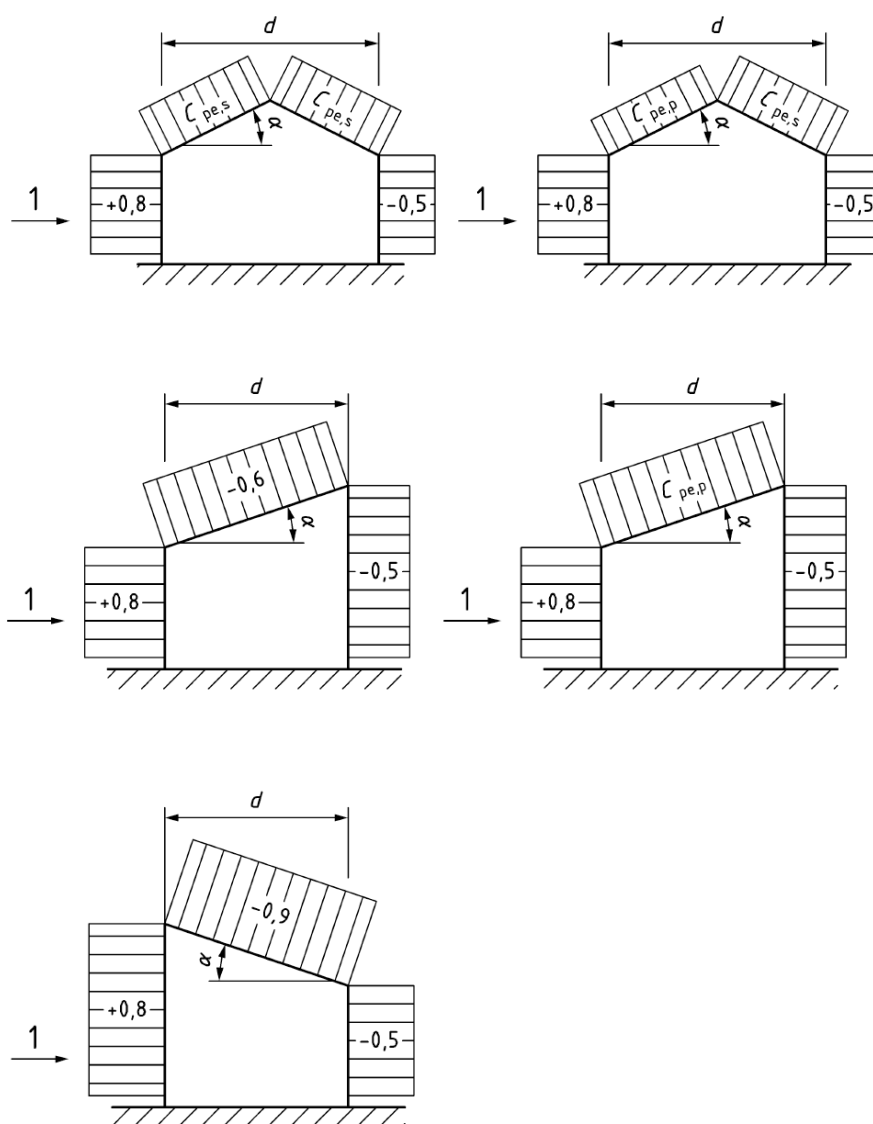


KUVA 10. Todennäköisyyskertoimen riippuvuus tuulivoiman ääriarvon toistumisajasta.

Vaikka sääsuojarakenteen käyttöikä on lähestulkoon aina alle kaksi vuotta, RIL:n suunnitteluohje esittää todennäköisyyskertoimen alkavan kahdesta vuodesta. Tällöin arvoksi saadaan 0,78.

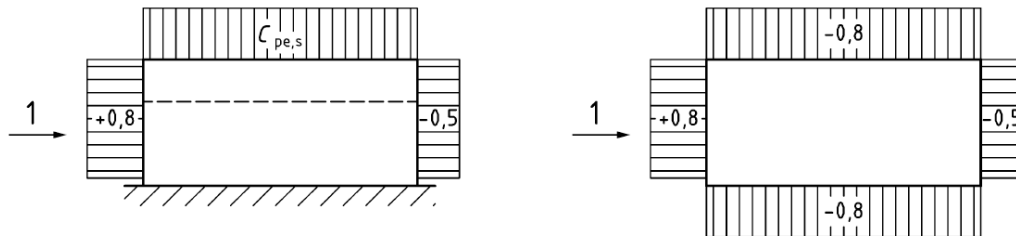
2.3.1 Pintoihin vaikuttava tuulenpaine ja kitka

Jotta saadaan selville miten tuulikuorma jakautuu sääsuojarakenteen eri pinnoille, tulee määrittää pintojen tuulenpainekertoimet. Sääsuojastandardi antaa kokemuspohjaisia valmiita ulkoisia painekertoimia tapauksessa, jossa sääsuojan lappeiden kaltevuus on alle 30 astetta. Tuulenpainneiden määrittämiseen sääsuojarakenteelle voidaan tarvittaessa käyttää myös eurokoodin mukaista mitoitusta.



KUVA 11. Sääsuojastandardin tuulenpainekertoimet harja- ja pulpettikattoiselle sääsuojalle, kun tuuli puhaltaa rakenteen sivusta (SFS-EN 16508:2015).

Tuulen puhaltaessa sääsuojarakenteen sivusta, harjakattoisen sääsuojan tuulenpuoleisella lappeella voi esiintyä joko painetta ($c_{pe,p}$), tai imua ($c_{pe,s}$). Suojan puoleisella lappeella on kuitenkin aina imua. Mitoituksessa rakenteen kannalta valitaan määräävämpi tapaus.



KUVA 12. Ulkoisen paineen kertoimet tuulen puhaltaessa sääsuojarakenteen päädyistä sekä harjakattoiselle että pulpettikattoiselle sääsuojalle (SFS-EN 16508:2015).

Kertoimet $c_{pe,p}$ ja $c_{pe,s}$ määritetään standardin mukaan lausekkeilla

$$c_{pe,p} = \begin{cases} 0, & \text{kun } \alpha \leq 8,3^\circ \\ 0,03 \cdot \alpha - 0,25, & \text{kun } 8,3^\circ < \alpha < 31,7^\circ, \\ 0,7, & \text{kun } \alpha \geq 31,7^\circ \end{cases} \quad (4)$$

jossa α on lappen kaltevuus

$$c_{pe,s} = \begin{cases} -0,7 + K_a, & \text{kun } d \leq 10\text{m} \\ 0,01 \cdot d - 0,8 + K_a, & \text{kun } 10\text{m} < d < 25\text{m}, \\ -0,55 + K_a, & \text{kun } d > 25\text{m} \end{cases} \quad (5)$$

jossa d on rakenteen päädyn leveys [m]

K_a on lapekaltevuudesta riippuva kerroin

Lapekaltevuudesta riippuva kerroin saadaan lausekkeesta

$$K_a = \frac{\alpha - 10}{100} \quad \text{ja } 0 \leq K_a \leq 0,1, \quad (6)$$

jossa α on lappen kaltevuus

Ulkoisen paineen lisäksi sääsuojaan vaikuttaa sisäinen paine. Sisäisen paineen kerroin c_{pi} riippuu rakenteen vaipan aukkojen koosta ja niiden jakaumasta. Sisäinen paine vaikuttaa samanaikaisesti ulkoisen paineen kanssa. Sisäisen paineen kerroin määritetään aukkosuhteen funktiona. Sääsuojat ja niiden yhteydessä olevat telineet pyritään lähtökohtaisesti peittämään kauttaaltaan ja aukkosuhteen määrittäminen voi tällöin olla vaikeaa. Tällöin mitoituksessa voidaan käyttää kertoimista $c_{pi} = +0,2$ tai $c_{pi} = -0,3$ määräävämpää tapauksittain. (SFS-EN 16508:2015)

Erityisesti pitkien sääsuojien osalta tulee huomioida myös pintoihin vaikuttava kitkakuorma. Pinnan suuntaisesti vaikuttava kitkakuorma F_{fr} saadaan tuulieurokoodin mukaisesti lausekkeesta

$$F_{fr} = c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr} \quad (7)$$

jossa c_{fr} on kitkakerroin, jonka arvo sileälle pinnalle on 0,1

A_{fr} on kitkakuorman vaikutusalue

Kitkan vaikutukset voidaan jättää huomioimatta, kun tuulen suuntaisten pintojen kokonaisala on enintään neljä kertaa kaikkien tuulta vastaan kohtisuorien ulkopintojen kokonaisala (RIL 201-1-2011). Vaikutus tulee siis kyseeseen lähinnä, kun tarkastellaan tilannetta, jossa tuuli puhaltaa kohtisuoraan pitkän sääsuojan päätyyn nähden.

