



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**FEM-laskentaohjelman aikahistoria-analyysin
hyödyntäminen korkeiden rakennusten tuulikuorman
aiheuttaman värähtelyn mitoituksessa**

Sami Granroth

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö 2019

TIIVISTELMÄ

FEM-laskentaohjelman aikahistoria-analyysin hyödyntäminen korkeiden rakennusten tuulikuorman aiheuttaman värähtelyn mitoituksessa

Sami Granroth

Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2019, 76 s. + 4 liitettä

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Hannu Liedes, Antti Niemi

Korkea rakentaminen tuottaa haasteita rakennesuunnittelussa, joista yksi on tuulikuorman aiheuttama värähtely. Eurokoodimitoitus antaa tavan mitoittaa geometrialtaan varsin yksinkertaisia rakennuksia, minkä takia todellisuudessa Eurokoodimitoitus ei monesti sovellu värähtelytarkasteluun. Työssä selvitetään värähtelyn aiheuttamia vasteita FEM-ohjelman avulla, sekä selvitetään sen soveltuvuus ja hyödyllisyys vasteiden mitoituksessa.

Työssä tutkitaan ICON Suurpeltoon suunniteltua 21-kerroksisen rakennuksen käyttäytymistä tuulikuormituksessa. Työssä selvitetään Eurokoodin antaman menetelmän soveltamista kohteeseen, sekä tehdään FEM-ohjelmalla aikahistoria-analyysi.

Työssä esitettyjen tulosten perusteella voidaan sanoa, että Eurokoodi mitoitus soveltuu lähinnä matalien ja keskikorkeiden rakennusten mitoitukseen tai vertailutuloksiksi. Varsinkin tuulen poikkisuuntaisen värähtelyn aiheuttamien kiihtyvyyksien arviointi on epävarmaa Eurokoodin mukaisin menetelmin. Mitoitus FEM-ohjelmalla antaa lupaavia tuloksia verrattuna eurokoodimitoitukseen, ilman että rakennukselle olisi asetettava rajoituksia geometrian tai lineaarisuuden suhteen. Menetelmän yksi suurimmista hyödyistä on se, että sillä voidaan myös selvittää vääntövärähtelyn vasteet. Menetelmä on kuitenkin altis käyttäjän virheille ja sen tarkkuutta olisi syytä tutkia tarkemmin tuulitunnelitestauksen avulla.

Asiasanat: Tuulikuorma, Aikahistoria-analyysi, värähtely, kiihtyvyys

ABSTRACT

Utilizing FEM-programs time history analysis during wind caused vibrations in high-rise buildings

Sami Granroth

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Master's thesis 2019, 76 p. + 4 Appendixes

Supervisor(s) at the university: Hannu Liedes, Antti Niemi

There are many difficulties in designing high-rise buildings, and one of those is taking account the vibration caused by wind loads. Eurocode provides a method to calculate the vibration responses of the building, but it only covers very basic building shapes and therefore isn't suitable at all cases. In this thesis, vibration responses are calculated by FEM-program and it is explored if those results can be used in designing process.

In this thesis, an example case of ICON Suurpelto, a 21-storey building, is used to study how wind loads affect the building. For this case, Eurocode method is carried along with time history analysis of FEM-program, and the results are cross examined.

The results of this thesis imply that Eurocode method should only be used to calculate the vibration responses of low and mid-high buildings or used as a supplement result. Especially the across wind acceleration results are questionable with the method. The calculations results obtained from FEM-program are in line with the results provided by Eurocode methods, but with more freedom regarding the shape and linearity of the building. Unlike the method in Eurocode, it also provides a way to calculate torsional acceleration responses. Calculating the response results with FEM-program however is sensitive to user errors and the accuracy of the results is hard to estimate without wind tunnel experiments.

Keywords: Wind load, Time history analysis, vibration, acceleration

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty opinnäytteenä Oulun yliopiston rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osastolle diplomi-insinööri tutkintoa varten. Työn toimeksiantajana on toiminut Ramboll Finland Oy. Työn lähtökohtana on ollut toimeksiantajan toiveen mukaan luoda helposti lähestyttävä ja kattava katselmus tuulen aiheuttaman värähtelyn mitoitukseen, mitä voidaan käyttää lähtökohtana ja lähdemateriaalina tulevien rakennuskohteiden suunnittelussa.

Diplomityön ohjaajina ja tarkastajina ovat toimineet yliopisto-opettaja Hannu Liedes ja Antti Niemi Oulun yliopistolta, sekä Diplomi-insinööri Juha Tiikkainen Ramboll Finland Oy:stä.

Lisäksi haluan työn tarkastajien ja ohjaajien lisäksi kiittää Ismo Kovalaista ja Katja Romppaista työn aikaisesta opastuksesta ja tuesta, sekä Ramboll Finland Oy:tä tästä mielenkiintoisen aiheen toteuttamismahdollisuudesta.

Oulu, 9.11.2019



Työn tekijä

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	10
1.1 Työn rajaus	11
2 Tuulen aiheuttama värähtely	12
2.1 Tuulen ominaisuuksia.....	12
2.1.1 Tuulen nopeuden perusarvo.....	13
2.1.2 Tuulennopeuden modifioitu perusarvo	14
2.1.3 Puuskanopeuspaine	14
2.2 Pyörreratailmiö	15
2.3 Tuulensuuntainen värähtely.....	19
2.4 Vääntövärähtely	20
2.5 Tuulen tilastollinen mallintaminen	21
2.6 Värähtelymitoituksen raja-arvot	24
2.6.1 Kiihtyvyyssarvo.....	24
2.6.2 Taipuma.....	25
2.6.3 Tuulennopeus maan tasalla.....	25
3 Rakennuksen värähtelyominaisuudet.....	27
3.1 Ominaistaajuus.....	27
3.2 Rakennuksen vaimennus	30
3.3 Rakennuksen massa ja jäykkyys	31
4 Rakennuksen värähtelymitoitus Eurokoodin mukaisesti	34
4.1 Lähtötiedot.....	34
4.2 Tuulen suuntainen värähtely.....	34
4.2.1 Kiihtyvyyden ominaisarvon laskennan parametrit	35
4.2.2 Tuulen suuntaisen värähtelyn laskennan vuokaavio	41
4.3 Poikittaissuuntainen värähtely	42
4.3.1 Tuulen poikkisuuntaisen värähtelyn laskennan vuokaavio	45
4.4 Taipuman laskenta	46
5 Vasteen laskennallinen Mallintaminen	48
5.1 CFD mallinnus	48
5.1.1 Turbulentin mallinnus	48
5.2 Esimerkki kohteen FEM-mallinnus	49
5.2.1 Geometria	49

5.2.2 Kuormat	50
5.2.3 Virtuaalinen tuulimallinnus	51
5.2.4 Ominaismuotoanalyysi	53
5.2.5 Aikahistoria-analyysi	56
5.3 Yksinkertaistettu FEM-malli	62
5.4 FEM-mallinnuksen virhetekijät	63
6 Tulokset	64
6.1 Tuulen suuntainen värähtely	64
6.2 Tuulen poikkisuuntainen värähtely	67
6.3 Vääntövärähtely	68
6.4 Taipuma	69
6.5 Tuloksien pohdinta	70
7 Yhteenveto	72

LIITTEET:

- Liite 1. Rakennuksen tuulen värähtelymitoitus Eurokoodi 1991-1-4:2011

- Liite 2. Rakennuksen tuulen poikkisuuntainen värähtelymitoitus Eurokoodi 1991-1-4:2011

- Liite 3. Weibull -jakautuneen tuulen nopeushistorian generointi

- Liite 4. ICON Suurpellon tuuliselvitys

MERKINNÄT JA LYHENTEET

a_L	normalisoitu raja-amplitudi
b	rakennuksen leveys
B	taustapyörteiden vaikutusparametri
C	vaimennusmatriisi
$c_0(z)$	pinnanmuotokerroin korkeudella z
C_c	poikkileikkauksen muodosta riippuva aerodynaaminen vakio
c_d	dynaaminen kerroin
c_f	tuulikuorman voimakkeroin
c_{prob}	vuotuinen ylittymistodennäköisyyskerroin tuulennopeudelle
$c_r(z)$	rosoisuuskerroin korkeudella z
c_{sd}	rakennekerroin
D	poikkileikkauksen halkaisija
d	rakennuksen syvyys
e	Neperin luku
f_L	dimensioton taajuuden funktio
f_p	pyörteiden irtoamisen taajuus
F_w	Tuulikuorma
g	maan vetovoima kiihtyvyys
h	rakennuksen korkeus
$I_v(z)$	tuulenpuuskien intensiteetti korkeudella z
K	jäykkyysmatriisi
k_l	pyörteisyysskerroin
K_a	vaimennuksen aerodynaaminen parametri
K_p	huippuarvokerroin
K_x	dimensioton parametri
$L(z)$	tuulenpuuskien ulottuvuus korkeudella z
L_t	rakennuksen vertailuleveys
M	massamatriisi
m_d	massatiheys
m_e	ekvivalentti massa pituusyksikkö kohti
P	Tuulikuorman aiheuttama paine
p	vuotuinen ylittymistodennäköisyys tuulennopeudelle

$q_p(z)$	puuskanopeuspaine korkeudella z
R	resonanssivasteen vaikutusparametrin neliöjuuri
$R_{h,b}$	aerodynaamiset siirtokerroinfunktiot
rms	turbulenssin neliöllinen keskiarvo
S	lumikuorma
Sc	Scrutonin luku
s_k	lumikuorman ominaisarvo maan pinnalla
S_L	dimensioton tehospektrin tiheysfunktio
St	Strouhalin luku
T	tuulennopeuden perusarvoa mitattaessa käytetty aika
T_k	ilman absoluuttinen lämpötila
t	aika
v	tuulennopeus
v_b	tuulennopeuden perusarvo
$v_{crit,i}$	ominaismuotoa i vastaava kriittinen tuulennopeus
v_m	tuulennopeuden modifioitu perusarvo
z_0	rosaisuusmitta
z_{min}	maastoluokasta riippuva minimikorkeus
z_s	nopeuspaine korkeus
z_t	rakennuksen vertailukorkeus
β	Weibull -jakauman muotokerroin
γ	Weibull -jakauman paikkaparametri
δ	vaimennuksen logaritminen dekrementti
δ_a	aerodynaamisen vaimennuksen logaritminen dekrementti
δ_d	erityislaitteista aiheutuva vaimennuksen logaritminen dekrementti
δ_s	sisäisen vaimennuksen logaritminen dekrementti
η	Weibull -jakauman skaalaparametri
η_i	ominaismuotoa i vastaava ominaistaajuus
λ	hoikkuusluku
ζ	ominaismuodon eksponentti
ρ	ilmantiheys
$\sigma_{0,x}$	huippukiihtyvyyys
$\sigma_{a,x}(z)$	kiihtyvyyden keskihajonta korkeudella z

$\phi_{1,x}(z)$ alin tuulensuuntaisen värähtelyn ominaismuoto

1 JOHDANTO

Korkeiden rakennusten rakentaminen on Suomessa ollut kohtalaisen vähäistä, mutta se on alkanut selvästi yleistymään viime vuosina. Kirjoitus hetkellä Suomen korkein asuinrakennus on Hotelli Torni Tampere, jonka korkeus on 88,5 metriä. Rakenteilla on kuitenkin selvästi korkeampiakin asuinrakennuksia, kuten Helsingin Keski-Pasilaan suunniteltu asuinrakennus, jonka korkeus on 158 metriä. Maailman mittakaavassa nämä ovat vielä keskivertoisia tornitaloja, mutta Suomessa voidaan jo puhua erityisen korkeasta rakentamisesta.

Korkeiden rakennusten suunnittelu vaatii monenlaista erityisosaamista verrattuna tavanomaisiin mataliin rakennuksiin, joista yksi on tuulen aiheuttamien ongelmien huomioiminen. Tuulikuormien suunnittelun osuus kasvaa eksponentiaalisesti, mitä korkeammaksi rakennuksissa mennään. Tuulikuorman suuruus kasvaa korkeuden kasvaessa, mutta erityisesti suunnittelua vaikeuttaa korkeiden talojen osalta rakennuksen hoikkuus. Korkeilla taloilla on pääsääntöisesti matalampi ominaistajuus, mikä voi johtaa epäsuotuisiin värähtelyihin tuulen vaikutuksesta. Värähtelyt voivat aiheuttaa asukkaille epämiellyttäviä tunteita tai jopa vaurioittaa rakenteita. Korkeiden rakennusten vähäisyydestä johtuen, Suomessa ei ole vakiintuneita tapoja mitoittaa tuulen aiheuttamaa värähtelyä ja Eurokoodi antaa apuja vain erittäin yksinkertaisiin rakennuksiin.

Tässä työssä keskitytään selvittämään, miten Eurokoodit soveltuvat tuulen aiheuttaman värähtelyn mitoittamiseen, ja pystytäänkö FEM-mallinnusta käyttämään apuna rakennuksen värähtelymitoitukseen. Työssä käytetään esimerkkitapauksena Espoon Suurpellon keskustakortteliin suunnitella olevaa 21-kerroksista asuinrakennusta. Kohteesta tehdään FEM-malli Robot Structural Analysis-ohjelmalla, jonka avulla tutkitaan rakennuksen värähtelyyn liittyviä ominaisuuksia ja lasketaan Eurokoodipohjaisen tuulikuorman aiheuttamat vasteet rakenteelle. FEM-mallin tarkoituksena on varmentaa Eurokoodin käsin laskettuja tuloksia sekä selvittää, voidaanko Eurokoodimitoituksen rajoituksien ulkopuolella olevia rakenteita mitoittaa luotettavasti. Työssä selvitetään myös värähtelyyn liittyviä ilmiöitä ja teoriaa. Lopuksi pyritään arvioida tulosten paikkansapitävyyttä ja selvittää, riittävätkö lähtötietojen tarkkuudet ilman erillistä dynaamista koetta, kuten tuulitunnelikoetta, Espoon Suurpellon rakennuksen mitoittamiseen.

1.1 Työn rajaus

Työssä keskitytään tuulikuormituksen aiheuttaman värähtelyn laskentaan Eurokoodimitoituksen pohjalta ja tuloksien varmentamiseen FEM-laskentaohjelmalla tehdyllä aikahistoria-analyysillä. Tarkoituksena on tuottaa materiaalia rakennesuunnittelijoille, jotka voivat käyttää työtä pohjana, kun tulevista rakenteista on tehtävä vastaava analyysi. Tämän takia teorian vaatimat kaavat ja laskelmat pyritään esittämään mahdollisimman yksinkertaisessa ja helposti lähestyttävässä muodossa.

Työssä tutkitaan tuulikuormituksen aiheuttamaa vastetta ICON Suurpeltoon rakennettavalle rakennukselle. Työn teon hetkellä rakennuksesta on ainoastaan arkkitehdin tekemät alustavat pohjapiirustukset. Todellinen rakenne voi poiketa nykyisestä mallista, koska esimerkiksi kaikkia seinä ei todennäköisesti käytetä kantavina rakenteina. Tässä työssä ei kuitenkaan oteta kantaa rakennesuunnittelun vaatimiin muutoksiin pohjapiirustuksissa, vaan tehdään malli arkkitehdin esittämällä tavalla.