2.4 Pysyvä kuorma ja hyötykuorma

Sääsuojarakenteen pysyvään kuormaan sisältyy oman painon lisäksi myös sääsuojarakennetta pysyvästi kuormittavien muiden rakenneosien paino, kuten esimerkiksi telineille sidottavat vastapainot, nostopalkit tai valaistus (RIL 142-2010). Koska sääsuojat ja telineet kasataan valmisosia käyttäen ja valmistajan käyttöohjeita soveltaen, on pysyvä kuorma yleensä helppo laskea tarkasti.

Jos sääsuojarakenteessa käytetään telineitä ja ne on tarkoitettu työskentelyyn, tulee niille määrittää käyttökuorma. Käyttökuorma sisältää työstä ja varastoin-

nista telineille aiheutuvat kuormat. Käyttökuormitukset on telinestandardissa jaettu kuormaluokkiin 1-6. Kuormaluokka valitaan kohteen käyttötarkoituksen ja tarpeen mukaan.

TAULUKKO 2. Telinestandardin SFS-EN 12811 mukaiset työtelineet kuormaluokat kuormineen, suomennettu.

Kuormaluokka	Pintakuorma kN/m ²	Pistekuorma 0,5 m x 0,5 m kN	Henkilökuorma 0,2 m x 0,2 m kN	Osa-aluekuorma	
				Kuorma kN/m ²	Osa-alue A _o m ²
1	0,75	1,5	1,0	-	-
2	1,5	1,5	1,0	-	-
3	2,0	1,5	1,0	-	-
4	3,0	3,0	1,0	5,0	0,4A
5	4,5	3,0	1,0	7,5	0,4A
6	6,0	3,0	1,0	10,0	0,5A

2.5 Kuormitusyhdistely

Kuormitusyhdistelyn kautta sääsuojarakenteelle määritetään eri kuormitustapausten yhtäaikainen kuormitus. Sääsuojastandardissa on taulukon 3 mukaisesti annettu sääsuojarakenteille soveltuvat kuormitusyhdistelmät ja yhdistelykertoimet.

TAULUKKO 3. Kuormayhdistelykertoimet (SFS-EN 16508:2015, suomennettu).

	KY 1	KY 2	KY 3 ^a	KY 4	KY 5 ^a	KY 6	KY 7 ^a	KY 8
	Ylös- päin- suun- tau- tuva enim- mäis- kuorm a	Alaspäin suuntau- tuvan kuor- man ja käytön aikaisen tuuli- kuor- man yh- distelmä	Tuuli- kuor- man ja vähim- mäis- kuor- man yh- distelmä	Alaspäin suuntau- tuvan kuor- man ja käytön aikaisen tuuli- kuor- man yh- distelmä	Tuuli- kuor- man ja lumi- kuor- man yh- distelmä	Alaspäin suuntau- tuvan kuor- man ja käytön aikaisen tuuli- kuor- man yh- distelmä	Tuuli- kuorman ja lumi- kuorman yhdis- telmä	Tuuli- kuor- man ja lumi- kuor- man yh- distelmä
Q ₁ Pysy- vät kuor- mat	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Q ₂ Kulku- ja käyttö- kuormat	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Q ₃ Muut hyöty- kuormat	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Q ₅ Työ- maakoh- tainen lu- mi- kuorma	-	-	-	-	-	1,0	0,5	1,0
Q ₆ Alen- nettu lu- mi- kuorma	-	-	-	1,0	1,0	-	-	-
Q ₇ Vähim- mäis- kuorma	-	1,0	1,0	-	-	-	-	-
Q ₈ Enim- mäistuuli- kuorma	1,0	-	1,0	-	1,0	-	1,0	0,5
Q ₉ Käytön aikainen tuuli- kuorma	-	1,0	-	1,0	-	1,0	-	-

^a Näissä kuormayhdistelyissä kulku- ja käyttökuormia Q₂ on vähennettävä standardin EN 12811-1:2003 kohdan 6.2.9.2 mukaisesti.

Tarkasteltavat kuormitusyhdistelyt määräytyvät käytetyn lumikuormaluokan mukaan standardissa esitetyn taulukon 4 mukaisesti. Jokainen kohde on kuitenkin tarkasteltava yksilöllisesti ja myös mahdolliset eriävät kuormitusyhdistelyt on huomioitava.

TAULUKKO 4. Eri lumikuormaluokissa tarkasteltavat kuormitusyhdistelmät (SFS-EN 16508:2015, suomennettu).

Lumikuor- maluokka	KY 1	KY 2	KY 3	KY 4	KY 5	KY 6	KY 7	KY 8
LK 1	X	X	X					
LK 2	X			X	X			
LK 3	X					X	X	X

2.6 Rajatilamitoitus ja staattinen tasapaino

Sääsuojarakenteet suunnitellaan käyttäen murtorajatilan tarkastelua. Sääsuojastandardin mukaisesti murtorajatilassa tulee päteä

$$E_d \leq R_d, \quad (8)$$

jossa E_d on kuormituksen suunnitteluarvo
 R_d on kestävyuden suunnitteluarvo

Kuormituksen suunnitteluarvo saadaan kertomalla rakenteeseen vaikuttavat ominaiskuormat yhdistelykertoimien lisäksi osavarmuuskertoimilla, jotka on esitetty sääsuojastandardissa. Osavarmuuskertoimina käytetään pysyvälle kuormalle arvoa 1,35 kun kuorma on epäedullinen ja arvoa 1,0 kun kuorma on edullinen. Muille kuin pysyville kuormille käytetään arvoa 1,5 kun kuorma on epäedullinen ja arvoa 0 kun vaikutus on edullinen.

Kestävyuden suunnitteluarvo saadaan jakamalla materiaalin kestävyuden ominaisarvo materiaalin osavarmuuskertoimella γ_M . Osavarmuuskertoimina käytetään sitkeille metalleille arvoa 1,1, hauraille metalleille arvoa 1,25 ja puulle arvoa 1,3. (SFS-EN 16508:2015)

Staattisen tasapainon osalta standardi määrittelee, että sääsuojarakenteen on oltava vakaa kappaleessa 3.5 määritellyissä kuormayhdistelmissä suhteessa globaaliin liukumaan, kaatumiseen ja kohoamiseen. Vakauden määrittämisessä voidaan rakennetta tarkastella jäykkänä kappaleena. Staattista tasapainoa määritettäessä käytetään taulukon 5 mukaisia osavarmuuskertoimia, jotka on esitetty sääsuojastandardissa.

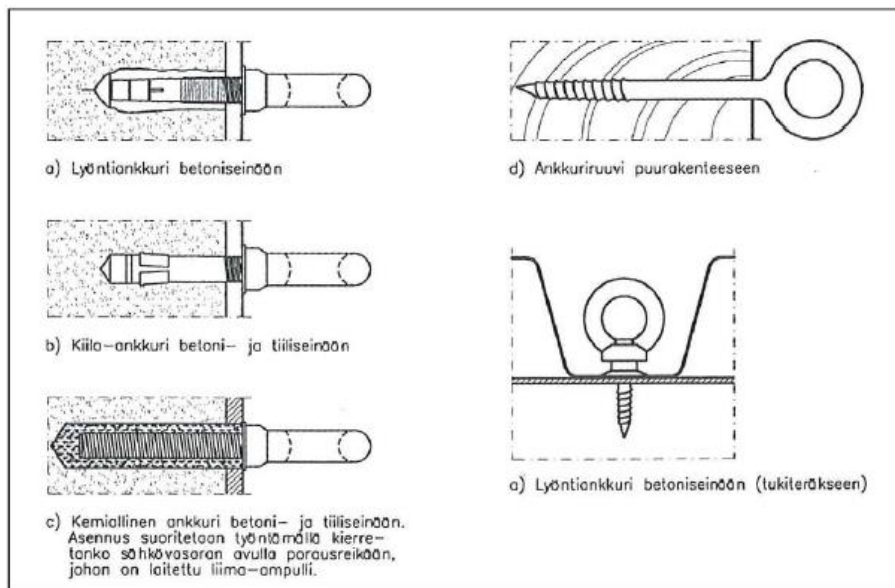
TAULUKKO 5. Staattisen tasapainon osavarmuuskertoimet (SFS-EN 16508:2015, suomennettu).

Kuorma	Vakauttava	Vakautta heikentävä
Q_1	1,0	1,0
Kaikki muut kuormat	0	1,5

2.7 Ankkurointi ja jäykistys

Sääsuojarakenteen tasapaino tulee aina tarkastaa liukumisen, kaatumisen ja ilmaan nousemisen osalta. Seisontavakauden lisäämiseksi suojaa vahvistetaan erilaisin ankkurointimenetelmin. Ankkuroinnin mitoitus on rakenteen suunnittelun kannalta kriittisin osa. RIL 142-2010 ohjeistaa elementtitelineen ankkuroinnin määrityksessä, mutta sääsuojarakenteen ankkurointi tulee aina suunnitella tapauskohtaisesti ja esittää rakennesuunnitelmassa.

Saneerauskohteissa sääsuojarakenne pyritään yleensä ankkuroimaan olemassa olevan rakennuksen runkoon joko seinä- tai yläpohjarakenteisiin. Tällöin pyritään käyttämään yleisesti käytettyjä kuvan 13 mukaisia kiinnityksiä ja niihin sopivia valmisosia.



KUVA 13. Olemassa olevaan rakenteeseen käytettäviä ankkurointimenetelmiä (RIL 142-2010).

Jos olemassa olevaan rakenteeseen ei voida ankkuroida ollenkaan tai rakenteeseen voidaan ankkuroida vain osittain, käytetään muita ankkurointimenetelmiä kuten vastapainoja, tukitorneja ja maakiiloja. Vapaasti seisovissa sääsuojarakenteissa käytetään edellä mainittuja menetelmiä. Tällaista sääsuojarakennetta käsitellään lisää kappaleessa 5.

Jäykistysjärjestelmän tehtävänä on siirtää rakenteeseen kohdistuvien vaakuormitusten aiheuttamat rasitukset ankkureille, perustuksiin tai maapohjaan. Sääsuojarakenteen jäykistäminen perustuu pitkälti valmistajan käyttöohjeeseen. Käyttöohjeet tarjoavat mallikohtaisesti tarvittavan sauvatyypin ja jäykisteiden määrän. (Layher XL 2014) Sääsuojarakenteen altistuessa suurille rasituksille, tulee staattisen tarkastelun pohjalta varmistaa, että erityisesti elementtitelineen jäykistävien vinotukien käyttöasteet ovat sallituissa rajoissa. Usein juuri telineiden vinotuet ovat rakenteen heikoin lenkki.

3 SÄÄSUOJARAKENTEEN MALLINNUS

3.1 Haasteet laskentamallien luomisessa ja käytössä

Tyypillisesti sääsuojarakenteiden suunnittelussa käytetään visualisointiin ja dimensioiden määrittämiseen mallinnusohjelmaa, kuten Autocadia tai Revitiä. Laskentaosuus toteutetaan yleensä taulukkolaskureilla, kuten Excelillä. Sääsuojarakenteista tulee kuitenkin jatkuvasti suurempia ja monimutkaisempia, joten suunnittelussa pyritään entistä enemmän käyttämään tietokoneavusteista rakenneanalyysiä ja laskentaa.

Vaikka sääsuojarakenteet ovat väliaikaisia rakenteita, ne ovat usein monin tavoin staattisesti ja mekaanisesti monimutkaisempia kuin pysyvät rakenteet. Väliaikaisten rakenteiden kompleksisuus johtuu muun muassa suurista rakenteellista muodonmuutoksista ja siirtymistä, joita aiheuttavat monimutkaiset liitokset, suuret asennustoleranssit, elastinen pohjamateriaali, altistuminen suurille luonnonkuormille ja usein haasteellinen geometria. Maahan tai muulle pohjamateriaalille kuormia välittävät telinejalat siirtävät ainoastaan puristusta ja niiden liikettä vaaka-akselien suhteen vastustaa ainoastaan kitka. Telineliitoksille ei määritetä rotaatiojäykkyyksiä vaan niiden ajatellaan olevan täysin nivelisiä. Myös käytettyjen materiaalien ja valmisosien jäykkyyssominaisuudet ovat suhteellisen pieniä. Voidaankin todeta rakenteen jäykkyyden olevan haaste mallinnuksen ja laskennan kannalta.

Mallin luomisen kannalta haasteellista on myös aiheen harvinaisuus. Lähdemateriaalia aiheesta on todella niukasti ja se on osittain ristiriidassa keskenään. Matti Riutta (2018) on tutkinut diplomityössään sääsuojarakenteen rakenteellista turvallisuutta RFEM-ohjelmaan tehdyn mallin avulla. Tutkimuksesta huomataan, että mallin osalta on jouduttu tekemään rakenteellisia ratkaisuja, jotka eivät ole käytännöllisiä todellisuudessa, kuten rakenteen sisä- ja ulkopuolinen tuenta. Myös telinesauvojen vapausasteiden osalta on tehty ratkaisuja, jotka eivät täysin vastaa Layherin ohjeistuksia.

Sääsuojien suunnitteluun ei yleensä ole mahdollista käyttää paljoakaan aikaa. Suojat toimitetaan nopeasti tilauksen jälkeen ja tämän lisäksi muutoksia tapahtuu paljon ja nopealla aikataululla. Tämä asettaa suunnittelijalle ja suunnittelu-prosessille reunaehdoja. Rakenteen tulee ensisijaisesti olla kestävä, turvallinen ja määräysten mukainen, mutta suunnittelutyön tulee olla myös käytännöllistä aikataulun kannalta. Tässä työssä tutkitaan Robot Structural Analysis -ohjelman soveltumista sääsuojarakenteiden suunnitteluun, sekä käytännöllisyyden, että saatujen kuormitustulosten luotettavuuden kannalta.

3.2 Robot Structural Analysis

Autodesk Robot Structural Analysis tai RSA on rakenteiden lujuusanalyysiin ja mitoitukseen tarkoitettu ohjelmisto. RSA on osa Autodeskin AEC-pakettia ja se on yhteensopiva muiden Autodeskin mallinnus- ja tietomallityökalujen, kuten Revitin ja AutoCAD:n kanssa. Revit -ohjelmalla luotu tietomalli pystytään avaamaan RSA:ssa rakenneanalyysiä varten niin, että mallin ennalta määritetyt parametrit pysyvät ennallaan.

RSA:n tietokanta sisältää kaikki yleisimmin käytetyt suunnittelukoodistot, standardit, sekä ominaisuudet eri materiaaleille. Myös Suomen eurokoodin kansalliset liitteet ovat sisällytettyinä ohjelmassa. RSA hyödyntää laskennassa FEM-menetelmää (finite element method).

3.3 FEM-laskenta

FEM-menetelmä, eli elementtimenetelmä, on numeerinen likiarvomenetelmä, jota käytetään rakenteen muodon ja materiaalinkäytön optimoimiseen sekä rakenteen kestävyuden tarkasteluun. FEM-laskenta voi olla luonteeltaan joko lineaarista tai epälineaarista. (Lähteenmäki 2012) Lineaarinen FEM-laskenta on usein huomattavasti nopeampi ja helpompi suorittaa kuin epälineaarinen. Sääsuojarakenteet sisältävät usein paljon epälineaarisuutta aiheuttavia elementtejä ja tämä tulee huomioida laskentamenetelmää valittaessa.

Linearisessa menetelmässä rakenne jaetaan yksinkertaisiin sauva- ja palkkielementteihin, jotka liittyvät toisiinsa solmujen kautta. Elementtien ja solmujen muodostama kokonaisuutta kutsutaan elementtiverkoksi. Elementeille muodostetaan jäykkyydsmatriisit ja määritetään rajalliset vapausasteet. Elementtiverkon solmujen siirtymät ja rasitukset saadaan ratkaistua lineaarisesta yhtälöstä

$$\{\hat{F}\} = \{K\}\{\hat{U}\} \rightarrow \{\hat{U}\} = \{K\}^{-1}\{\hat{F}\}, \quad (9)$$

jossa $\{\hat{F}\}$ on tunnettu voimavektori
 $\{K\}^{-1}$ on jäykkyydsmatriisin $\{K\}$ käänteismatriisi
 $\{\hat{U}\}$ on siirtymävektori

Tekijöiden riippuvuus vapausasteista nähdään matriisimuodossa

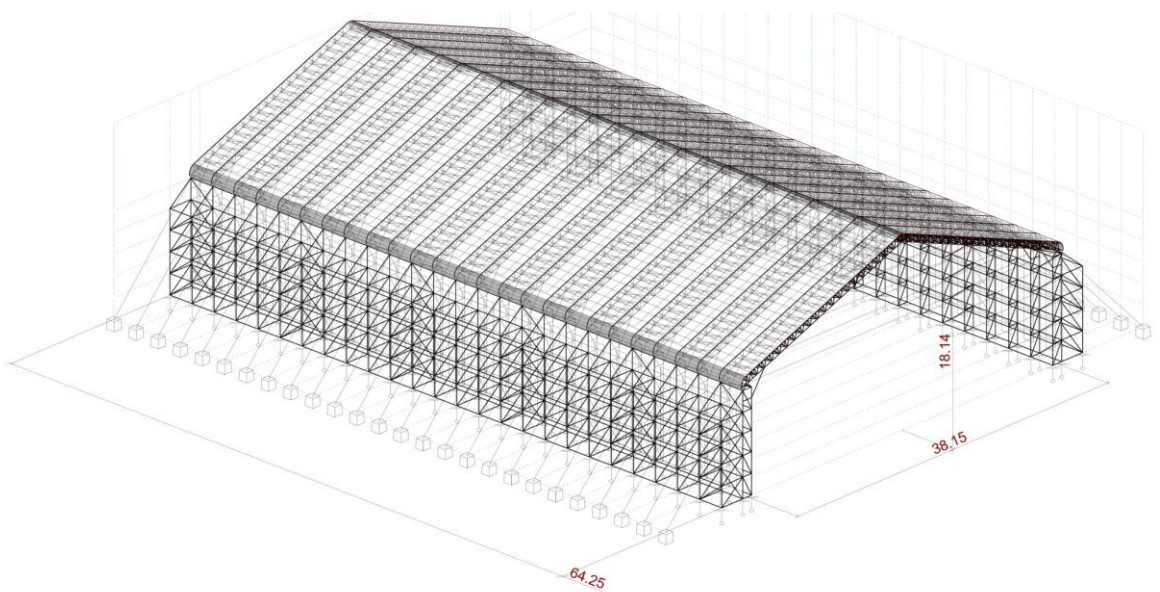
$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdot & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdot & \cdot & K_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdot & \cdot & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ U_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