Tuulikuormien mallintaminen CFD-menetelmien on jätetty työ rajauksen ulkopuolelle. Aihetta käsitellään teorian puolesta lyhyesti, mutta aihekokonaisuus on hyvin monimutkainen ja laskennallisen mallin tekeminen sekä tuloksien varmentaminen olisi liian suuri kokonaisuus tähän työhön.

Työssä oletetaan lukijalla olevan lähtökohtaisesti kohtalainen kokemus FEM-mallintamisesta, joten perus geometrian mallinnus kerrotaan vain yleisellä tasolla. FEM-mallinnuksen aikahistoria-analyysia sen sijaan kuvataan tarkemmin, sillä tarkkuudella, että aikahistoria-analyysin osalta kokematon käyttäjä voi toistaa toimenpiteen.

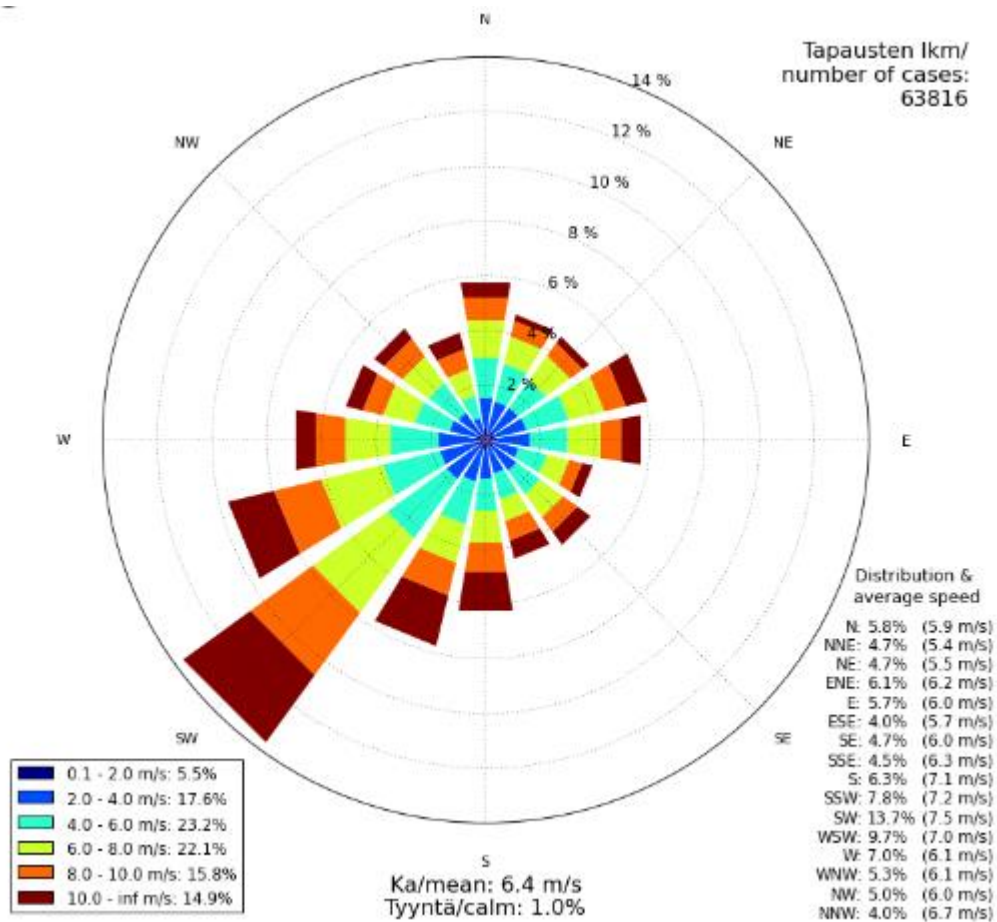
2 TUULEN AIHEUTTAMA VÄRÄHTELY

Tässä kappaleessa esitetään teoriaa ja ilmiöitä, joita liittyy tuulen ominaisuuksiin ja tuulen aiheuttamaan värähtelyyn. Kappaleessa esitellään pyörreratailmiö, tuulen suuntainen värähtely, sekä kiertymävärähtely. Lisäksi esitellään periaatteita, joiden mukaan värähtelyille annetaan raja-arvoja mitoittamista varten.

2.1 Tuulen ominaisuuksia

Tuuli mallinnetaan normimitoituksessa staattisena paineena rakennuksen pinnoille. Staattinen paine muodostuu tuulen pitkäaikaisesta osuudesta, eli keskimääräisestä tuulenopeudesta ja tuulen lyhytaikaisesta osuudesta, eli tuulen pyörteisyyden aiheuttamasta tuulen puuskaisuudesta. Staattinen paine aiheuttaa pintaa vastaan kohtisuoria voimia, mutta tuulen kohdatessa suuria rakenteen pintoja, myös pinnan suuntaisesti vaikuttavat kitkavoimat voivat olla merkittäviä. Normimitoituksessa tuuli ajatellaan siis tuulensuuntaiseksi staattiseksi voimaksi, jonka suuruus on sama kuin tuulen puuskien suurimmat vaikutukset. Todellisuudessa tuulen nopeus vaihtelee esimerkiksi suunnan, ajan ja paikan suhteen (SFS-EN 1991-1-4, s30).

Tuulen vaikutus rakenteeseen, eli vaste, koostuu monesta eri osatekijästä, kuten rakennuksen geometrisestä muodosta ja rakennuksen dynaamisista ominaisuuksista, kuten ominaistajuudesta ja vaimennuksesta. Tuulen liike ilmakehässä on hyvin vaihtelevaa ja satunnaista; tuulen nopeudet vaihtelevat esimerkiksi suunnan, korkeuden ja vuodenaikojen mukaan. Tuulen suunnan vaikutusta sen nopeuteen voidaan esittää ns. tuuliruusu -kuvaajalla, jonka periaate on esitetty kuvassa 2.1 Vaikka tuuli on hyvin satunnaista, se sisältää tilastollisia johdonmukaisuuksia, joiden avulla sen käyttäytymistä voidaan mallintaa (Suomen TuuliAtlas, 2018, Weibull).



Kuva 2.1 Tuuliruusun periaate (Ilmatieteenlaitos, 2019, tuuliruusu)

2.1.1 Tuulen nopeuden perusarvo

Suomessa tuulenopeuden perusarvoksi v_b on ilmoitettu 21 m/s, joka on määritetty 10 minuutin keskiarvona, riippumatta tuulen suunnasta tai vuodenajasta, 10 metrin korkeudella maanpinnasta maastoluokassa II ja 1/50 vuotuisella ylittämisen todennäköisyydellä. Tuulenopeuden perusarvon määrittäminen on esitetty Eurokoodissa SFS-EN 1991-1-4, kappaleessa 4.2.

Tuulen aiheuttamien värähtelyiden yhteydessä on monesti tarpeen tarkastella tuulta pienemällä vuotuisella ylittämisen todennäköisyydellä. Kappaleessa 2.6.1 on esitetty raja-arvoja värähtelyn aiheuttamalle kiihtyvyydelle, jotka voivat olla esimerkiksi esitetty tuulen 10 vuoden toistumisvälille. Kaavalla (2.1) voidaan laskea todennäköisyyskerroin tietylle ylittämistodennäköisyydelle p , jolla kerrotaan tuulen nopeuden perusarvo (SFS-EN 1991-1-4, kaava 4.2).

$$C_{prob} = \left(\frac{1 - K \cdot \ln(-\ln(1-p))}{1 - K \cdot \ln(-\ln(0,98))} \right)^n \quad (2.1)$$

missä	p	on vuotuinen ylittymistodennäköisyys (Esimerkiksi 50-vuoden ylittämistodennäköisyys: $1/50 = 0,02$)
	K	Muotoparametrin suositus arvo 0,2
	n	EkspONENTIN suositusarvo 0,5

Kaava ei toimi, kun käytetään ylittämistodennäköisyytenä yhtä vuotta, mutta tarkasteltaessa todennäköisyyskertoimen funktiota, voidaan yhden vuoden todennäköisyyskertoimen arvoksi extrapoloida noin 0,75.

2.1.2 Tuulennopeuden modifioitu perusarvo

Kuten aikaisemmin todettiin, tuulennopeus tietyssä ajan hetkenä muodostuu tuulennopeuden keskimääräisestä nopeudesta ja turbulentsisuuden vaikutuksesta. Tuulennopeuden modifioitu perusarvo v_m kuvastaa tuulen keskimääräistä nopeutta, jossa on otettu tuulennopeuden perusarvon lisäksi huomioon maaston rosoisuus ja pinnanmuodostus. Maaston rosoisuus tarkoittaa kitkaa, minkä maasto aiheuttaa tuulelle, tuulen kohdatessa esimerkiksi metsää. Yleisesti voidaan sanoa, että isompi rosoisuus pienentää tuulennopeutta, mutta lisää sen turbulentsisuutta. Pinnanmuodostuksessa otetaan huomioon maanpinnan muodon vaikutus tuulennopeuteen (SFS-EN 1991-1-4, kappale 4.3).

Maaston rosoisuuden huomioiminen Eurokoodin mukaan tapahtuu maastoluokan määrittämisellä. Maastoluokat on jaettu viiteen eri luokkaa, jotka kuvastavat maaston karheutta. Maastoluokille on määrätty rosoisuuskertoimet, joita käytetään tuulennopeuden modifioidun perusarvon laskennassa. Yleensä tuulennopeuden modifioitu perusarvo ilmoitetaan tietyllä korkeudella, tai korkeuden suhteen muuttuvana funktiona. Tuulennopeuden modifioidun perusarvon määrittäminen on esitetty kohdassa 4.2.1.

2.1.3 Puuskanopeuspaine

Tuulikuormia määrittäessä normimitoituksella, käytetään tuulen kuvaamiseen puuskanopeuspainetta, joka määritetään tietyllä korkeudella ottaen huomioon tuulen turbulentsisuus ja tuulennopeuden modifioidun perusarvon. Puuskanopeuspaine määritetään Eurokoodin (SFS-EN 1991-1-4, kaava 4.8) mukaisesti kaavalla (2.2). Puuskanopeuspaine siis kuvastaa tuulen keskimääräisen nopeuden ja turbulentsisuudesta johtuvan nopeusvaihtelun aiheuttamia paineita tuulensuuntaiselle pinnalle.

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z) \quad (2.2)$$

missä	$I_v(z)$	on tuulenpuuskien intensiteetti (katso kaava 4.3)
	ρ	on ilmatiheys [kg/m^3]
	$v_m(z)$	on tuulennopeuden modifioitu perusarvo tarkastelu korkeudella [m/s] (katso kaava 4.4)

Ilmantiheytenä Eurokoodi ilmoittaa suositusarvoksi $1,25 \text{ kg}/\text{m}^3$, mutta Eurokoodin 1991-1-4 kansallinen liite 5 suosittaa, että hoikkia erikoisrakenteita määrittäessä käytettäisiin ilmantiheydelle tarkempaa arvoa, joka ottaa huomioon rakennuspaikan korkeustason ja lämpötilan kaavan (2.3) mukaisesti (SFS-EN 1991-1-4, kansallinen liite, kaava 2-FI).

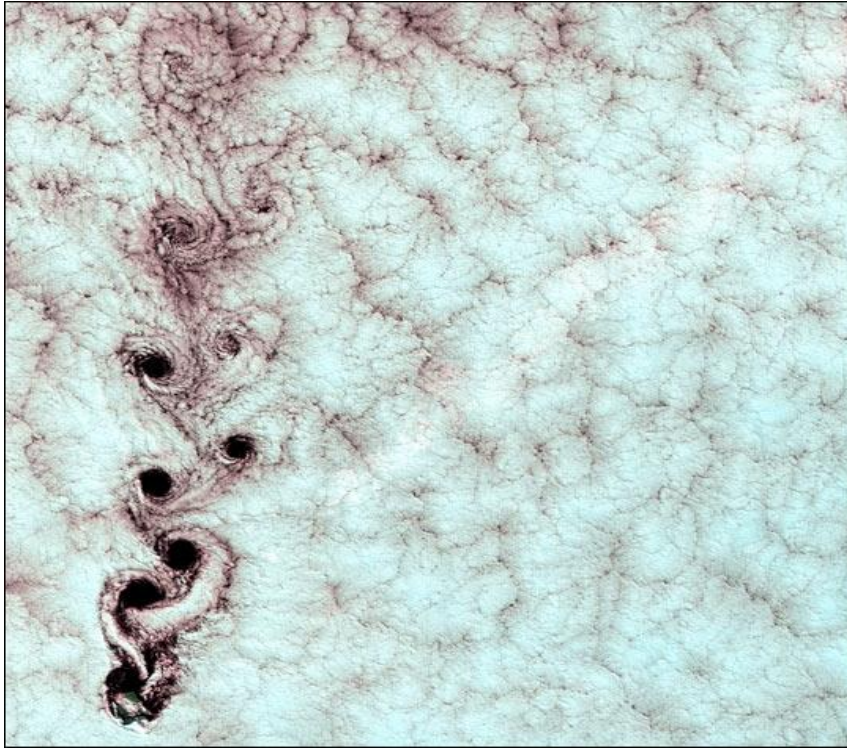
$$\rho = \frac{353}{T_k} * e^{-0,00012 * H} \quad (2.3)$$

missä	T_k	on ilman absoluuttinen lämpötila [K]
	ρ	on ilmatiheys [kg/m^3]
	H	on rakennuspaikan korkeus merenpinnasta [m]

E erityisen kylmissä olosuhteissa ilmatiheys voi kasvaa jopa 15% suositusarvoon verrattuna, joten korkeissa rakennuksissa, joissa tuulikuorman osuus alkaa eksponentiaalisesti kasvamaan, tämä olisi hyvä huomioida. Varsinkin, koska Suomessa kovat tuulet sijoittuvat talviaikaan (Ilmatieteenlaitos, 2019, tuulitilastot).

2.2 Pyörreratailmiö

Pyörreratailmiössä rakennuksen vastakkaisista reunoista irtoaa vuorotellen pyörteitä, jotka aiheuttavat värähtelyä tuulen suuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Rakenne alkaa värähtelemään, mikäli pyörteiden irtoamisen taajuus on sama kuin rakenteen ominaistajuus (SFS-EN 1991-1-4, E.1, 196 s.). Kuvassa 2.2 on esitetty ilmiö suuressa mittakaavassa, miten saari aiheuttaa pyörreratailmiön pilvipeitteeseen.