jossa n on vapausasteet

4 CASE KOHDE

4.1 Lähtötiedot

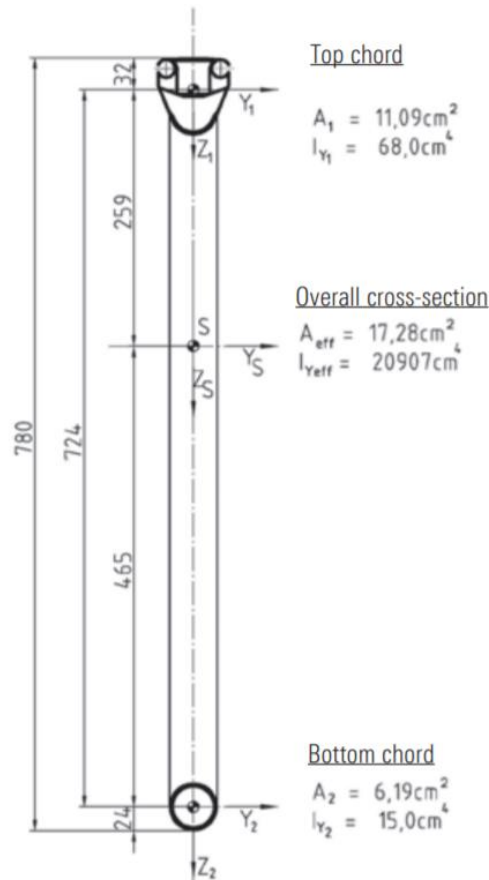
Robotin soveltuvuutta sääsuojarakenteiden suunnitteluun tutkittiin kuvitteellisen case kohteen avulla. Kohteeksi valittiin vaativa, lähes 40 metrin jännevälin Layher XL-mallin sääsuoja (kuva 14). Käyttöajankohdan ajatellaan olevan talvikaudella, jolloin lumiriski tulee huomioida. Suoja perustetaan vapaasti seisovien telineiden varaan. Rakenteen seisontavakautta lisätään tukirungolla, sekä vastapainoilla, jotka liittyvät rakenteeseen vaijerien avulla. Tämän kaltainen sääsuoja soveltuu uudisrakennuskohteen suojaksi ja sille on suuri kysyntä yleistyneen talvirakentamisen myötä.



KUVA 14. Koko sääsuojarakenne ilman pääytelineitä mallinnettuna Robotilla.

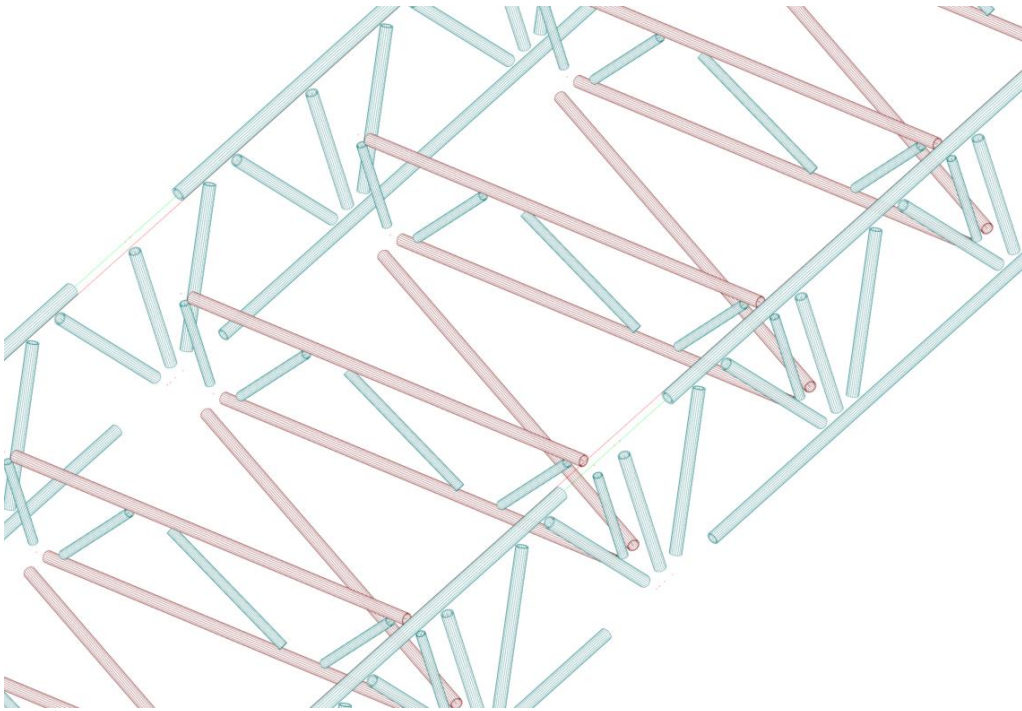
Layher käyttää XL-ristikon yläpaarteena kuvassa 15 näkyvää erikoisprofiilia. Materiaalina on käytetty EN AW 6063 T6 -alumiinia, joka on saatavilla oletuksena myös Robotissa. Valmistaja antaa yläpaarteen poikkileikkauspinta-alaksi $11,09\text{cm}^2$ ja jäyhyysmomentiksi 1. pääsuunnan ympäri $68,0\text{cm}^4$. Robot ei tarjoa kovinkaan innovatiivista työkalua erikoispoikkileikkausten luontiin. Tästä johtuen ristikon ylä- ja alapaarteina käytettiin putkiprofiilia, jolle määritettiin halkaisija ja

seinämäpaksuus niin, että poikkileikkauspinta-ala ja jäyhyysmomentti ovat samoja kuin valmistajan antamat arvot.



KUVA 15. XL-ristikon poikkileikkaus (Layher XL 2014).

Ristikon pituussuuntaiset liitokset koostuvat muhvi- ja hitsiliitoksista ja ne oletetaan jäykiksi. EN 12811-1 standardin mukaan putkiprofiilien liitokset voidaan olettaa jäykiksi, jos ne liittyvät toisiinsa vähintään 150mm matkalta, profiilin halkaisija on maksimissaan 60mm ja putken liitostappi on pysyvästi kiinnitetty. Reunaehdot täyttyvät alapaarteen osalta, mutta yläpaarteen osalta vain osittain. Myös yläpaarteessa käytetään kuitenkin jäykkiä liitoksia mallin vakauden säilyttämiseksi. Paarteiden väliset hitsatut sauvat oletetaan myös jäykiksi. Ristikoiden väliset tuplavaaka- ja jäykistesauvat sen sijaan liittyvät ristikkoihin täysin nivelistä. Ristikkosauvojen vapausasteet on visualisoitu räjäytyskuvassa 16.



KUVA 16. Sääsuojalohkon ristikoiden sauvojen vapausasteet: punaisten sauvojen päässä nivelliitos ja vihreiden sauvojen päässä jäykkä liitos.

Telineosien profiilina käytetään standarditelineputkea, joka valmistetaan S355MH rakenneteräksestä. Putken halkaisija on 48,3mm ja seinämäpaksuus 3,2mm. Telineiden sauvojen kaikki liitokset oletetaan täysin niveliseksi. Kappaleessa 5.1.1 esitetyt reunaehdot putkiprofiilien jäykän liitoksen reunaehdoista toteutuvat osittain pystyputkien osalta. Todellisuudessa pystyputkien liitostapit ovat kuitenkin lähestulkoon aina kiinnitetty yksinkertaisella ruuviliitoksella, joten myös pystyputkien liitokset oletetaan niveliseksi. Myös kattotuolien ja telineiden liitoskohta oletetaan niveliseksi. Rakenteessa käytetään teräksisiä 15mm halkaisijaltaan olevia kaapelielementtejä kattotuolien vetopaarteina sekä vastapainojen sidonnassa. Kaapelielementit ottavat vastaan ainoastaan vetoa ja niiden kimmokertoimiksi oletetaan 235 GPa.

Sääsuojarakenne on perustettu telinejaloilla tiivistetyn maa-aineksen päälle. Telinejalat ottavat vastaan ainoastaan puristusta ja ne mallinnetaan uplift-tukina, jolloin rakenne pystyy siirtymään vapaasti ylöspäin.

4.1.1 Kuormat ja kuormitusyhdistely

Sääsuojalle määritetään maastoluokassa 2 eurokoodimitoituksella puuskano-peuspaineeksi $0,46kN/m^2$. Ulkoisten painekertoimien määrittämiseen käytetään kappaleessa 3.1.1 esitettyjä sääsuojastandardin painekertoimia. Suojan ajatellaan olevan täysin peitetty ja sisäisen paineen kertoimina käytetään paineelle arvoa $+0,2$ ja imulle arvoa $-0,3$. Rakenteen kannalta määräävin mitoitustilanne on tuulen puhaltaessa kohtisuoraa rakenteen pitkälle sivulle. Ulkoisten ja sisäisten painekertoimien avulla saadaan neljä tuulen tarkastelutapausta, jotka määritetään Robotiin. Rakenteen dimensioista johtuen tuulesta aiheutuvan kitkakuorman vaikutusta ei tarvitse huomioida.

Lumikuorman ominaisarvona käytetään tyypillistä luokan 2a arvoa $0,25kN/m^2$. Robot määrittää rakenteen sauvojen oman painon automaattisesti annettujen parametrien avulla. Telinettä ei käytetä työskentelyyn, joten rakenteelle ei määritetä hyötykuormia. Oletetaan lisäksi, että huollon ja asennuksen aikaiset hyötykuormat sääsuojalle eivät vaikuta samanaikaisesti suurimpien luonnonkuormien kanssa, joten niitä ei erikseen huomioida.

Kuormitusyhdistely tehdään taulukoiden 3 ja 4 mukaisesti. Kuormitusyhdistelmässä 1 tarkastellaan rakennetta, kun siihen vaikuttaa oman painon lisäksi suurin mahdollinen tuulen noste. Kuormitusyhdistelmässä 5 rakennetta kuormittaa oma paino, lumikuorma, sekä suurin mahdollinen tuulen paine. Osavarmuuskerrotoimien myötä yhdistelmät saadaan muotoon

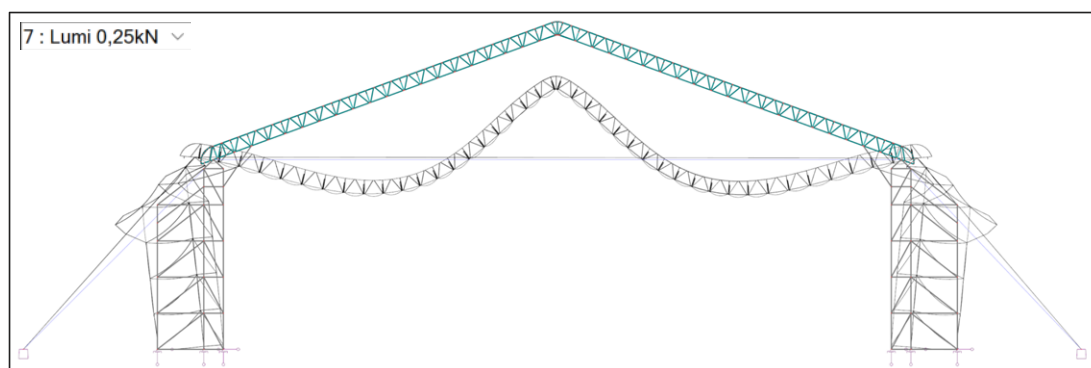
$$1,0 \cdot \text{oma paino} + 1,5 \cdot \text{enimmäistuulikuorma (imu)} \quad (11)$$

$$1,35 \cdot \text{oma paino} + 1,5 \cdot \text{enimmäistuulikuorma (paine)} + 1,5 \cdot \text{lumikuorma} \quad (12)$$

4.2 Laskentatulosten tarkastelu

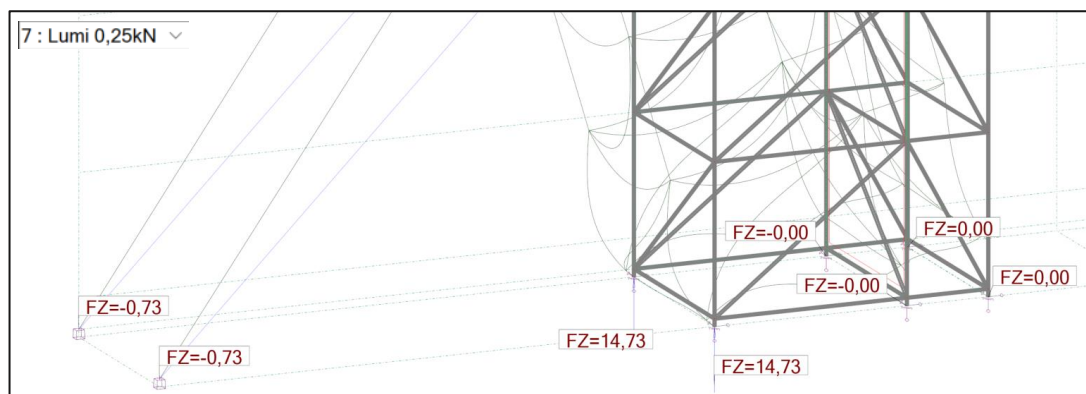
Sääsuojarakenteen ollessa suuri, kokonaisen mallin käsitteleminen ja laskenta Robotissa on hidasta ja vaatii paljon laskentatehoa. Tapauksissa joissa tuuli puhaltaa kohtisuoraan rakenteen pitkälle sivulle, voidaan tarkastella mallia pienemmissä osakokonaisuuksissa.

Sääsuojan kehärakenteen ominainen käyttäytyminen ilmenee, kun tarkastellaan muodonmuutoksia pelkän ominaislumikuorman vaikutuksesta (kuva 17). Katto-
tuolit pyrkivät taipumaan lappeiden keskeltä, mikä aiheuttaa vetorasituksen veto-
paarteille ja vaakasiirtymiä telineille. Kuvan siirtymät on skaalattu 200-kertaisiksi
efektin korostamiseksi.



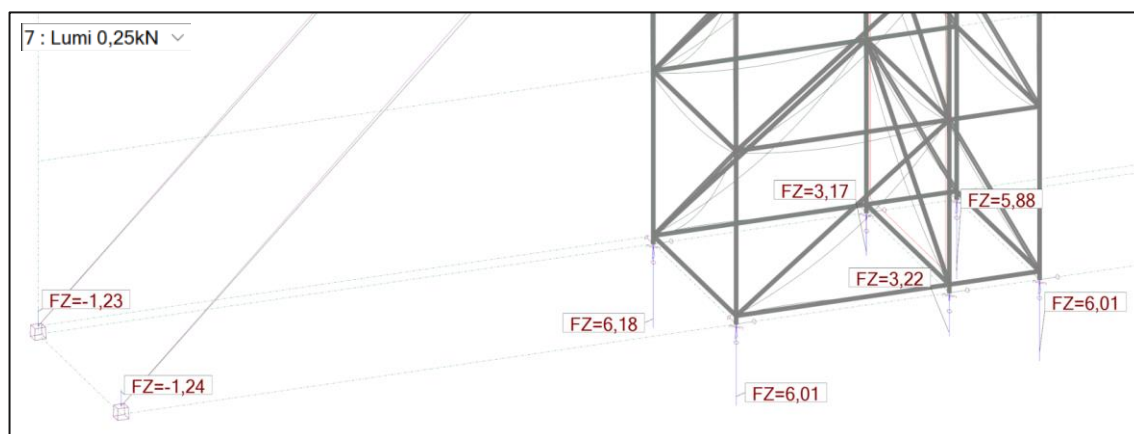
KUVA 17. Rakenteen muodonmuutostarkastelu pelkän ominaislumikuorman vaikutuksesta.

Kun tarkastellaan samaa kuormitustilannetta muodostuneiden tukireaktioiden kautta, nähdään telineen kaatumisefekti tarkemmin (kuva 18). Jäykän kappaleen tavoin tukirungon uloimmat tuet ottavat vastaan puristuksen ja sisemmät tuet pyrkivät nousemaan ilmaan.



KUVA 18. Telineen kaatumiseffektin aiheuttamat tukireaktiot ominaislumikuorman vaikutuksesta.

Suhteellisen pienilläkin kuormilla sisäpuolen tuille voidaan lukea jokseenkin huomattavia siirtymiä Z-akselin suhteen. Todellisuudessa siirtymiä ei synny ja rakenne toimii stabiilimmin. Voidaankin todeta, että ilmiö ylikorostuu mallissa ja se on huomioitava myös tarkasteltaessa mitoittavia kuormitusyhdistelyjä. Ilmiötä pystytään hallitsemaan ohjelmassa lisäämällä rakenteelle sisäpuolinen tuenta tai määrittämällä kattoristikoiden vetopaarteille asennusjännitykset, kuten kuvassa 19 on testimielessä tehty. Ratkaisut eivät kuitenkaan ole käytännössä toteutettavissa kentällä, joten niitä ei myöskään lopullisen mallin osalta käytetä.