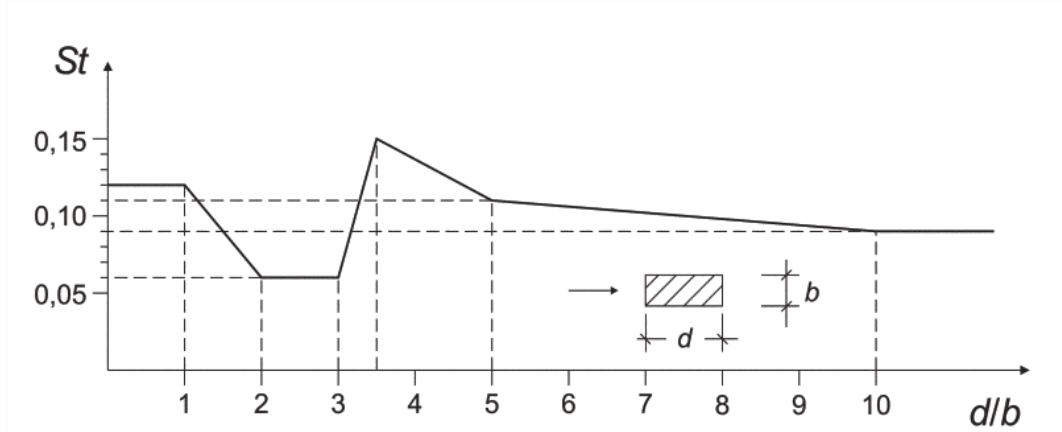
Kuva 2.2 NASA:n Landsat 7 ottama satelliittikuva pyörreeratailmiöstä. (NASA, 1999, Landsat 7 image)

Matalissa rakennuksissa pyörreeratailmiö ei ole yleensä ongelmallinen, koska ilmavirtaus on lähellä maan pintaa turbulenttista maan kitkasta johtuen, joka estää pyörteiden syntymisen ja matalilla tuulen nopeuksilla pyörteet syntyvät samaan tahtiin rakennuksen molemmilla puolilla, joten se ei aiheuta värähtelyä. Nopeuden kasvaessa pyörteet alkavat irrota vuorotellen, jolloin ne aiheuttavat voimaimpulseja tietyllä taajuudella. Pyörteiden irtoamisen taajuuden arviointiin voidaan käyttää kaavaa (2.4) (Taranath B. S., 2010, 262-263 s.):

$$f_p = \frac{v \cdot S}{D} \quad (2.4)$$

missä	f_p	on pyörteiden irtoamisen taajuus [Hz]
	v	on rakennuksen huipulla vaikuttava tuulenopeus [m/s]
	S	on kyseisen poikkileikkauksen dimensioton Strouhalin luku
	D	on poikkileikkauksen halkaisija tai tuulensuuntainen poikkileikkauksen leveys [m]

Tämä kuormituksen taajuus on syytä tarkistaa, ettei se osu rakennuksen ominaistajuuden alueelle. (Taranath B. S., 2010, 263 s.) Kaavassa (2.4) esiintyvälle Strouhalin luvulle saadaan arvo kuvasta 2.3, kun tarkasteltava rakenne on suorakaiteen muotoinen (SFS-EN 1991-1-4 taulukko E.1 ja kuva E.1).



Kuva 2.3 Strouhalin luku suorakaiteen muotoiselle poikkileikkaukselle (SFS-EN 1991-1-4 kuva E.1)

Pyörreratailmiö voi muodostua määrääväksi mitoitustilanteeksi rakennuksissa, joiden korkeus on suuri ja rakennuksen poikkileikkaus on jatkuva. Tehokas tapa estää pyörreratailmiötä on poikkileikkauksen muodolla, jolloin poikkileikkaus on esimerkiksi porrastettu tai kierteinen. Esimerkiksi savupiipuissa näkee monesti kierteitä piipussa, joiden tehtävänä on estää ilmavirtauksessa syntyviä pyörteitä.

Tutkimuksessaan Hallebrand ja Jakobsson (Hallebrand E., Jakobsson W., 2016, s. 39) esittävät tavan määrittää tuulen poikkisuuntaisen värähtelyn, joka pohjautuu NBCC:ssä (National Building Code of Canada) esitettyyn menetelmään. Työssä mainitaan, että yleisesti ottaen taipuma ja tuulikuorman maksimi esiintyvät tuulen suuntaisen värähtelyn tapauksessa, mutta huippukiihtyvyys esiintyy yleensä poikkisuuntaisessa suunnassa. On kuitenkin muistettava, että tämä oletamus liittyy pääsääntöisesti Amerikassa ja Kanadassa rakennettujen rakennusten tutkimuksiin, joissa rakennukset ovat kyseessä olevaa tutkimuskohdetta korkeampia, ja tästä syystä yleensä teräs on päämateriaalina rungon osalta. Ilman lisätutkimuksia on vaikea sanoa, päteekö väite myös 20-30 kerroksisiin teräsbetoni rakennuksiin. Vaihtoehtoisen menetelmän mukaan, rakennus on

erittäin altis poikkisuuntaisen värähtelyn aiheuttamille kiihtyvyyksille, mikäli kaava (2.5) on voimassa:

$$\frac{\sqrt{W*D}}{H} < 1/3 \quad (2.5)$$

missä W on rakennuksen leveys [m]
 D on rakennuksen syvyys [m]
 H on rakennuksen korkeus [m]

Värähtelyn aiheuttama kiihtyvyys voidaan laskea käyttäen kaavaa (2.6) (Hallebrand E., Jakobsson W., 2016, kaava 4.37):

$$a_w = n_0^2 * k_p * \sqrt{W * D} * \frac{a_r}{m_d * g * \sqrt{\beta}} \quad (2.6)$$

$$a_r = 78.5 * 10^{-3} * \left(\frac{V_h}{n_0 * \sqrt{W * D}} \right)^{3.3}$$

missä n_0 on rakennuksen arvioitu ominaistajuus [Hz]
 k_p on huippuarvokerroin (NBCC)
 W on rakennuksen leveys [m]
 D on rakennuksen syvyys [m]
 m_d on massatiheys [kg/m³]
 g on vetovoima kiihtyvyys 9,81[m/s²]
 β on rakennuksen vaimennussuhde
 $v_m(z)$ on tuulen keskinopeus tarkastelu korkeudella [m/s]

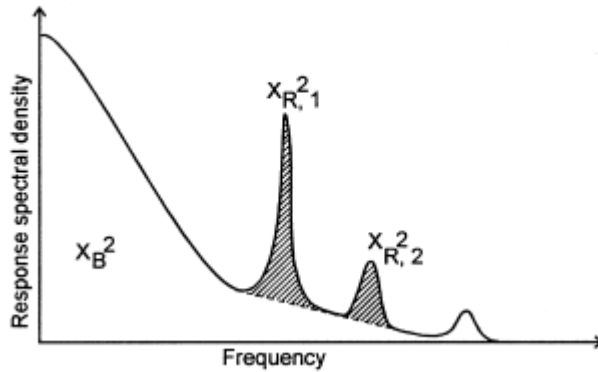
Tuulen poikkisuuntaista värähtelyä on silti vaikea arvioida, koska useat käytetyistä parametreista on vaikea määrittää tarkasti, kuten rakennuksen ominaistajuus, vaimennussuhde, tuulen turbulenttisuus ja viereisten rakennuksien vaikutus tuulenvirtaukseen.

Pyörreilmiö voi myös muodostua ongelmalliseksi, mikäli sen aiheuttaa rakennuksen vieressä oleva toinen korkea rakennus (SFS-EN 1991-1-4, E.1.5.2.7). Tällöin rivissä tai ryhmässä olevat rakennukset aiheuttavat resonanssivärähtelyä, mutta kyseiseen ilmiöön ei tässä työssä keskitytä, eikä esimerkkikohteen lähistöllä ole rakennuksia, jotka voisivat aiheuttaa ilmiön.

2.3 Tuulensuuntainen värähtely

Rakenteen värähtely tuulen suunnassa tapahtuu pääasiassa tuulen turbulenttisuuden vaikutuksesta, jolloin turbulenttisuus aiheuttaa sen aallonpituuden mukaisesti dynaamisia kuormituksia rakennukselle, saaden näin aikaan värähtelyä. Tuuli aiheuttaa värähtelyjä rakennukseen useilla taajuuksilla ja tuulen suuntaisesta värähtelystä voidaan erottaa kaksi osuutta: taustavärähtely ja rakenteen ominaistajuudella tapahtuva resonoiva värähtely. (Holmes J. D., 2001, kappale 5.2)

Taustavärähtely vaikuttaa koko rakennukseen ja kaikkiin sen osiin ja se tapahtuu pääsääntöisesti tuulen matalilla taajuuksilla (Holmes J. D., 2001, s. 104). Kuvassa 2.4 on esitetty rakenteen vastetta taustavärähtelyyn, mistä selviää, että se on isoimmillaan pienillä taajuuksilla. Taajuuden kasvaessa sen osuus vähenee, mutta rakennuksien ominaistajuuksilla tapahtua resonanssi värähtelyn osuus kasvaa suuresti kahdessa kohdassa, joissa taajuus sattuu rakennuksen kahdelle ensimmäiselle ominaistajuudelle. Tiheyspektristä voidaan päätellä, että tuulen suuntaisen värähtelyn vaikutukset ovat suuremmat, mikäli rakennuksen ominaistajuus on alhainen. (Holmes J. D., 2001, kappale 5.2)



Kuva 2.4 Rakennuksen vasteen tiheyspektri, jossa X_B kuvastaa taustavärähtelyä ja varjostetut osat kuvastavat rakenteen ominaistajuuksella esiintyvää resonoivaa värähtelyä (Holmes J. D., 2001, s. 103)

2.4 Vääntöväärähtely

Vääntöväärähtelyä syntyy rakennukseen, mikäli sitä kuormittavan voiman resultantti on epäkeskeinen kiertymäkeskiön kanssa. Kiertymäkeskiön laskemisen perusteita rakennuksen yhdelle kerrokselle on esitetty kappaleessa 3.3. Tuuli kuorma mielletään Eurokoodissa staattiseksi painekuormaksi tuulensuuntaan ja tuulikuorma voidaan ajatella vaikuttavan jokaisen kerroksen massakeskipisteeseen. Mikäli rakennus on symmetrinen, myös jäykkyykeskiö on samassa kohdassa kuin massakeskiö. Näin ollen tuuli aiheuttaa ainoastaan tuulensuuntaisen voiman. Jos rakenne on kuitenkin hyvin epäsymmetrinen jäykistävien rakenneosien suhteen, jäykkyykeskiö on eri kohdassa kuin massakeskiö, jolloin tuulikuorma pyrkii aiheuttamaan vääntöä. Tuulikuorman dynaamisesta luonteesta johtuen myös vääntö on värähtelynomaista ja se voi voimistua vääntöä vastaavan ominaisuuden tapauksessa, jolloin värähtely tapahtuu resonanssitajuuksella.

Eurokoodissa ei ole esitetty tapoja mitoittaa vääntöväärähtelyä tai annettu rajoituksia sen arvoille. SFS-EN 1991-1-4, kohdassa 1.1(12) sanotaan, että vääntöväärähtelyn osalta alttiit rakenteet eivät sovellu Eurokooditarkasteluun. Eurokoodi kuitenkin velvoittaa ottamaan se huomioon, mikäli vääntöväärähtely on mitoittava tapaus.

Vääntöväärähtelyn kiihtyvyys ilmoitetaan usein deg/s^2 yksikössä, eli kulmamuutoksen kiihtyvyytenä. Arvo voidaan muuntaa vastaamaan m/s^2 yksikköä kertomalla kulmaa vastaavan kaaren pituus kiertymäkeskiön etäisyydellä kaavan (2.7) mukaisesti:

$$\sigma_{r,0} = 2 * \pi * \frac{\sigma_{r,deg}}{360^\circ} * r_r \quad (2.7)$$

missä	$\sigma_{r,0}$	on kiertymäkiihtyvyys [m/s^2]
	$\sigma_{r,deg}$	on kiertymäkiihtyvyys [deg/s^2]
	r_r	on tarkasteltavan pisteen etäisyys kiertymäkeskiöstä [m]

Standardin ISO 10137 mukaisia raja-arvoja kiertymän aiheuttamalle kiihtyvyydelle on esitetty kappaleessa 2.6.1.

2.5 Tuulen tilastollinen mallintaminen

Yleisesti hyväksytty oletamus on, että tietyn tuulennopeuden esiintymisen todennäköisyyttä voidaan luotettavasti kuvata Weibull-jakautuneella todennäköisyysjakaumalla. Jakaumasta selviää tietyn alueen tuulennopeuden arvot niiden esiintymistodennäköisyyden mukaan (WindPower program, 2018).

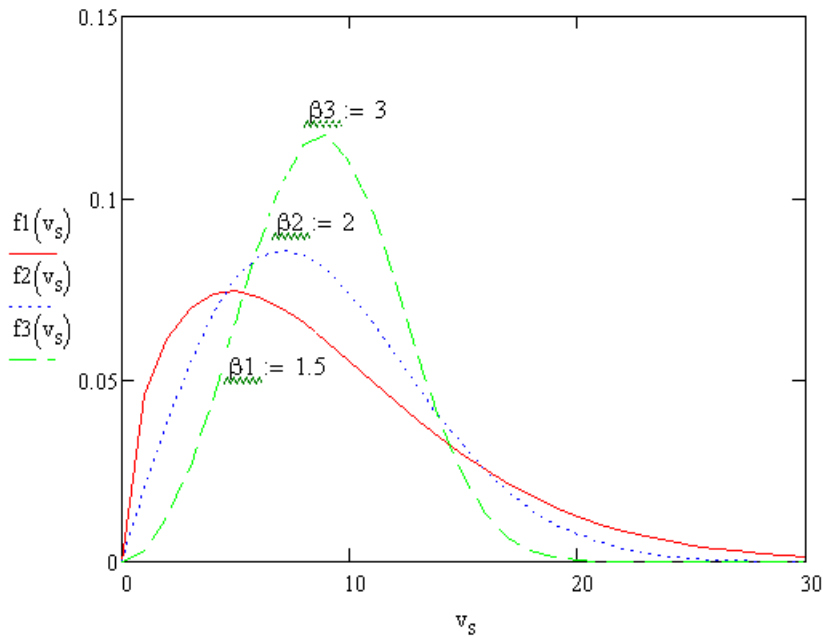
Kaavassa (2.8) on esitetty Weibull-jakauman yleinen esitysmuoto (Reliability Hot Wire, 2002, Issue 14):

$$f(T) = \frac{\beta}{\eta} * \left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} * e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.8)$$

missä	β	on Weibull-jakauman muotokerroin
	η	on Weibull-jakauman skaalaparametri
	γ	on paikkaparametri

Monessa tilanteessa paikkaparametriä ei käytetä, jolloin se saa arvon 0. Näin ollen Weibull-jakauma saa kaksiparametrisen esitysmuodon. Muotokerroin kuvastaa jakauman leveyttä, kun Weibull-jakaumaa käytetään tuulen mallintamiseen. Korkea muotokertoimen arvo tarkoittaa, että tuulet pysyvät kapealla välillä, kun taas alhainen arvo tarkoittaa, että tuulennopeus muuttuu suuremmalla vaihteluvälillä. Muotokertoimen tyypillinen arvo tuulelle vaihtelee 1,5 ja 2,5 välillä. Tähän on kiinnitettävä huomiota, jos tarkastelevalla kohteella on epätyypillinen ilmasto, jossa esimerkiksi tuulisuus on hyvin tasaista, jolloin muotokerroin voi saada arvoja esimerkiksi kolmen ja neljän väliltä (Homer Energy, 2018).