KUVA 19. Telineen tasapainoeffekti jännitetyillä vetopaarteilla.

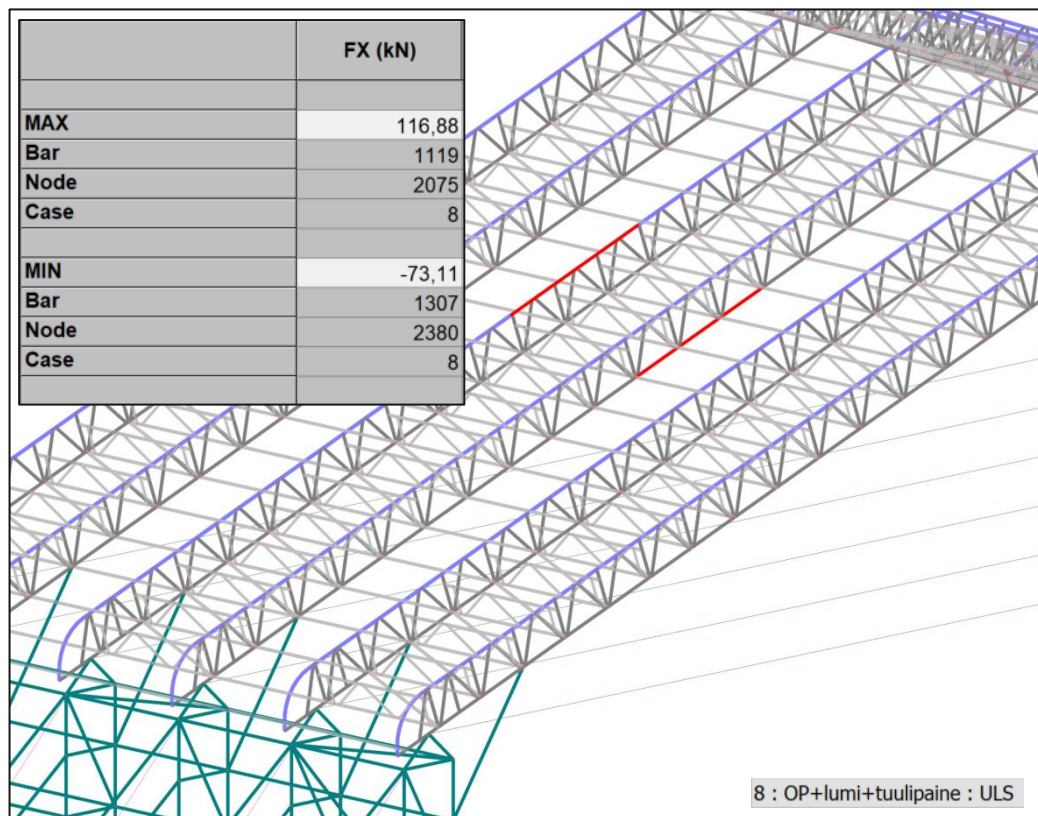
4.2.1 Säsuojaristikoiden kuormitustarkastelu

Säsuojan kattotuoliristikoiden osalta tuulen lähtöarvot ovat lähtökohtaisesti mitoitettava tekijä suunnittelussa. Valmistaja on määrittänyt sallitut tuulenpuuskapai-

nearvot, sekä ristikoiden imuvoiman arvot jännevälimitan mukaan, joten yksittäisten rakenneosien kuormitustarkastelua ei ole välttämätöntä tehdä. Triviaalina lisäksi verrataan kuitenkin Robotista saatuja tuloksia sallittuihin arvoihin.

Valmistajan antamat puristus- ja vetokestävyydet ylä- ja alapaarteille jäykistysvariantilla ”raskas”, kun nurjahduspituus on 1m ovat

- Yläpaarre $max. N_{-R,d} = -113,4kN$
 $max. N_{+R,d} = 113,4kN$
- Alapaarre $max. N_{-R,d} = -67,4kN$
 $max. N_{+R,d} = 92,4kN$

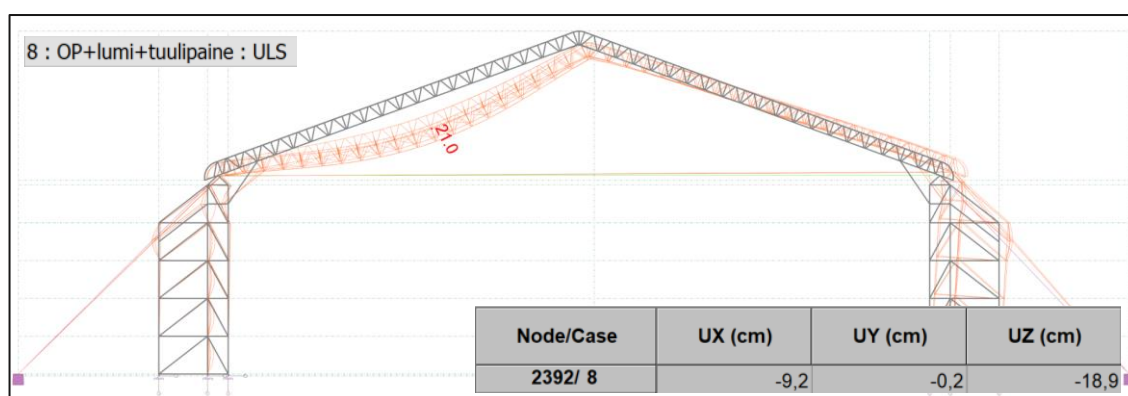


KUVA 20. Rakenteen puristetuin sauva nähtävissä ristikon yläpaarteessa ja vedetyin sauva viereisen ristikon alaparteessa.

Kuvasta 20 nähdään, että globaali maksimipuristus saavutetaan yläpaarteen sauvassa 1119 arvolla $116,88kN$ ja globaali maksimiveto alaparteen sauvassa 1307 arvolla $-73,11kN$. On huomioitava, että Robot esittää normaalivoimien etumerkit käänteisesti verrattuna edellä mainittuihin sallittuihin arvoihin. Käyttöaste yläpaarteen osalta ylittyy muutamalla prosenttiyksiköllä, kun taas alittuu selvästi alaparteen osalta.

Kyseisessä kuormitustilanteessa on myös huomioitava vetopaarteen saama kuormitus. Kuormitetuimman kattoristikon vetopaarteena toimiva vaijeri ottaa vastaan $33,46\text{ kN}$ suuruisen vedon. Erityisesti vaijerien kiinnityspisteiden ja käytettävän materiaalin osalta tämä on otettava huomioon. Tyypillisesti yli 30 metrin jännevälin sääsuojassa käytetään vaijerin sijasta dywidag-harvakierretangon ja kuormaliinan yhdistelmää. Tarkasteltavassa mallissa on kuitenkin käytetty vaijeita, sillä Robot tarjoaa niiden käyttöön toimivan työkalun.

Vaikka mallista saadut paarteiden normaalivoimat eivät ole absoluuttisen tarkkoja, saadaan selville voimien todennäköinen suuruusluokka ja voidaankin todeta voimien olevan merkittävät. Kyseisen kaltaisessa suuren jännevälin suojassa, jossa rasitukset ovat suuria, onkin syytä tarkastella myös ristikoiden siirtymiä. Kuvassa 21 on tarkasteltu määräävimmissä kuormitusyhdistelmässä ristikoiden maksimisiirtymiä. Globaali maksimisiirtymä aiheutuu keskellä suojaa, tuulen puoleisen lappeen puolivälissä, jossa Z-akselin suuntainen siirtymä on $18,9\text{ cm}$, X-akselin suuntainen siirtymä on $9,2\text{ cm}$ ja Y-akselin suuntainen siirtymä on $0,2\text{ cm}$.



KUVA 21. Rakenteen maksimisiirtymä nähtävissä tuulen puoleisella lappeella ristikon yläpaarteen solmussa.

Sääsuojastandardissa ei anneta siirtymärajoja sääsuojarakenteille. Jos saatuja arvoja verrataan eurokoodin mukaisesti teräsuunnittelussa pääkannattajille käytettävää taipuman raja-arvoa $L/300$, voidaan todeta pystysuuntaisten siirtymien olevan merkittäviä käyttöasteen ollessa 149%. Vaikkakin siirtymävertailu toteutettiin kuriositeetin vuoksi, kokonaistarkastelun tuloksena voidaan todeta kyseisen sääsuojamallin olevan kapasiteettinsa rajamailla $38,15\text{ metrin}$ jännevälillä käytetyillä lähtöarvoilla.

4.2.2 Elementtitelineiden kuormitustarkastelu

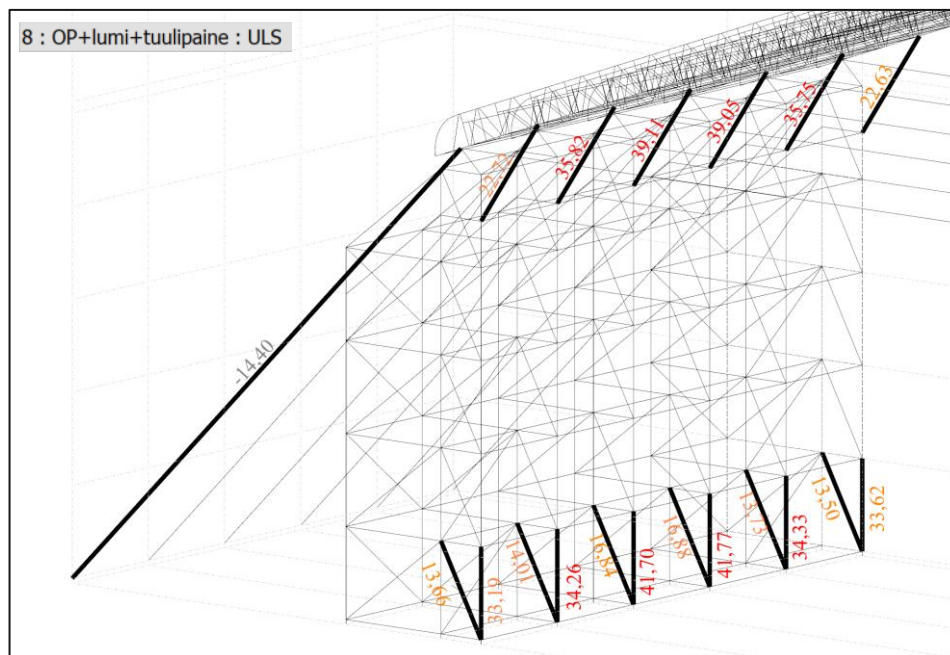
Telineiden osalta oleellisinta on tarkastella mallin rasitetuimpia sauvoja ja varmistaa, että käyttöasteet pysyvät sallituissa rajoissa. Taulukossa 6 on esitetty käytettyjen sauvojen normaalivoimakestävyydet.

TAULUKKO 6. Layher K2000+ telinesauvojen normaalivoimakestävyydet (Layher Systems 2014).

	Vinositeet	Vaakatuet		Pystysauvat ^a	
Tukiväli [m]	1,09	2,57	1,09-2,57	1,09	2,57
Puristus [kN]	16,8	10,2	31,0	34,8	40,3
Veto [kN]	17,9	17,9	31,0		

^a Nurjahduspituuden ollessa 2m, vinositeet joka kolmannessa lohossa.

Kuvassa 22 nähdään määräävimmän kuormitustapauksen tuulen puoleisen telineen kriittisimmät sauvat ja niiden puristusrasitukset.

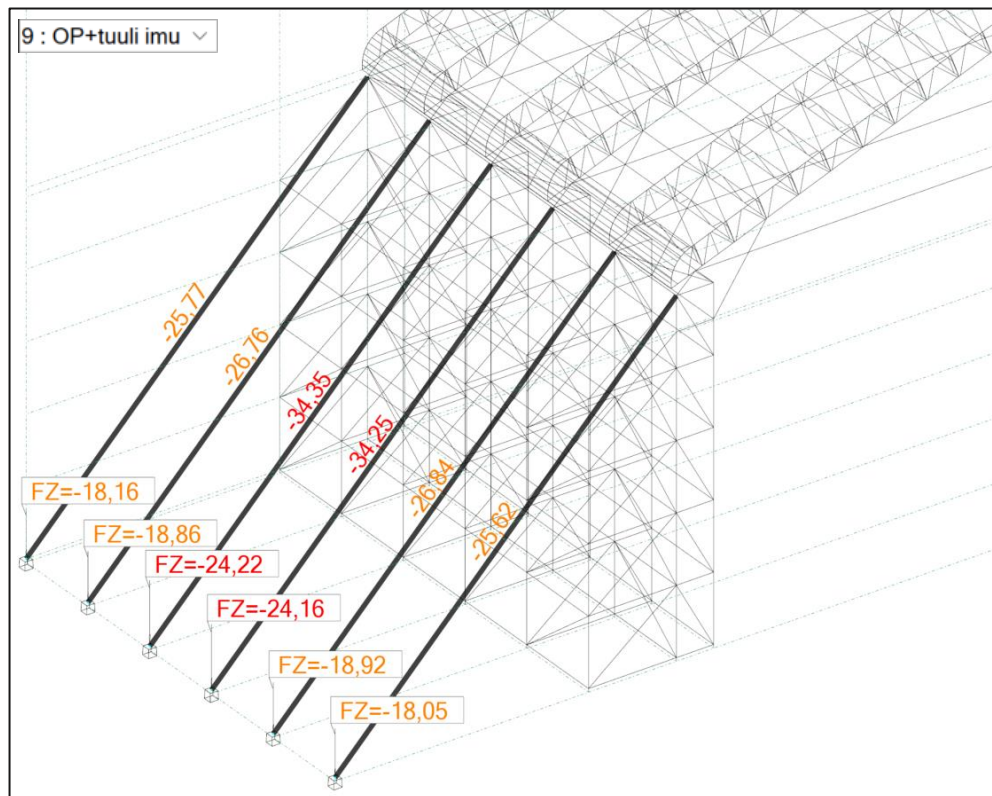


KUVA 22. Sauvojen puristus- ja vetorasitustarkastelu kuormitetuimmille sauvoille tuulen puoleisessa telineessä.

Pystysauvojen kriittisin puristusrasitus on $41,77\text{kN}$, jolloin käyttöaste on 104%. Vinositeiden kriittisin puristusrasitus telineen alaosassa on $16,88\text{kN}$, jolloin käyttöaste on 100%. Kuormat ovat maltillisia ja helposti hallittavissa lyhentämällä nurjahduspituuksia ja lisäämällä vaakatuenta.

Telineen yläpään ja kattoristikoiden väliin asennetaan kuvan 22 mukaisesti tyyppillisesti vinositeitä jäykistämään rakennetta ja lyhentämään jänneväliä. Nämä vinositeet saavat laskennassa todella suuria rasituksia, jotka eivät täysin vastaa todellisuutta, sillä siteiden asennukseen käytetään lukkoja, jotka mahdollistavat välysten myötä huomattavan liikkeen ennen rasituksia. Tämän lisäksi siteet asennetaan viimeisimpinä sauvoina rakenteen alkusiirtymien jo tapahduttua. Tulosten perusteella on kuitenkin aiheellista todeta, että siteitä ei tulisi asentaa yksinkertaisina.

Staattisen tasapainon osalta määrävissä kuormitustapauksessa rakenteeseen vaikuttaa oma paino, tuuli puhaltaa rakenteen sivusta ja molemmilla sääsuojan lappeilla vaikuttaa tuulen imu. Tapaus aiheuttaa tukivaijereille suurimman veto-
rasituksen ja vastapainoille suurimman tukireaktion, joka määrittää vastapainojen suuruuden.



KUVA 23. Suurimman nosteen aiheuttamat vetokuormitukset vaijereille, sekä pystytukivoimat tuille tuulen puoleisessa telineessä.

Kuvasta 23 nähdään, että suurin vaijerin vetokuormitus on $34,35\text{ kN}$, josta aiheutuu $-24,22\text{ kN}$:n pystysuuntainen tukireaktio vastapainolle.

4.2.3 Epävakausingelmat

Yksi suurimmista yksittäisistä tekijöistä mallin käytettävyyden ja toimivuuden osalta on telineille asetettujen vapausasteiden määrä ja niiden laadut. Kuten aiemmin on todettu, telineiden kaikki liitokset oletetaan niveliseksi, jolloin ollaan suunnittelussa varmalla puolella. Kuitenkaan esimerkiksi case kohteen mallin osalta kaikkia telineen liitoksia ei voida asettaa täysin niveliseksi, sillä tällöin ohjelma ei pysty suorittamaan laskentaa ollenkaan. Erityisesti kun rakenne on suuri ja sisältää epälineaarisuutta, kuten kaapelielementtejä, vapausasteiden määrä korreloi suoraan epävakaan määrään. Ongelmaa voidaan pitää laskentaohjelman ominaisuutena, eikä virheenä mallissa.

Autodesk ohjeistaa poistamaan sauvoilta mahdollisuuden pyörähtää oman pituussuuntaisen lokaaliakselin ympäri. Asetus poistaa mallin epävakausingelmat ja sitä voidaan pitää hyväksyttävänä toimenpiteenä myös staattisen toiminnan kannalta. Ongelman myötä tehtiin vertailulaskelma telineen liitosten asetusten välillä. Telineen kaikkien liitosten asettaminen jäykiksi nostaa mallissa vaikuttavien normaalivoimien summaa noin 6,5 % verrattuna summaan nivelisillä liitoksilla. Määrä ei ole kovin merkittävä, mutta vahvistaa liitosten oikeanlaisen mallintamisen tärkeyden.