Kuvassa 2.5 on esitetty muotokertoimen vaikutusta Weibull-jakaumaan. Kuvaajasta voidaan lukea tietyn tuulennopeuden v_s todennäköisyys, ja se miten todennäköisyydet jakaantuvat tietylle nopeusvälille. Jakauman muodostaminen on tehty kaavan (2.8) mukaan ja paikkaparametrinä on käytetty arvoa nolla, skaalaparametrinä 10 ja muotokertoimelle on käytetty kolmea eri arvoa.



Kuva 2.5 Muotokertoimen vaikutus Weibull-jakaumaan. Mathcad -ohjelmalla tehty kuvaaja käyttäen kaavaa (2.8).

Muotokertoimen määrittäminen voidaan tehdä esimerkiksi kuvaajan sovitus algoritmia käyttäen, jolloin generoitu Weibull -jakauma sovitetaan mitattuihin tuulennopeuksien esiintyvyyksiin yhteensopivaksi muokaten k -arvoa. Vastaava toiminto löytyy esimerkiksi Excel -ohjelmasta (WindPower program,2018).

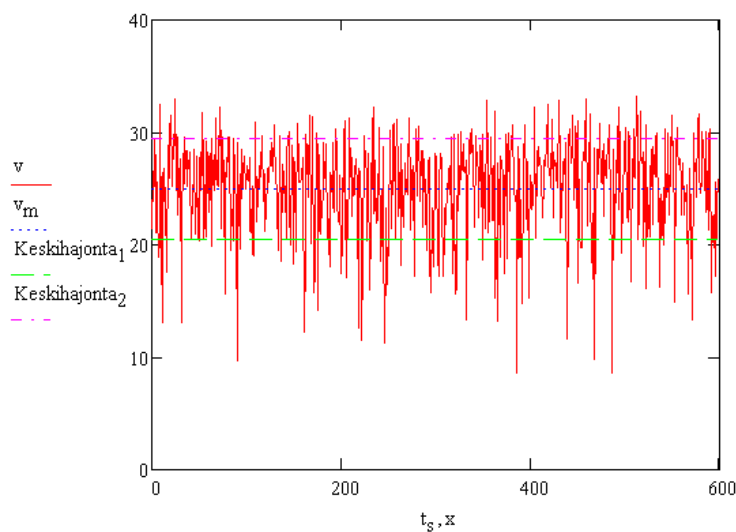
Tuulennopeus voidaan ajatella olevan kahden osatekijän summa. Tuulennopeus tietynä hetkenä on tuulen keskiarvo summattuna tuulen turbulentsilla komponentilla. Turbulentti komponentti joko pienentää tai suurentaa tuulennopeutta keskiarvoon verrattuna. Tämän vaihtelun keskihajonta voidaan laskea kaavalla (2.9) (SFS-EN 1991-1-4, kohta 4.4). Turbulenssin keskihajonta kuvastaa mitattujen arvojen keskimääräistä poikkeamaa keskiarvosta. Arvoa kutsutaan myös neliölliseksi keskiarvoksi (Root Mean Square).

$$\sigma_v = I_v * v_m \quad (2.9)$$

missä	σ_v	on tuulen turbulenttisuuden keskihajonta
	I_v	on turbulenssin intensiteetti
	v_m	on tuulen keskiarvo mitattuna 10 min aikavälillä [m/s]

Tuulen tilastollista käyttäytymistä voi olla mielekästä esittää tuulen aikahistoriana. Aikahistoria muodostetaan tuulennopeus mittarilla, kuten kuppianemometrillä tai akustisella tuulimittarilla. Tuloksena saadaan tuulennopeus tietyn aikavälin. Esimerkiksi akustisella mittarilla pystytään mittaamaan 1-20 Hz taajuudella tuulennopeuksia. Mittauksia suoritetaan esimerkiksi 10 minuutin ajan. Tuloksista muodostetaan kuvaa 2.6 vastaava kuvaaja, jossa esitetään yhdellä akselilla mittausaika ja toisella tuulennopeuden mitattu arvo ajan hetkellä. Tuloksista voidaan laskea esimerkiksi tuulen keskinopeus ja turbulenssin keskihajonta (Suomen tuuliatlas, 2018).

Tuulen aikahistoriaa voidaan esimerkiksi käyttää luomaan rakenteelle ajasta riippuva kuormitushistoria, jonka avulla lasketaan dynaamiset vasteet rakenteelle, kuten kappaleessa 5 tehdään. Kuten aikaisemmin on todettu, tuulennopeudet noudattavat tilastollisesti Weibull -jakaumaa. Weibull -jakaumaa apuna käyttäen voidaan muodostaa satunnaisesti generoitu tuulen aikahistoria, mikäli tuulen turbulenssi, muotokerroin ja tuulen keskinopeus ovat tiedossa. Satunnaisesti generoidun tuulen aikahistorian luonti on esitetty liitteessä 3, käyttäen ICON Suurpellon tuuliselvityksen lähtöarvoja (liite 4). Tulos on esitetty kuvassa 2.6.



Kuva 2.6 Satunnaisesti generoitu tuulen aikahistoria.

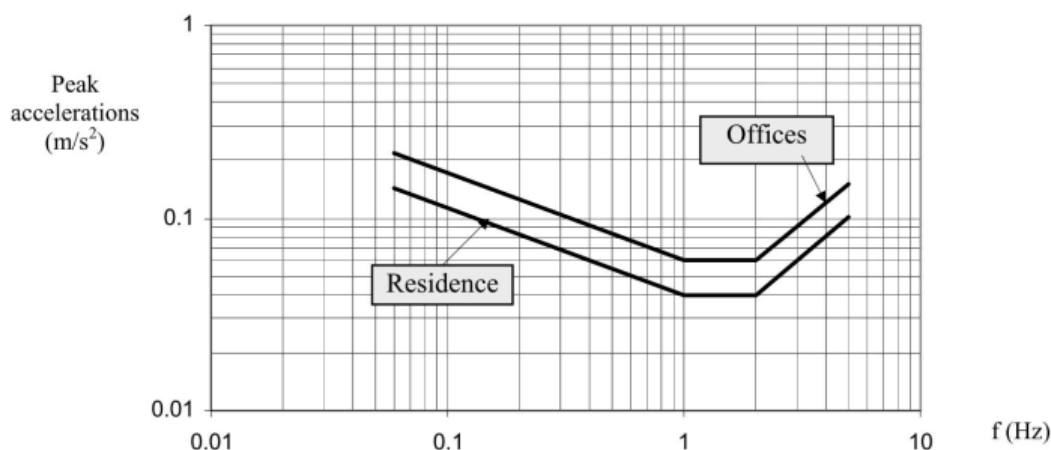
2.6 Värähtelymitoituksen raja-arvot

Tässä työssä keskitytään lähinnä käyttörajatilamitoitukseen, mikä on monesti määräävä mitoitustapaus värähtelyn yhteydessä. Rakennusta mitoittaessa on kuitenkin otettava huomioon murtorajatila, jolloin tarkistetaan esimerkiksi tuulen aiheuttama kokonaiskuormitus rungolle, sekä suurimmat paikalliset kuormat yksittäisille rakenneosille. Lisäksi tuulen dynaamisen luonteen vuoksi se voi aiheuttaa väsymismurtoa. Korkeat rakennukset ovat historiassa kestäneet hyvin koviakin myrskyjä sortumatta tuulen vuoksi, mutta myrskytuuli voi aiheuttaa vakavia vaurioita esimerkiksi ulkokuoreen suurien taipumien takia. Eurokoodissa värähtelystä todetaan, että käyttäjän mukavuus tulee ottaa huomioon, sekä rakenteen ja rakenneosien toimivuus on todettava (SFS-EN 1990, A1.4.4).

2.6.1 Kiihtyvyyssarvo

Käyttäjän mukavuuteen vaikuttaa kiihtyvyyssaistimus, kun rakennus huojuu tuulella. Tämän johdosta tulisi rajoittaa rakennuksen kiihtyvyyssarvoa, mutta Eurokoodi ei anna tälle suosituksia. Hyväksyttävien kiihtyvyyssarvojen suuruuden arvioinnista tekee myös vaikeaksi se, että kokemus häiritsevästä kiihtyvyydestä vaihtelee yksilöittäin. Kiihtyvyyssarvo yleisesti ilmoitetaan %-osuutena maan painovoimakiihtyvyydestä $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Reinforced Concrete Design of Tall Buildings -kirja (Taranath B. S., 2010, 335 s.) suosittelee asuinrakennuksille 10 vuoden mitoitustuulella 1-1,5% kiihtyvyyssarvoa. ISO standardissa (ISO 10137, 2007) on taas annettu suositteletut kiihtyvyyssarvot taajuudesta riippuvaisina huippuarvoina yhden vuoden mitoitustuulella kuvan 2.7 mukaisesti. Suunnittelussa tuleekin näin ollen tapauskohtaisesti määrittää, millaiset kiihtyvyyssarvot rakennukselle ovat hyväksyttäviä. Esimerkiksi kuvaa 2.7 lukemalla voidaan arvioida kiihtyvyyden raja-arvoksi $0,03 \text{ m/s}^2$, kun asuinrakennuksen ominaistajuus on 1 Hz. Tämä vastaa noin 0,3% maan painovoimakiihtyvyydestä.

ISO 1037 standardin kohdassa D.2.1 sanotaan, että kuvan 2.7 arvoja voidaan myös käyttää kiertymävärähtelyn raja-arvoina, kun kiertymävärähtelyn aiheuttama kiihtyvyys esitetään kaavassa (2.7) esitetystä muodosta.



Kuva 2.7 ISO standardissa 10137 mukaiset kiihtyvyyssarvojen suositusrajat (ISO 10137, 2007)

2.6.2 Taipuma

Tuulen kuormituksesta ja värähtelystä johtuva taipuma voi aiheuttaa halkeamia ja vaurioitumisia rakenteen väliseiniin, julkisivuun ja runkoon. Suuret taipumat voivat myös aiheuttaa julkisivun tiiveyden pettämistä, jolloin esimerkiksi sadevesi voi aiheuttaa kosteusvaurioita. Suuret taipumat myös lisäävät rakennuksen kuormien toisen kertaluvun vaikutuksia.

Taipumalla viitataan tässä työssä taustavärähtelyn ja dynaamisen resonanssivärähtelyn suurimpaan yhdistettyyn taipumaan. Eurokoodi ei anna tälle taipumalle rajoituksia, mutta esimerkiksi Reinforced Concrete Design of Tall Buildings -kirjassa (Taranath B. S., 2010, 891 s.) hyväksyttäviksi raja-arvoiksi annetaan $H/400 - H/600$, missä H on rakennuksen korkeus, sekä raja-arvo $h/400$, missä h on huonekorkeus, kun tarkastellaan kerroskohtaista taipumaa.

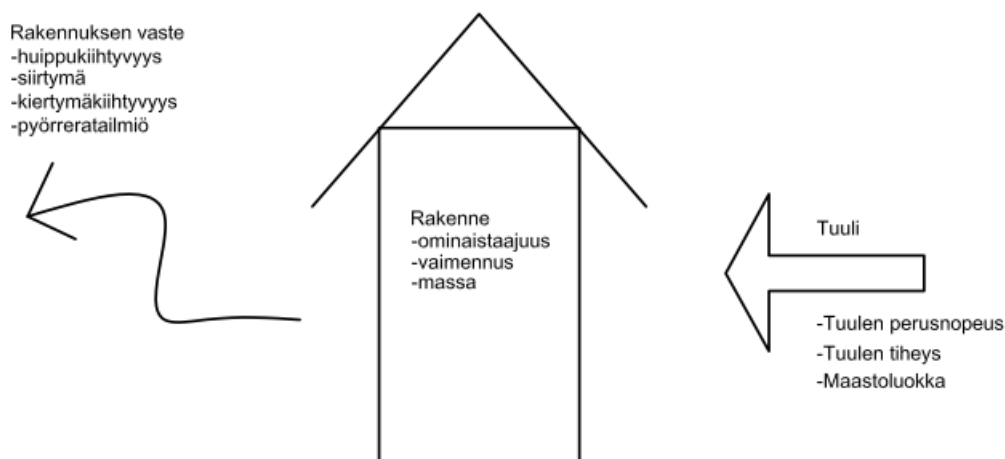
2.6.3 Tuulenopeus maan tasalla

Korkeat rakennukset ja rakennuksen erikoiset muodot voivat aiheuttaa tuulipyörteitä tai korkeita tuulen nopeuksia maan tasalla olevaan ilmakerrokseen, mistä voi johtua vaaraa tai haittaa jalankulkijoille. Myös ympäröivän luonnon tai rakennuksien vuoksi voi syntyä niin sanottuja tuulitunneleita, mitkä voimistavat tuulivirtausta. Tätä olisi syytä tutkia korkeiden rakennuksien osalta, varsinkin sisääntulo-ovien kohdalla.

Tapausta olisi erittäin haasteellista tutkia numeerisin keinoin, mutta haitallisia tilanteita voidaan tutkia tuulitunnelikokein tai virtuaalisella virtausmallinnuksella, joilla tutkitaan tuulen nopeuksia kiinnostavissa kohdissa ja mahdollisten pyörteiden syntymistä. Ilmatieteen laitos antaa arvioita tuulennopeuksista aiheutuvalle haitalle. Taulukoista voidaan vetää johtopäätös, että noin 10 m/s tuuli alkaa olemaan epämiellyttävää ja tuulen nopeus lähestyessä 20 m/s, alkaa se olemaan vaarallista (Ilmatieteenlaitos, 2019, Tuulen voimakkuus).

3 RAKENNUKSEN VÄRÄHTELYOMINAISUUDET

Vasteiden, eli värähtelyn aiheuttamien kiihtyvyyksien ja siirtymien syntymiseen vaikuttaa niin tuulikuormituksen ominaisuudet kuin rakennuksen ominaisuudet, kuten kuvassa 3.1 on esitetty. Tässä kappaleessa keskitytään selvittämään teoriaa rakennuksen ominaisuuksien vaikutuksesta vasteiden syntymiseen.



Kuva 3.1 Tuulen ja rakennuksen ominaisuuksien vaikutus vasteiden syntymiseen.

3.1 Ominaistaajuus

Ominaistaajuudella viitataan taajuuteen, jolla objekti mieluiten värähtelee. Ominaistaajuuteen keskeisesti liittyvä ilmiö on resonanssi, jolloin ominaistaajuusalueella vaikuttava voima saa objektin värähtelemään monikerroin voimakkaammin. Ominaistaajuus on esimerkiksi jokaiselle rakennukselle yksilöllinen arvo, millä taajuudella rakennus värähtelee ”helpoimmin”. Rakennuksilla on yhtä monta ominaistaajuutta ja ominaismuoto, kuin sillä on vapausasteita, mutta Eurokoodi ei anna tapoja mitoittaa kuin vain alin ominaistaajuus. Eurokoodissa rakennuksen alin ominaistaajuus voidaan laskea ulokkeelle, jonka päässä on yksi massa kaavalla (3.1) (SFS-EN 1991-1-4, F.2 kaava F.1):

$$n_1 = \frac{1}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{g}{x_1}} \quad (3.1)$$

missä n_1 on alin ominaistaajuus [Hz]

g	on maan vetovoiman kiihtyvyys = 9,81 m/s ²
x ₁	on suurin siirtymä, kun oma paino asetetaan vaikuttamaan värähtelyn suuntaan [m]

Vaihtoehtoisesti Eurokoodi antaa vielä yksinkertaistetumman kaavan (3.2) yli 50 metriä korkeiden rakennusten alimman ominaistajuuden laskemiselle (SFS-EN 1991-1-4, F.2 kaava F.2):

$$n_1 = \frac{46}{h} \quad (3.2)$$

missä	n ₁	on alin ominaistajuus [Hz]
	h	on rakennuksen korkeus

Yksinkertaistettu menetelmä perustuu 163 suorakaiteen muotoisen rakennuksen empiiriseen tutkimukseen vuodelta 1980. Molemmat menetelmät antavat vain suuntaa-antavan arvon alimmasta ominaistajuudesta, joita voidaan varauksellisesti käyttää kohteen alkuarviointiin. Esimerkiksi kaavan (3.2) virhemarginaali voi helposti olla ±50%, joten se ei monestikaan sovellu riittävän tarkkaan värähtelytarkasteluun. (Elementtisuunnittelu.fi, kantavien rakenteiden jäykistys)

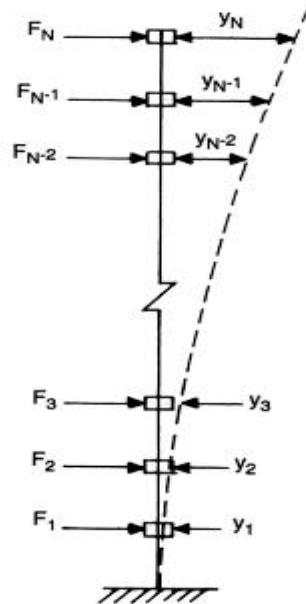
Hieman tarkempi käsin laskennallinen menetelmä annetaan esimerkiksi Mario Pazin kirjassa (Paz M., 1994, 35 s.), jossa otetaan huomioon kerroksittainen massa ja jäykkyys. Kirjan tapa (kaava 3.3) laskea ominaistajuus perustuu Rayleighin menetelmäksi kutsuttuun tapaan määrittää ulokepalkin ominaistajuus. Menetelmä itsessään perustuu energiansäilyvyys periaatteeseen. Kaavaa (3.3) on esitetty sievennetyssä muodossa kaavassa (3.4).

$$\omega = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n+1} F_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^{n+1} m_i y_i^2}} \quad (3.3)$$

$$n_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n+1} F_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^{n+1} m_i y_i^2}} \quad (3.4)$$

missä	n ₁	on alin ominaistajuus [Hz]
	F _i	on kerroksessa vaikuttava mielimääräinen voima
	m _i	on kerroksen massa

y_i on voiman F_i aiheuttama siirtymä



Kuva 3.2 Rayleighin menetelmän kuvaus (Paz M., 1994, s. 35, fig 3.4)

Varmimmaksi tavaksi määrittää rakennuksen ominaistaajuus on yleensä FEM-laskentaohjelmalla. FEM-mallin teko on työlästä, mutta se joudutaan yleensä tekemään joka tapauksessa riippuen rakennuskohteen monimutkaisuudesta. Ominaistaajuuden määrittämistä FEM-laskentaohjelmalla käsitellään luvussa 5. Vasteen laskennallinen mallintaminen.

Yksinkertaistetut menetelmät laskevat yleensä vain alimman ominaisuudon, mutta on kuitenkin muistettava, että rakennus värähtelee kaikilla sen ominaisuudoilla samanaikaisesti. Ominaisuutoja on yhtä monta kuin rakenteen vapausasteita, mutta yleensä ensimmäinen tapaus on määräävä siinä määrin, että pelkästään sen huomioiminen riittää tarpeeksi tarkkaan tarkasteluun. FEM-mallin ominaisuutoanalyysissä muotoja voidaan kuitenkin ottaa enemmän, ja näin lisätä laskennan tarkkuutta. Yleensä otetaan huomioon kolme alinta ominaisuutoa, jotka vastaavat rakennuksen liikettä jokaisessa pääsuunnassa (siirtymät XY-tasossa ja kiertymä Z-akselin ympäri.) Epäsymmetrisissä rakennuksissa, tai rakennuksissa joissa kuormat ovat epäsymmetrisiä, on tarpeen laskea kuusi alinta ominaisuutoa, koska osa ominaisuudoista voivat olla yhteneväisiä. Kuudella ominaisuudolla varmistetaan, että jokainen pääsuunta on huomioitu (Taranath B. S., 2010, s.336).

3.2 Rakennuksen vaimennus

Vaimennuksella tarkoitetaan rakennuksen kykyä absorboida värähtelyn liike-energiaa. Teoreettisesti tarkasteltuna rakennus, jolla ei olisi vaimennusta, olisi vapaa värähtelijä. Rakennuksen vaimennus voidaan jakaa kolmeen erinäiseen tekijään: sisäiseen vaimennukseen, aerodynaamiseen vaimennukseen ja ulkoisiin vaimennuksiin. Sisäiset vaimennukset käsittävät esimerkiksi rakenteiden sisäisen kitkan, eli viskositeetin vaikutukset, jotka vähentävät liike-energiaa, ja liitoksien välisen kitkan. Aerodynaaminen vaimennus johtuu rakennuksen liikkeestä tapahtuvasta ilmansyrjäyttämisestä, eli liikkeen ilmanvastuksesta, joka vähentää liike-energiaa (SFS-EN 1991-1-4, Liite F, kohta F.4).

Rakennuksen vaimennuksella on suuri vaikutus rakennuksen värähtelyn hallintaan, mutta sen arvoa on käytännössä vaikea muuttaa rakennemateriaalien ja liitosten valinnoilla, joten ainoaksi ratkaisuksi jää lisävaimentimin käyttö. Esimerkiksi rakennuksien yläpäähän voidaan asentaa massavaimennin, mikä muuttaa rakennuksien värähtelyominaisuuksia siten että ongelmallisilta ominaistajuusalueilta vältytään. Ulkoisia vaimennusjärjestelmiä on useanlaisia, mutta niihin ei tässä työssä perehdytä sen tarkemmin, sillä niiden käyttö tulee tarpeelliseksi yleensä vain superkorkeiden pilvenpiirtäjien osalta.

Eurokoodissa näiden eri vaimennuksien arvot ilmoitetaan yhdistetyllä vaimennuksen logaritmisella dekrementillä. Vaimennuksen logaritminen dekrementti δ taivutusvärähtelyn alimmassa ominaismuodossa voidaan määrittää Eurokoodin (SFS-EN 1991-1-4, F.5 kaava F.15) antamalla kaavalla (3.5):

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad (3.5)$$

missä	δ_s	on sisäisen vaimennuksen logaritminen dekrementti
	δ_a	on aerodynaamisen vaimennuksen logaritminen dekrementti alimmassa ominaismuodossa
	δ_d	on erityislaitteista aiheutuva vaimennuksen logaritminen dekrementti (δ_d on nolla, mikäli erityislaitteista aiheutuvaa vaimennusta ei ole.)

Vaimennuksen arvoja on erittäin vaikea määrittää numeerisesti ottamalla huomioon kaikki vaikuttavat tekijät, joten niiden laskenta perustuu voimakkaasti rakennettujen

rakennuksien kokeellisiin tutkimustuloksiin ja likimääräisiin menetelmiin. Eurokoodi antaa sisäiselle vaimennukselle δ_s arvoksi 0.10, kun tarkastellaan teräsbetonirakennuksia (SFS-EN 1991-1-4, F.5, taulukko F.2). Muissa lähteissä on käytetty esimerkiksi vaimennussuhteen arvona noin 2% betonirakennuksille (Taranath B. S., 2010, s.337), joka vastaa sisäisen vaimennuksen δ_s arvoa $0,126 (0,02*2\pi)$.

Aerodynaaminen vaimennus voidaan likimääräisesti laskea kaavalla (3.6), joka on esitetty Eurokoodissa (SFS-EN 1991-1-4, F.5, kaava F.18):

$$\delta_a = \frac{c_f * \rho * b * v_m(Z_s)}{2 * n_1 * m_e} \quad (3.6)$$

missä	c_f	on tuulen suuntaisen tuulikuorman voimakkeroin
	ρ	on ilman tiheys [kg/m^3]
	b	on rakennuksen leveys [m]
	$v_m(Z_s)$	on tuulenopeuden modifioitu perusarvo [m/s]
	n_1	on rakennuksen ominaistajuus [Hz]
	m_e	on rakennuksen massa korkeuden suhteen

Yleisesti ottaen rakennuksen vaimennussuhde tuulikuormitukselle on 1-2% välillä teräs- ja betoniteräsrakennuksille. Tämä arvo on huomattavasti pienempi, mitä käytetään rakennuksen vaimennukselle maanjäristystapauksissa, jolloin käytetään noin 5% vaimennussuhdetta. Tämä johtuu enimmäkseen siitä, että maanjäristystapauksessa ilmenee hyvin suurta betonin halkeilua ja teräksen toimimista plastisella alueella (Taranath B. S., 2010, s.345).

3.3 Rakennuksen massa ja jäykkyys

Rakennusten tuulesta ja pystykuormien vinoudesta aiheutuvat vaakakuormat jakaminen jäykistäville pystyrakenteille tapahtuu jäykkien vaakarakenteiden kautta. Esimerkiksi jäykkä paikallavalettu välipohjalaatta jakaa vaakakomponentit jäykistävien pystyrakenteiden kesken niiden jäykkyyksien suhteessa. Rakenteen jäykkyys koostuu sen ominaisuudesta vastustaa taivutuksen ja leikkauksen aiheuttamaa muodonmuutosta. Yleensä teräsbetonirakennuksen jäykistys tapahtuu jäykistävien seinien avulla.

Mikäli teräsbetoniseinän jännitykset ovat betonin vetolujuuden alapuolella, ajatellaan se halkeilemattomaksi. Muussa tapauksessa rakenteen jäykkyyttä täytyy redusoida. Eurokoodi (SFS-EN 1992-1-1 kaava 7.18) antaa tavan laskea redusoitu jäykkyys, kun rakenteen raudoitus tiedetään, mutta tapa on työläs ja soveltuu vasta rakennuksen mitoituksen loppuvaiheessa käytettäväksi, kun raudoitus on tiedossa. Alkuvaiheessa rakenteiden redusoitua jäykkyyttä voidaan arvioida seuraavin kertoimin (BES 2010, Korkeiden rakennusten jäykistys):

Laatat	0,35...0,5
pilarit	0,7
palkit	0,7

Rakenteen jäykkyyttä pienennetään kertomalla sen kimmomoduuli rakenneosan redusointikertoimella. Näitä redusoituja jäykkyyksiä on tarpeen käyttää ainoastaan niissä kerroksissa, jossa betonin vetolujuus ylitetään.

Jos rakennus on epäsymmetrinen jäykkyyden suhteen, aiheuttaa esimerkiksi tuulikuormitus vääntökuormitusta kiertymäkeskiön suhteen kuvan 3.3 mukaisesti. Yhden kerroksen kiertymäkeskiön sijainti voidaan laskea kaavan (3.7) mukaisesti x-suunnalle ja vastaavasti kaavan (3.8) mukaan y-suunnalle:

$$X = \frac{\sum(k_{yi} * x_i)}{\sum k_{yi}} \quad (3.7)$$

$$Y = \frac{\sum(k_{xi} * x_i)}{\sum k_{xi}} \quad (3.8)$$

missä X ja Y ovat kerroksen kiertymäkeskiön koordinaatit origon suhteen

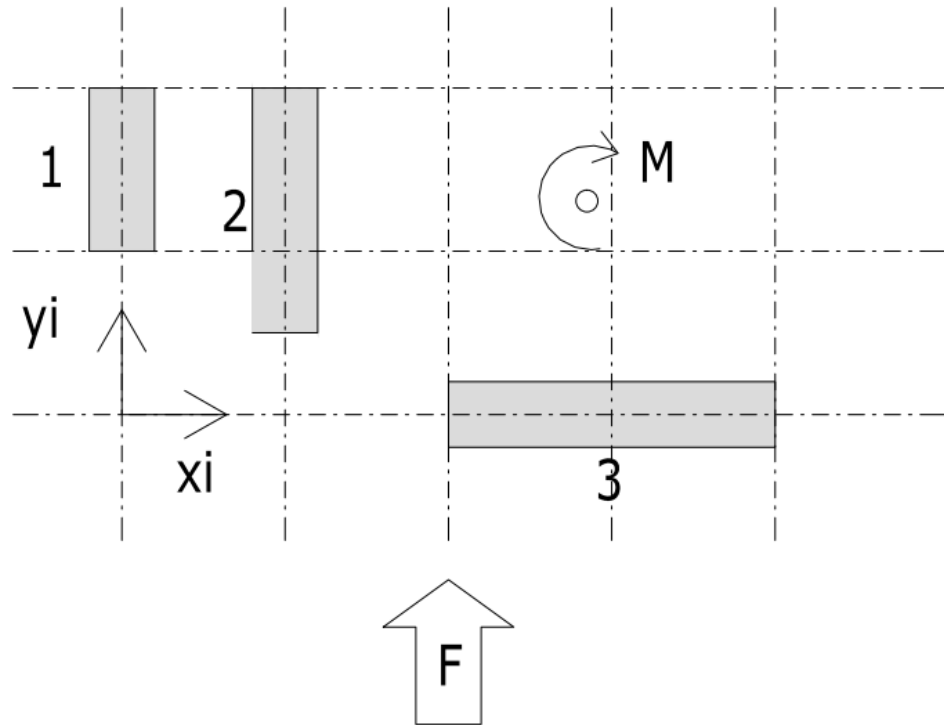
$k_{y,x}$ on yksittäisen rakenneosan suhteellinen jäykkyys

x_i on rakenneosan etäisyys origosta

Kiertymävärähtelyä tarkasteltaessa systeemin liikeyhtälössä massan tilalta tutkitaan kerroksen hitausmomenttia, jolla otetaan huomioon pystyrakenteiden massan epäsymmetrinen jakautuminen kerroksessa. Useista massoista koostuvan systeemin hitausmomentti voidaan laskea kaavalla (3.9):

$$J = \sum m_i r_i \quad (3.9)$$

missä m_i on rakenneosan massa [kg]
 r_i on rakenneosan etäisyys kiertymäkeskiöstä [m]



Kuva 3.3 Kiertymäkeskiön sijainti ja vääntömomentin laskennan periaate (periaatteellinen AutoCAD piirustus)

4 RAKENNUKSEN VÄRÄHTELYMITOITUS EUROKOODIN MUKAISESTI

Tässä kappaleessa käydään läpi Eurokoodin mitoitusmenetelmä värähtelyn amplitudille ja kiihtyvyyksisarvoille ja käydään läpi menetelmän rajoituksia ja soveltuvuutta. Liitteessä 1 ja 2 on esitetty värähtelymitoitus Eurokoodin mukaan.