4.3 Soveltuvuuden arviointi

Case kohteessa tarkasteltiin rakenteellisesti hyvin haastavaa sääsuojarakennetta, mutta siitä onnistuttiin luomaan toimiva malli ohjelmaan ilman edeltävää kokemusta Robotista. Laskentatuloksia voidaan pitää jokseenkin luotettavina, vaikkakin monin osin tulokset olivat yläkanttiin perinteisiin laskentamenetelmiin verrattuna. Monimutkaisten mallien tulosten analysoinnin osalta erityisen tärkeää onkin suunnittelijan perehtyneisyys sääsuojarakenteisiin ja niiden rakenteelliseen toimintaan.

Vaikka ohjelma on kohtalaisen käyttäjäystävällinen, moderneine käyttöliittymineen, mallin luomiseen tuhlaantui valtavasti aikaa, joka kuitenkin suurelta osin

johtui tekijän kokemuksen puutteesta. Ajankäyttöön vaikutti myös se, että sääsuojarakenteiden mallintamiseen ei luonnollisestikaan löydy ohjeistusta. Vaikka Robot on ollut käytössä maailmalla jo pitkään, ei senkään osalta kokonaisvaltaista opetusmateriaalia löydy, varsinkaan ilmaisena. Suurena haasteena myös tulevaisuudessa voidaankin pitää lähdemateriaalin puutetta ohjelman osalta. Vaikka tämän työn myötä aiheesta saadaankin yritykselle paljon tietoa, ohjelman integrointi osaksi normaalia suunnittelutyötä voi vaatia paljon aikaa ja resursseja.

Autodesk markkinoi voimakkaasti Robot ja Revit -ohjelmia käytettäväksi yhdessä. Vaikka Revit on käytössä myös toimeksiantajan suunnittelukäytössä, import-toimintojen käytettävyys sääsuojarakenteiden osalta vaikuttaa kuitenkin vajavaiselta. Todennäköisesti tehokkaampaa olisi panostaa Robot -ympäristössä luotujen mallien kirjastoon, erityisesti suurten sääsuojien osalta. Sääsuojalohkojen ollessa valmiina kirjastossa yleisimpien jänneväliden mukaisesti, elementtiteliheitä on helppo luoda ja muokata tarvittaviin dimensioihin.

Robotin suurin anti rakennesuunnittelijalle yleisesti on suunnittelukoodistojen integraation mahdollistama automaattinen rakenneosien poikkileikkausmitoitus. Sääsuojarakenteissa käytettävien valmisosien myötä suurin osa ohjelman ominaisuuksista jääkin käyttämättä. Sääsuojarakenteita suunnitellessa ohjelmaa voidaan käyttää yksittäisten rakenneosien kuormitustarkasteluun ja sen myötä mitoitukseen. Pienenkin sääsuojamallin laskennassa ohjelma ratkaisee kymmeniä tuhansia yhtälöitä, joten on helppo nähdä ohjelman potentiaali verrattuna yksinkertaisiin taulukkolaskureihin. Tällä hetkellä laskennasta saatavalle suurelle määrälle dataa ei kuitenkaan ole käyttöä ja varsinainen hyöty jää laihaksi.

Tämän työn myötä huomattiin useita ongelmakohtia sääsuojarakenteiden mallintamiseen liittyen, joiden osalta tulee tehdä jatkotutkimusta. Erityisesti vinositeiden välysten, asetettujen vapausasteiden ja rakenteiden epäkeskisyyksien mallintamisen vaikutuksia tulee tutkia tarkemmin.

Ohjelman tehokkaan käytön kannalta oleellista olisi saada aikaan mahdollisimman yksinkertainen rakennemalli, joka kuitenkin toimii staattisesti oikein ja jonka myötä varmistetaan turvallinen rakentaminen. Mitä tarkempi mallista tehdään ja

mitä enemmän epälineaarisuutta se sisältää, sitä kriittisemmin tuloksiin tulee suhtautua ja sitä enemmän mallin luomiseen kuluu aikaa. On myös huomioitava, että FEM-laskentaa ei tule käyttää ainoana laskentamenetelmänä suunnittelussa, vaan tulokset tulee aina varmentaa jollain toisella menetelmällä.

Tulevaisuudessa sääsuojarakenteiden suunnitteluvaatimukset tulevat varmasti kasvamaan. Rakenteet eivät myöskään jatkossa pienene tai yksinkertaistu, vaan päinvastoin. Vaikka FEM-laskennan hyödyntäminen sääsuojarakenteiden suunnittelussa ei nykyisin vielä välttämättä ole kustannustehokasta, saattaa se nykyisellään mahdollistaa paremman suunnittelulaadun, mutta ennen kaikkea siitä yrityksen on mahdollista saada kilpailuetu tulevaisuuteen.

5 POHDINTA

Tämän insinööriyön tavoitteena oli tutkia, miten Robot Structural Analysis -ohjelma soveltuu sääsuojarakenteiden suunnitteluun. Työn aihe syntyi tarpeesta kehittää suunnittelumenetelmiä yrityksen sisällä. Tutkimus toteutettiin arvioimalla lähdemateriaalia ja luomalla FEM-laskentamalli case kohteen sääsuojasta kuormituksineen. Lisäksi työssä läpikäytiin sääsuojarakenteen suunnitteluprosessi käytetyn standardin ja eurokoodin pohjalta.

Laskentamallin pohjalta saadut tulokset olivat osittain lupaavia ja vertailukelpoisia perinteisten laskentamenetelmien kanssa. Ohjelman käyttö varsinaisessa sääsuojasuunnittelussa vaikuttaa kuitenkin haasteelliselta. Mallin luominen ja analysointi vie toistaiseksi runsaasti aikaa ja mallissa esiintyvät epävakausongelmat ovat suuri haaste. Lisäksi suurin osa Robotin kaltaisen raskaan ja kalliin ohjelmiston ominaisuuksista jää sääsuojasuunnittelussa käyttämättä ja onkin todennäköistä, että jokin kevyempi ja käyttäjäystävällisempi ohjelma voisi toimia yrityksen käytössä paremmin.

Sääsuojarakenteiden käyttäytyminen on hyvin epästabiliia johtuen muun muassa suurista muodonmuutoksista ja suuresta määrästä epälineaarisuutta. Onkin mahdollista, että tutkitun kaltainen laskentamenetelmä ei sovellu sääsuojarakenteille lainkaan. Kokonaisvaltaisten ongelmien lisäksi työn aikana löydettiin useita pienempiä jatkotutkimusaiheita. On selvää, että aihetta tulee jatkossa tutkia lisää ja tämä työ luo sille hyvän pohjan.

Sääsuojarakenteiden suunnitteluvaatimukset tulevat jatkossa kasvamaan ja lähivuosina myös lainsäätäjät todennäköisesti heräävät sääsuojarakenteiden käytön luomiin vaatimuksiin. Tämän myötä suunnittelumenetelmiä on syytä kehittää alalla. Mahdollista on, että jatkotutkimuksen ja lisäpanostuksen kautta Robot Structural Analysis -ohjelmasta saadaan toimiva tulevaisuuden suunnittelutyökalu.

LÄHTEET

Ympäristöministeriö. 2017. Uusi asetus edellyttää rakennushankkeelta kosteudenhallintaselvitystä. Tiedote. Luettu 1.2.2020. Saatavilla: https://valtioneuvosto.fi/artikkeli/-/asset_publisher/uusi-asetus-edellyttaa-rakennushankkeelta-kosteudenhallintaselvitysta

Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta 26.3.2009/205. Luettu 3.1.2020. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2009/20090205>

Ratu S-1232. 2013. Rakennustyömaan sääsuojaus. Rakennustieto Oy.

Ramirent mediapankki. 2019.

RIL-142-2010. 2010. Työtelineet ja putoamisen estävät suojarakenteet. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

Layher Scaffolding Systems: Guideline for Professional Users. 2014. Gueglingen-Eibensbach: Wilhelm Layher GmbH & Co.

Layher Allround Scaffolding – Instructions for Assembly and Use. 2013. Wilhelm Layher GmbH & Co.

Langenscheidt, F. & Venohr, B. 2014. Lexikon der deutschen Weltmarktführer. 2. painos. Köln: Deutsche Standards Ed.

SFS-EN 16508. 2015. Temporary Works Equipment – Encapsulation Constructions – Performance Requirements and General Design. European Committee for Standardization, CEN.

Talonrakennusteollisuus ry. Telinejaosto. 2017. Rakennustelineiden ja sääsuojien suunnitelmiin liittyvät periaatteet. Luettu 1.1.2020. Saatavilla: https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/toimialat/talonrakennus/hyotyhtoea-tyomaille/telinejaosto/31_5_2017_telinesuunnitelmat.pdf

RIL 201-1-2011. 2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

SFS-EN 12811. 2003. Temporary Works Equipment – Part 1: Scaffolds – Performance Requirements and General Design. European Committee for Standardization, CEN.

Layher Keder Roof XL – Instructions for Assembly and Use. 2014. Wilhelm Layher GmbH & Co.

Riutta, M. 2018. Sääsuojarakenteiden rakenteellinen turvallisuus. Rakennesuunnittelu. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.