4.1 Lähtötiedot

Eurokoodissa SFS-EN 1991-1-4 + kansalliset liitteet on esitetty tapoja korkeiden rakennusten tuulesta johtuvan värähtelyn mitoittamiseen, mutta Eurokoodeissa on useita rajoituksia ja karkeita yksinkertaistuksia, joiden takia se ei monesti sovellu riittävän tarkkaan tarkasteluun.

Eurokoodit rajoittavat tarkastelun 200 metriä korkeisiin rakennuksiin, vähimmäiskorkeuden ollessa 50 metriä, ja joiden massa ja jäykkyys ovat tasaisesti jakautuneita. Eurokoodin värähtelymitoitus rajoittuu myös vain alimman ominaisuuden tarkasteluun, minkä takia tulokset ovat hyvin virheellisiä, jos myös muut ominaisuudet vaikuttavat voimakkaasti värähtelyyn. Eurokoodi ei myöskään sovellu, mikäli vääntövärähtely on mitoittava tapaus, eikä se tarjoa tapoja sen mitoittamiseen (SFS-EN 1991-1-4, kappale 1.1).

4.2 Tuulen suuntainen värähtely

Tuulen suuntaisen kiihtyvyyden ominaisarvon keskihajonta $\sigma_{a,x}$ korkeudella z saadaan Eurokoodin (SFS-EN 1991-1-4, B.10) kaavasta (4.1):

$$\sigma_{a,x} = \frac{c_f * \rho * b * I_v(z_s) * v_m^2(z_s)}{m_{1,x}} * R * K_x * \phi_{1,x}(z_s) \quad (4.1)$$

missä	c_f	on voimakkeroin
	ρ	on ilman tiheys [kg/m ³]
	b	on rakenteen leveys [m]
	$I_v(z_s)$	on tuulenpuuskien intensiteetti korkeudella $z = z_s$

$v_m(z_s)$	on tuulennopeuden modifioitu perusarvo korkeudella $z = z_s$
z_s	on nopeuspainekorkeus
R	Resonanssivasteen vaikutusparametrin neliöjuuri
K_x	SFS-EN 1991-1-4, B11 tai B12 kohdan mukainen dimensioton parametri
$m_{1,x}$	on ekvivalentti massa tuulen suuntaisessa värähtelyssä alimmalla ominaistajuudella
$\phi_{1,x}(z_s)$	on alin tuulensuuntaisen värähtelyn ominaismuoto

Huippukiihtyvyyden ominaisarvo saadaan kertomalla kaavan (4.1) mukainen keskihajonta Eurokoodi SFS-EN 1991-1-4, B.2(3) mukaisella huippuarvokertoimella ja käyttämällä resonanssitaajuutena ominaistajuuden arvoa.

4.2.1 Kiihtyvyyden ominaisarvon laskennan parametrit

Nopeuspainekorkeus z_s määritetään Eurokoodin SFS-EN 1991-1-4 kuvan 6.1 mukaisesti. Kuvassa on esitetty muotoja, joille kaava on voimassa, muutoin käytetään arvoa $z_s = h$. Eurokoodi rajoittaa kaavan käyttöä myös siten, että vain alimman ominaismuodon mukainen tuulen suuntainen värähtely on merkittävää. Kuvan 4.1 esitettyä muotoa vastaavan rakennuksen nopeuspainekorkeus lasketaan kaavalla (4.2):

$$z_s = 0,6 * h \geq z_{min} \quad (4.2)$$

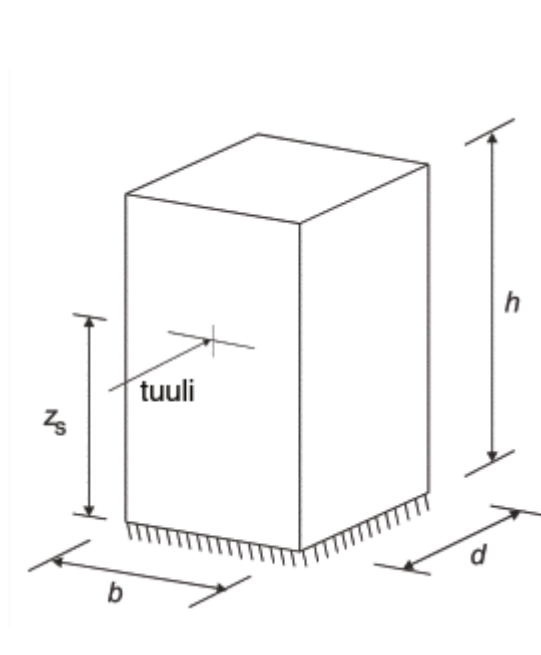
missä h on rakennuksen korkeus [m]

z_{min} on maastoluokasta riippuva minimi korkeus (kts. taulukko 4.1)

Taulukko 4.1. Maastoluokat ja maastoparametrit (SFS-EN 1991-1-4, taulukko 4.1).

Maastoluokka	z_o [m]	z_{min} [m]
0 Avomeri tai merelle avoin rannikko	0,003	1
I Järvet tai tasanko, jolla on enintään vähäistä kasvillisuutta eikä tuuliesteitä	0,01	1

II Alue, jolla on matalaa heinää tai siihen verrattavaa kasvillisuutta ja erillisiä esteitä (puita, rakennuksia), joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus	0,05	2
III Alueet, joilla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillisiä tuuliesteitä, joiden keskinäinen etäisyys on enintään 20 kertaa esteen korkeus (kuten kylät, esikaupunkialueet, pysyvät metsät)	0,3	5
IV Alueet, joiden pinta-alasta vähintään 15% on rakennusten peitossa ja niiden keskimääräinen korkeus ylittää 15m	1,0	10



Kuva 4.1 Nopeuspainekorkeus z_s (SFS-EN 1991-1-4, kuva 6.1)

Tuulenpuuskien intensiteetti $I_v(z)$ lasketaan kaavalla (4.3) (Eurokoodi SFS-EN 1991-1-4, kaavalla 4.7):

$$I_v(Z) = \frac{k_1}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right)} \quad (4.3)$$

- missä
- k_1 on pyörteisyyskerroin (suositus $k_1 = 1$)
 - z_0 on rosoisuusmitta, katso taulukko 4.1
 - z_s on nopeuspainekorkeus [m]
 - $c_0(z)$ on pinnanmuotokerroin (SFS-EN 1991-1-4, kohdan 4.3.3 mukaisesti)

Tuulenpuuskien intensiteetin laskentakaava on voimassa, mikäli korkeus on välillä $z_{\min} < z < z_{\max}$, jossa z_{\min} määräytyy taulukon 4.1 mukaisesti ja z_{\max} on 200 metriä.

Maakohtainen tuulennopeuden perusarvo on suomessa 21 m/s. Tätä arvoa pitää kertoa todennäköisyyskerroimella, mikäli halutaan tutkia muun kuin 50-vuoden toistumisvälin tuulikuormitusta. Tuulennopeuden modifioitu perusarvo yhtälö (4.4) riippuu tästä perusarvosta, kuten myös maaston rosoisuudesta ja pinnanmuodostuksesta (SFS-EN 1991-1-4, kaava 4.3):

$$v_m(z_s) = c_r(z_s) * c_0(z_s) * v_b \quad (4.4)$$

missä $c_r(z_s)$ on rosoisuuskerroin

$c_0(z_s)$ on pinnanmuotokerroin (SFS-EN 1991-1-4, kohdan 4.3.3 mukaisesti)

Kaavassa (4.4) käytetty rosoisuuskerroin määritellään SFS-EN 1991-1-4 kaavan 4.4 mukaisesti (esitetty kaavassa 4.5). Eurokoodin SFS-EN 1991 kansallinen liite toteaa, että tuulen nopeudet merialueilla tulevat aliarvoiduksi kaavaa (4.5) käyttäen, joten maastoluokassa 0 käytetään rosoisuuskertoimen k_r arvona 0,18.

$$c_r(z_s) = k_r * \ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right) \quad (4.5)$$

missä $k_r = 0,19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07}$

z_0 on rosoisuusmitta, kts taulukko 4.1

$z_{0,II}$ on rosoisuusmitta maastoluokassa II, kts taulukko 4.1

Tuulen suuntaisen kiihtyvyyden ominaisarvon laskennassa käytetty dimensioton kerroin K_x saadaan Eurokoodi SFS-EN 1991-1-4, B11 kaavasta, mutta kaavan oletusten mukaisesti, voidaan käyttää kertoimen laskennassa kaavaa SFS-EN 1991-1-4 (B12):

$$K_x = \frac{(2*\zeta+1)*\{(\zeta+1)*\left[\ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right)+0,5\right]-1\}}{(\zeta+1)^2*\ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right)} \quad (4.6)$$

missä ζ on ominaismuodon eksponentti (SFS-EN 1991-1-4, liite F)

- $\zeta = 0,6$ hoikille kehärakenteille, joilla ei ole kuormaa jakavia seiniä eikä verhousta
- $\zeta = 1,0$ rakennuksille, joiden jäykisteenä on joko keskusydin ja ulkokehän pilarit tai suurehkot pilarit ja leikkausjäykistees.

- $\zeta = 1,5$ hoikille mastojäykistetyille rakennuksille ja rakennuksille, joita jäykistävät keskellä olevat teräbetoniytimet
 - $\zeta = 2,0$ torneille ja savupiipuille
 - $\zeta = 2,5$ teräsristikkorakenteisille tornimaisille rakenteille
- (SFS-EN 1991-1-4, Liite F.3)

z_0 on rosoisuusmitta (taulukosta 4.1)

Kaavassa (4.1) esiintyvä resonanssivasteen vaikutusparametri ottaa huomioon tarkasteltavan värähtelymuodon kanssa resonanssissa esiintyvän turbulenssin. Parametrin arvo voidaan laskea SFS-EN 1991-1-4, kaavalla B.6:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 * \delta} * S_L(z_s, n_{1,x}) * R_h(\eta_h) * R_b(\eta_b) \quad (4.7)$$

missä

S_L on dimensioton tehosppektrin tiheysfunktio (SFS-EN 1991-1-4, B.1(2))

δ on kokonaisvaimennuksen logaritminen dekrementti (määritetään kappaleen 3.2 kaavojen mukaisesti)

Aerodynaamiset siirtokerroinfunctiot alimmalle ominaisuudolle voidaan määrittää likimääräisesti kaavoin 4.4 ja 4.5 (SFS-EN 1991-1-4, kaavat B.7 ja B.8):

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 * \eta_h^2} * (1 - e^{-2 * \eta_h}) \quad (4.8)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 * \eta_b^2} * (1 - e^{-2 * \eta_b}) \quad (4.9)$$

missä e on neperin luku ($e = 2,718$)

$$\eta_h = \frac{4,6 * h}{L(z_s)} * f_L(z_s, n_{1,x})$$

$$\eta_b = \frac{4,6 * b}{L(z_s)} * f_L(z_s, n_{1,x})$$

h on rakennuksen korkeus [m]

b on rakennuksen leveys [m]

$f_L(z_s, n_{1,x})$	on dimensiottoman taajuuden funktio
$L(z_s)$	on tuulenpuuskien ulottuvuus
$n_{1,x}$	on alin ominaistajuus [Hz]

Dimensiottoman taajuuden funktio määräytyy rakennuksen ominaistajuuden, tuulennopeuden modifioidun perusarvon ja tuulenpyörteen ulottuvuuden mukaan käyttäen kaavaa (4.10):

$$f_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{n * L(z)}{v_m(z)} \quad (4.10)$$

missä	n	on rakennuksen ominaistajuus [Hz] (katso kohta 3.1)
	$L(z)$	on tuulenpuuskien ulottuvuus
	$V_m(z_s)$	on tuulennopeuden modifioitu perusarvo

Tuulenpyörteen ulottuvuutta $L(z)$ kuvataan Eurokoodissa kaavalla SFS-EN 1991-1-4, kaava B.1. Se esittää luonnollisen tuulen keskimääräistä puuskan kokoa. Kaavaa käytettäessä korkeuden tulee olla alle 200 metriä.

$$L(z) = L_t * \left(\frac{z_s}{z_t}\right)^\alpha \quad (4.11)$$

missä	z_t	on rakennuksen vertailukorkeus $z_t = 200$ [m]
	L_t	on rakennuksen vertailuleveys $L_t = 300$ [m]
	α	$= 0,67 + 0,05 \ln(z_0)$
	z_0	on rosoisuusmitta

Dimensiottoman voiman spektrinen tiheysfunktio voidaan laskea SFS-EN 1991-1-4, kaava B.2 esitetyllä tavalla. Funktiossa esiintyvä dimensioton taajuuden funktio f_L lasketaan kaavalla (4.10) ja voiman spektrisen tiheysfunktion laskenta kaava on esitetty kaavassa (4.12).

$$S_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{6,8 * f_L(z_s, n_{1,x})}{(1 + 10,2 * f_L(z_s, n_{1,x}))^{\frac{5}{3}}} \quad (4.12)$$

Tuulensuuntaisen kiihtyvyyden ominaisarvon keskihajonnan kaavassa käytetty $\Phi_1(z_s)$ kuvastaa rakennuksen ensimmäistä ominaismuotoa. Eurokoodi kaavan, jolla voidaan karkeasti arvioida ominaismuotoa kohdassa SFS-EN 1991-1-4, kaava F.13:

$$\Phi_1(z_s) = \left(\frac{z}{h}\right)^\zeta \quad (4.13)$$

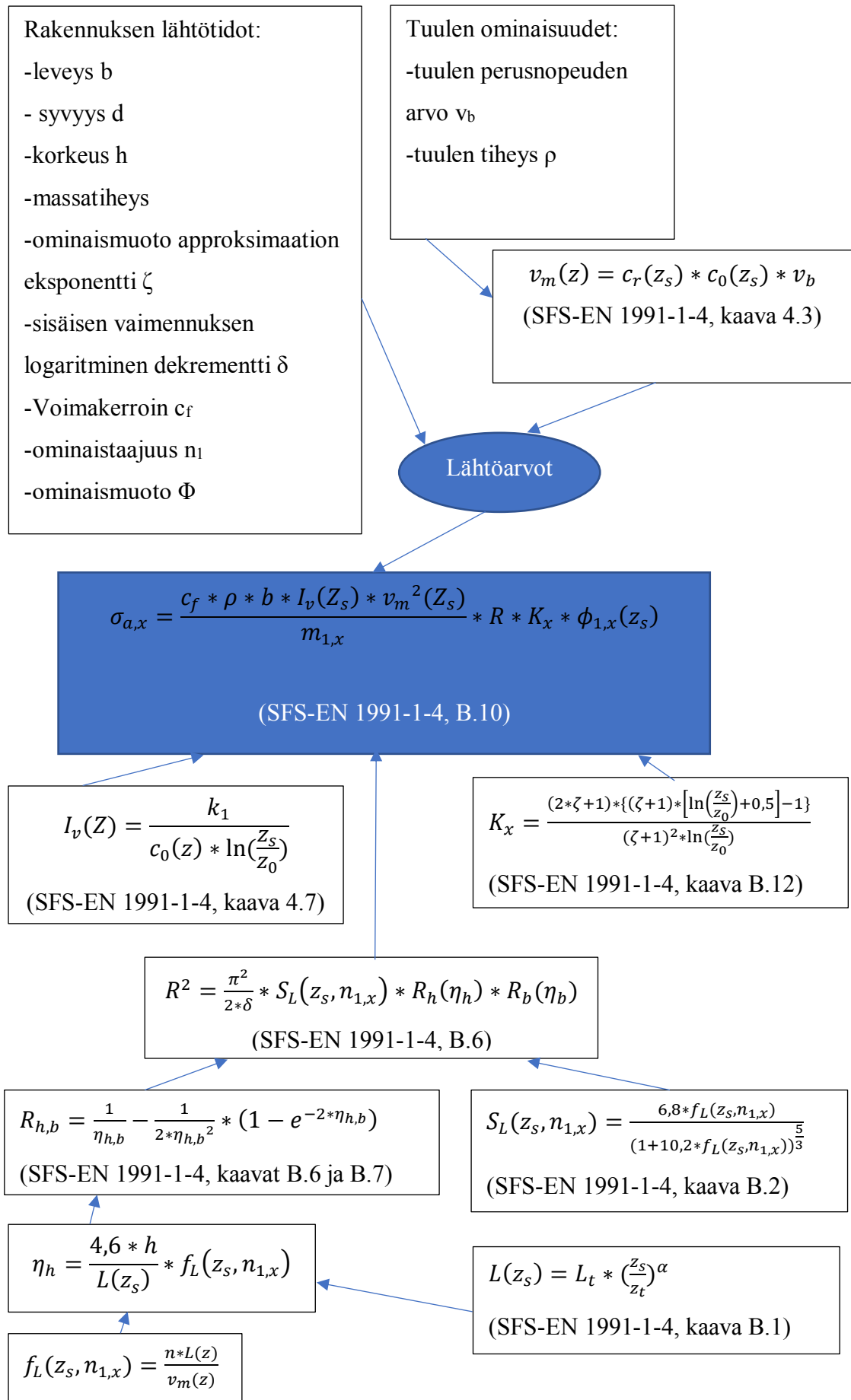
missä	z	on rakennuksen korkeus maanpinnasta [m]
	h	on rakennuksen korkeus [m]
	ζ	on ominaismuodon eksponentti (SFS-EN 1991-4, liite F) - $\zeta = 0,6$ hoikille kehärakenteille, joilla ei ole kuormaa jakavia seiniä eikä verhousta - $\zeta = 1,0$ rakennuksille, joiden jäykisteenä on joko keskusydin ja ulkokehän pilarit tai suurehkot pilarit ja leikkausjäykisteet. - $\zeta = 1,5$ hoikille mastojäykistetyille rakennuksille ja rakennuksille, joita jäykistävät keskellä olevat teräbetoniytimet - $\zeta = 2,0$ torneille ja savupiipuille - $\zeta = 2,5$ teräsristikkorakenteisille tornimaisille rakenteille (SFS-EN 1991-1-4, Liite F.3)

Ekvivalentti massa m_e alimman ominaismuodon pituusyksikkö kohti saadaan Eurokoodin mukaisesti kaavasta (4.14) (SFS-EN 1991-1-4, kaava F.14):

$$m_e = \frac{\int_0^l m_m(s) \cdot \Phi_1^2(s) ds}{\int_0^l \Phi_1^2(s) ds} \quad (4.14)$$

missä	m_m	$= m_d * b * d$
	m_d	on rakennuksen massatiheys [kg/m^3]
	b	on rakennuksen leveys [m]
	d	on rakennuksen syvyys [m]
	l	on rakenteen tai rakenneosan korkeus tai jännemitta [m]
	Φ_1	on rakennuksen alin ominaismuoto

4.2.2 Tuulen suuntaisen värähtelyn laskennan vuokaavio



4.3 Poikittaissuuntainen värähtely

Eurokoodi SFS-EN 1991-1-4 antaa pyörreratailmiön aiheuttamalle vaakasuuntaiselle värähtelylle kaksi mitoitustapaa kohdissa E.1.5.2 ja E.1.5.3. Eurokoodin SFS-EN 1991-1-4 kansallinen liite suosittaa tapaa E.1.5.3 aina kun se on sovellettavissa. Se ottaa huomioon ilmavirtauksen laminaarisuudesta aiheutuvan vahvistevaikutuksen, eli ilmiön, missä tuulennopeus vaihtelee ilman kerrostumisen seurauksena. Ilmiö on yleinen Suomessa suurimassa osaa maata (SFS-EN 1991-1-4, kansallinen liite).

Eurokoodin mukaan pyörreratailmiö tulee tarkistaa, jos rakennuksen lyhyin leveys on pienempi, kuin kuudesosa sen korkeudesta. Jos kaava (4.15) täyttää ehdot, pyörreratailmiön vaikutusta ei myöskään silloin tarvitse tutkia. (SFS-EN 1991-1-4, E.1, 196 s.)

$$v_{crit,i} > 1,25 * v_m \quad (4.15)$$

missä $v_{crit,i}$ on ominaismuotoa i vastaava kriittinen tuulennopeus [m/s]

v_m on tuulennopeuden modifioitu perusarvo poikkileikkauksessa, jonka kohdalla pyörteet irtoavat [m/s]

Kriittinen tuulennopeus on tuulennopeuden arvo, jolla pyörteiden irtoamisen taajuus on rakenteen ominaistajuuden suuruinen. Kriittinen tuulennopeus voidaan laskea kaavasta (4.16) (SFS-EN 1991-1-4, Liite E, kaava E.2):

$$v_{crit,i} = \frac{b * \eta_i}{St} \quad (4.16)$$

missä $v_{crit,i}$ on ominaismuotoa i vastaava kriittinen tuulennopeus [m/s]

b on poikkileikkauksen leveys kohdassa, jossa pyörteet irtoavat.

η on tarkasteltavan ominaismuodon vastaava ominaistajuus [Hz]

St on Strouhalin luku

SFS-EN1991-1-4, liite E:n kuvassa E.1 on esitetty Strouhalin luku suorakaiteen muotoiselle poikkileikkaukselle.

Maksimi siirtymän ominaisarvo kohdassa, jossa liike on suurinta, saadaan kaavasta (4.17) (SFS-EN1991-1-4, Liite E, kaava E.13):

$$y_{max} = \sigma_y * k_p \quad (4.17)$$

missä	y_{max}	on siirtymän keskihajonta
	k_p	on huippuarvokerroin

Siirtymän keskihajonta suhteessa leveyteen saadaan kaavasta (4.18) (SFS-EN1991-1-4, liite E, kaava E13), joka lasketaan suurimman taipuman kohdassa.

$$\frac{\sigma_y}{b} = \frac{1}{St^2} * \frac{C_c}{\sqrt{\frac{Sc}{4*\pi} - K_a * \left(1 - \left(\frac{\sigma_y}{b*a_L}\right)^2\right)}} * \sqrt{\frac{\rho*b^2}{m_e}} * \sqrt{\frac{b}{h}} \quad (4.18)$$

missä

C_c	on poikkileikkauksen muodosta riippuva aerodynaaminen vakio. Saadaan SFS-EN1991-1-4, liite E, taulukosta E.6
St	on Strouhalin luku
ρ	on ilmantiheys [kg/m^3]
m_e	on tehollinen massa pituusyksikkö kohti
h, b	ovat rakenteen korkeus ja leveys [m]
K_a	on vaimennuksen aerodynaaminen parametri (SFS-EN 1991-1-4, Liite E, taulukko E.6)
a_L	on normalisoitu raja-amplitudi (SFS-EN 1991-1-4, Liite E, taulukko E.6)

Scrutonin luku kuvastaa rakenteen värähtelyalttiutta, joka riippuu rakenteen massan suhteesta virtaavan aineen massaan ja rakennuksen sisäisestä vaimennuksesta. Scrutonin luku Sc voidaan laskea kaavalla (4.19) (SFS-EN 1991-1-4, liite E, kaava E.4):

$$Sc = \frac{2*\delta_s*m_e}{\rho*b^2} \quad (4.19)$$

missä	δ_s	on sisäisen vaimennuksen logaritminen dekrementti
	b	on poikkileikkauksen leveys kohdassa, jossa pyörteet irtoavat.
	ρ	on ilmantiheys [kg/m^3]
	m_e	on tehollinen massa pituusyksikkö kohti

Suurin siirtymä saadaan kertomalla kaavasta (4.18) laskettu siirtymän keskihajonta σ_y huippuarvokertoimella. Huippuarvokerroin lasketaan kaavalla (4.20) (SFS-EN 1991-1-4, kaava E.17):

$$k_p = \sqrt{2} * (1 + 1,2 * \arctan(0,75 * \left(\frac{Sc}{4 * \pi * K_a}\right)^4)) \quad (4.20)$$

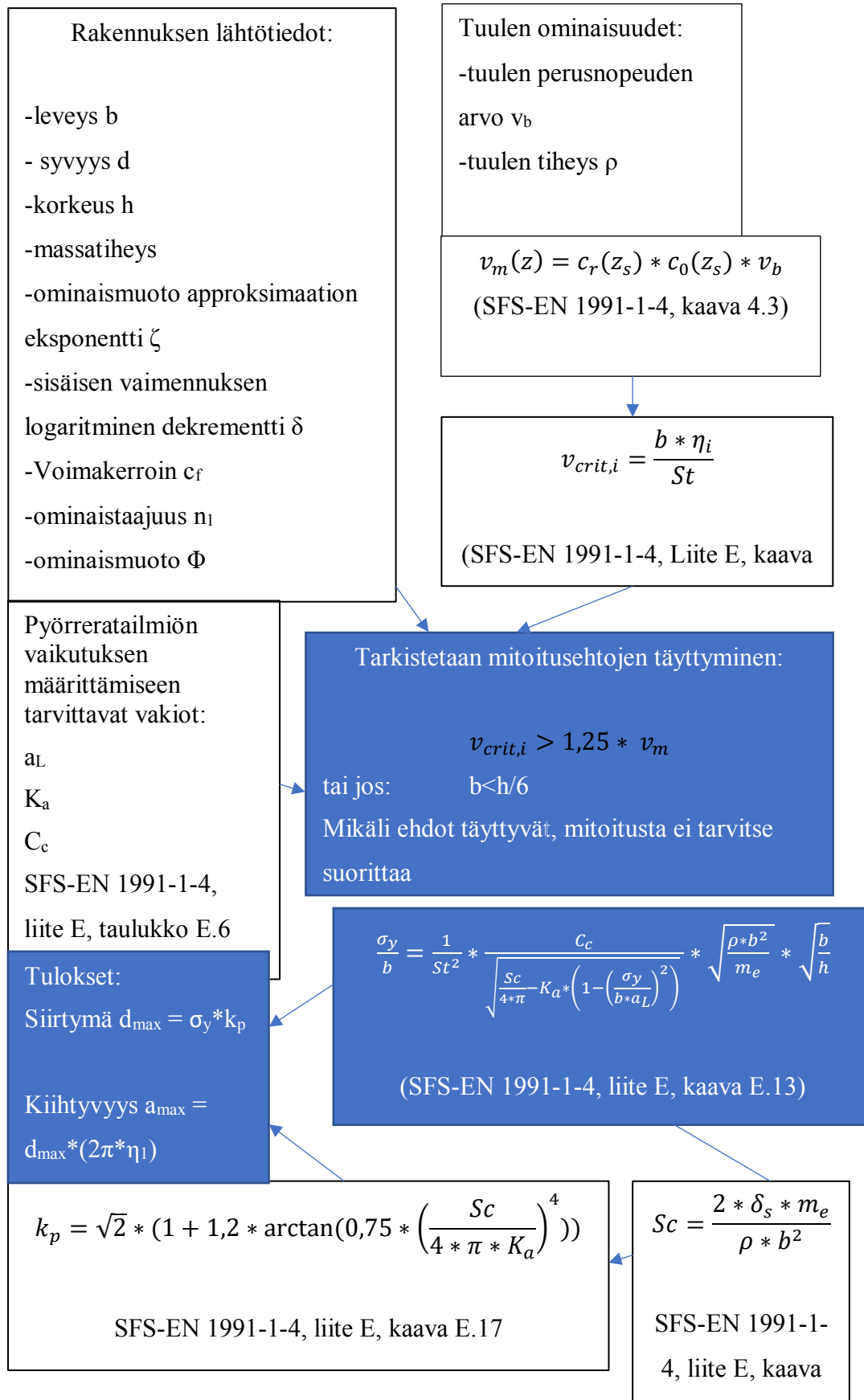
missä Sc on Scrutonin luku (kaava 4.19)

K_a on vaimennuksen aerodynaaminen parametri (SFS-EN 1991-1-4, Liite E, taulukko E.6)

Suurin kiihtyvyyden arvo saadaan suurimman siirtymän luvusta kertomalla se $2\pi * \eta$, missä η on rakenteen ominaismuotoa vastaava ominaistaajuus.

Menetelmä on siinä mielessä huono, koska SFS-EN 1991-1-4, Liite E, taulukossa E.6 annetut arvot normalisoidulle raja-amplitudille, vaimennuksen aerodynaamiselle parametrille ja aerodynaamiselle vakiolle soveltuvat vain ympyrä tai neliö poikkileikkaukselle. Muissa tilanteissa arvot olisi johdettava kokeellisesti tai analyttisiä menetelmiä käyttäen muille poikkileikkauksille. Liitteessä 2 on esitetty poikittaissuuntaisen värähtelyn laskenta Eurokoodin mukaisesti ja tuloksia on käsitelty tarkemmin kappaleessa 6.

4.3.1 Tuulen poikkisuuntaisen värähtelyn laskennan vuokaavio



4.4 Taipuman laskenta

Eurokoodi ei anna suoraan kaavaa tuulensuuntaisen värähtelyn aiheuttamalle suurimalle taipumalle. Se toteaa, että suurin tuulen suuntainen siirtymä määritetään SFS-EN 1991-1-4 kohdan 5.3 määritetyn ekvivalentin staattisen tuulikuorman perusteella.

Tuulikuorman ekvivalentti staattinen kuorma voidaan määrittää kaavalla (4.21) (SFS-EN 1991-1-4, kaava 5.3):

$$F_w = c_s c_d * c_f * q_p(z) * A_{ref} \quad (4.21)$$

missä	$c_s c_d$	on rakennekerroin
	c_f	on voimakerroin
	$q_p(z)$	on kappaleessa 2.1.2 määritetty puuskanopeuspaine [kN/m ²]
	A_{ref}	on rakenteen tuulenpaineen vaikutusala [m ²]

Hooken lain mukaan voima on verrannollinen muodonmuutokseen kaavan (4.22) mukaisesti:

$$F = -kx \quad (4.22)$$

missä	k	on jousivakio
	m	on rakenteen massa [kg]

Kulmataajuuden ja jousivakion riippuvuus voidaan johtaa dynamiikan peruslaista ja Hooken laista, jolloin yhtälöksi (4.23) saadaan:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.23)$$

missä	ω	on kulmataajuus ($\omega = 2 * \pi * f$) [Rad/s]
	m	on rakenteen massa [kg]

Tästä voidaan johtaa siirtymälle kaava, jonka arvo riippuu kuormittavasta voimasta, rakenteen ominaistajudesta ja massasta kaavan (4.24) mukaisesti. Kaavan mukainen taipuman laskenta esimerkkikohteen tapauksessa on esitetty liitteessä 1.

$$x_{def} = \frac{F}{m \cdot \omega^2} = \frac{F_w}{m_e \cdot h \cdot (2 \cdot \pi \cdot \eta)^2} \quad (4.24)$$

missä	x_{def}	on tuulikuorman aiheuttama siirtymä [m]
	F_w	on kaavan (4.21) mukainen ekvivalentti tuulikuorma [kN]
	m_e	on kaavan (4.14) mukainen ekvivalentti massa [kg]
	h	on rakennuksen korkeus [m]
	η	on rakennuksen ominaismuotoa vastaava ominaistajuus [Hz]

5 VASTEEN LASKENNALLINEN MALLINTAMINEN

5.1 CFD mallinnus

Laskennallisella virtausmallinnuksella, eli CFD -mallintamisella (Computational Fluid Dynamics), fluidien liikettä ja turbulenssin kehittymistä mallinnetaan numeerisesti matemaattisia malleja hyödyntämällä. Fluidin, eli tämän työn tapauksessa ilman, käyttäytymistä pyritään mallintamaan sen fysikaalisten ominaisuuksien kuten nopeuden, paineen, lämpötilan, tiheyden ja viskositeetin mukaisesti. Tavoitteena on luoda fyysistä ilmiötä vastaava matemaattinen malli ja sen ratkaisu. Mallinnuksessa siis selvitetään kaasujen tai nesteiden vuorovaikutus keskenään, sekä miten tutkittavan kohteen pinnat vaikuttavat virtaukseen. Pintojen vaikutus otetaan mallinnuksessa huomioon raja-arvojen avulla (Simscale, 2018, SimWiki CFD).

Virtuaalisen virtausmallinnuksen lähtökohtana on tyypillisesti Navierin ja Stokesin matemaattiset yhtälöt, jotka kuvaavat fluidien liikettä määritetyssä tilassa. Navier-Stokes -yhtälöt on johdettu kolmesta fysikaalisesta säilyvyyslaista: massan-, momentin- ja energiansäilyvyydestä. Navierin ja Stokesin yhtälöitä ei voida ratkaista analyyttisesti ilman karkeita yksinkertaistuksia, mutta likimääräinen ratkaisu sopivilla numeerisilla menetelmillä on mahdollista (Zuo W., 2018, kappale 2.2).

5.1.1 Turbulentti mallinnus

Navier-Stokes -yhtälöistä on johdettu useita erilaisia malleja tuulen turbulenssille. Kaikista tarkin tapa mallintaa turbulenssi on niin sanottu Direct Numerical Simulations (DNS), jossa Navier-Stokes -yhtälöt ratkaistaan täydellisinä ja ajasta riippuvina. Menetelmä on äärimmäisen raskas jo pienten mittakaavan ongelmien ratkomisessa. Todella pienen elementtiverkotuksen sekä todella pienen aikavälin yhdistäminen esimerkiksi rakennuksen mittakaavaa vastaavaan malliin tekee menetelmästä epäkäytännöllisen nykyisillä tietokoneiden laskentateholla (Moller-Hansen L. O., Bentsen N., 2015, s. 11).

Tuuli muodostuu keskimääräisestä tuulennopeudesta, sekä turbulenssin aiheuttamasta nopeudenmuutoksesta. Turbulenssit voidaan jaotella pieniin (DNS) ja suuriin (LES) pyörteisiin virtuaalisen tuulisimulaation tapauksessa. DNS metodi ottaa siis huomioon turbulenssin isot ja pienet pyörteet. Elementtiverkon on oltava tarpeeksi tiheä, jotta pienempien pyörteiden mallinnus onnistuisi. Laskentaa voidaan helpottaa ottamalla vain

huomioon isot pyörteet Large Eddy Simulations -menetelmällä (LES). LES-pyörteet sisältävät suurimman osan liike-energiasta tuulen virtauksessa, joten menetelmä antaa yleensä riittävän tarkan kuvauksen tuulen käyttäytymisessä rakennuksien tuulisimulaatiossa, mutta menetelmä on edelleen laskennallisesti raskas ja DNS-pyörteiden approksimaatio solidien rajapinnassa huonontaa tarkkuutta huomattavasti. Vaikka LES menetelmä on nykyisille työkoneille liian raskas, pilvilaskennan yleistyessä menetelmästä saattaa tulla arkipäiväisessä insinöörityössä hyvä työkalu (Moller-Hansen L. O., Bentsen N., 2015, s. 12-14).

RANS -menetelmässä (Reynolds Average Navier-Stokes) molempien LES- ja DNS-pyörteiden vaikutukset tuulennopeuteen on tasoitettu ajan suhteen, jolloin niiden vaikutukset on otettu huomioon tuulen keskinopeudessa. Tästä syystä RANS -menetelmä on ollut paljon käytössä, koska se on laskennallisesti erittäin tehokas suorittaa aikaisimpiin menetelmiin verrattuna. Menetelmä on hyvä, kun kiinnostuksen kohteena esimerkiksi rakenteeseen staattisesti kohdistuvat keskimääräiset tuulikuormitukset, mutta menetelmä soveltuu huonosti kuvaamaan tuulesta aiheutuvia dynaamisia ilmiöitä, kuten pyörerratailmiöitä. RANS-menetelmästä on monia variaatioita, kuten $k-\epsilon$ ja yleisesti käytetty $k-\omega$ menetelmä, mutta niiden hyötyihin ja rajoituksiin ei tässä työssä perehdytä tarkemmin.

5.2 Esimerkki kohteen FEM-mallinnus

FEM (Finite Element Method) -ohjelmistot toimivat pääpiirteittäin samalla periaatteella. Monimutkainen rakenne jaetaan rajalliseen määrään pienempiin osiin, jotka ratkaistaan numeerisia laskentametoodeja käyttäen. Näitä pieniä osia kutsutaan elementeiksi, jotka liittyvät toisiinsa solmupisteiden avulla muodostaen elementtiverkon. Solmupisteiden ominaisuuksia määrittämällä voidaan mallintaa tiettyä liitosta, kuten jäykkää tai nivelellistä liitosta. Kuormitukset välittyvät elementiltä toiselle solmupisteiden kautta, ja käyttäen venymien ja jännitysten perusyhtälöitä, voidaan laskea solmupistesiiirtymät koko rakenteessa.

5.2.1 Geometria

Suunniteltava rakenne on Espoossa sijaitse 21-kerroksinen teräsbetonirunkoinen kerrostalo. Rakennuksen kuormia siirtävinä osina toimivat teräsbetoniseinät ja teräsbetonilaatta, joka jakaa vaakakuormat seinien jäykkyyksien suhteessa.

Rakennuksen ulkoseinät ovat hyvin reikäisiä ikkunoiden suuren määrän vuoksi. FEM-mallissa ulkoseinät ovat mallinnettu seininä niiltä kohdin, missä ei ole ikkuna-aukkoja ja ulkoseinien yläpuolella kulkee ikkunapalkki, joka jakaa laatalta tulevia kuormia todellisemmin ulkoseinille ikkunaukkojen yli. Ulkoseinien reikäisyyden vuoksi niitä ei haluta määräävään osaan rakennemallia, joten niiden jäykkyys on laskettu 20 %:iin alkuperäisestä jäykkyydestä, jolloin ne lähinnä kantavat oman painonsa ja laatalta tulevaa kuormaa siinä osin, miltä se on välttämätöntä. Rakenteen kaikkien osien jäykkyyttä on vähennetty kappaleen 3.3 mukaisesti niiltä osin, missä betonin vetolujuus ylitetään. Tällä tavalla otetaan huomioon rakenteen jäykkyyden menetystä halkeamien vuoksi.

Rakennuksen tuet on mallinnettu nivelellisinä tukina, ja rakennuksen vaakavoimat tuodaan tuille jäykistävien seinien välityksellä ja välipohjalaatat jakavat kerroskohtaiset vaakakuormat seinille. Ikkuna-aukot on suljettu kahteen suuntaan kantavilla cladding -elementeillä, joiden tiheys on nolla.

5.2.2 Kuormat

Rakennus kuuluu vaativuusluokkaan CC3, jolloin kuormien kuormakertoimena K_{FI} käytetään arvoa 1,1 (RIL201-1-2011, taulukko 6.1S). Tämä asetus Robot Structural Analysis -ohjelmassa tehdään Tools välilehdeltä Tools -> job preferences -> Design codes -> Loads ja valitaan kuormayhdistelyihin standardi SFS-EN 1990/A1 CC3.

Rakenteen kuormituksen on määritelty seuraavasti RIL201-1-2011 mukaan (RIL201-1-2011, taulukko 6.1S).

Hyötykuormat, luokka A: välipohjat ja portaat 2,0 kN/m²

parvekkeet 2,5 kN/m²

Lumikuorman ominaisarvo maan pinnalla Espoossa on 2,75 kN/m². Katto on tasakatto, jolloin katon lumikuorma määritetään kaavalla (5.1) (RIL201-1-2011, kaava 5.1). Mahdollisia kinoskuormia ei olla otettu huomioon.

$$S = \mu_i * C_e * C_t * s_k \quad (5.1)$$

missä S on katon lumikuorma

S_k	on maassa olevan lumikuorman ominaisarvo
C_e	on tuulensuojakerroin
C_t	on lämpökerroin, jonka arvo tavallisesti on 1,0

RIL201-1-2011 taulukosta 5.1 saadaan μ_i arvoksi 0,8, jolloin lumikuorman arvoksi saadaan kaavan (5.2) mukaisesti:

$$S = 0,8 * 1 * 1 * 2,75 \frac{kN}{m^2} = 2,2 \frac{kN}{m^2} \quad (5.2)$$

5.2.3 Virtuaalinen tuulimallinnus

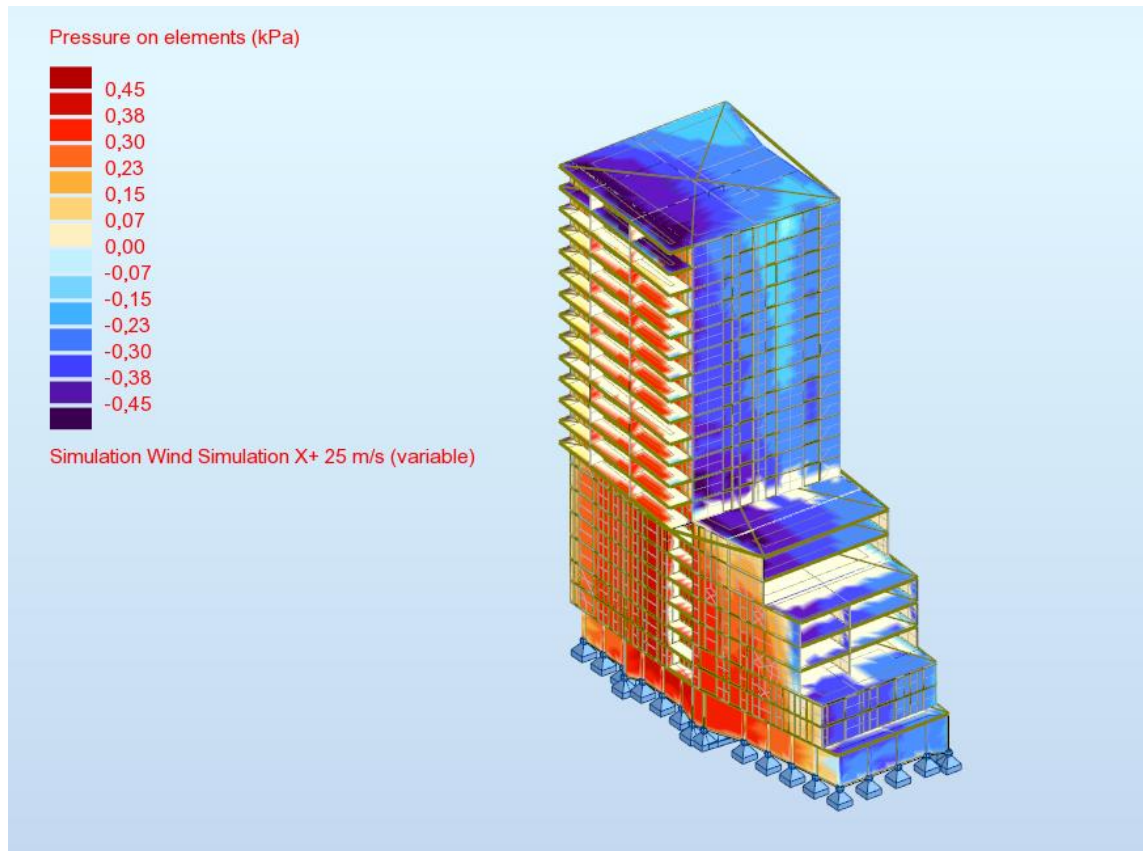
Joissakin FEM-ohjelmissa, kuten Autodeskin Robot Structural Analysis -ohjelmassa on mahdollista mallintaa tuulen käyttäytymistä virtuaalisen tuulitunnelin avulla.

Virtuaalisessa tuulitunneli testauksessa luodaan tunneli, jossa ilma pääsee virtaamaan ja jonka sisällä tarkasteltava kohde on. Robot Structural analysis -ohjelmassa tunneli muodostetaan automaattisesti, mutta joissakin ohjelmissa, kuten Autodeskin Flow Design -ohjelmalla käyttäjä voi määrittää tunnelin koon itse. Sillä on suuri vaikutus syntyviin virtauksiin ja tuloksien paikkansapitävyyteen. Flow Design -ohjelman käyttöohjeessa annetaan seuraavat arvot tunnelin koon määrittämiseen: tuulitunnelin korkeus on noin 2-3 kertaa rakenteen korkeus. Tuulitunnelin leveys on noin 2-3 kertaa rakennuksen leveys molemmille puolille. Tuulitunnelin pituus on 2 kertaa rakennuksen pituus eteen ja 4 kertaa rakennuksen pituus taakse. Näin tuulitunnelin reunat eivät estä esimerkiksi pyörteiden syntymistä (Autodesk, 2015, Flow design).

Robot Structural Analysis -ohjelman tuulisimulaatiossa määritetään ensin joko tuulennopeus tai -paine. Kohteen FEM-mallissa käytetään tuulennopeutta, joka on määritetty Espoon ICON Suurpellon tuulisuusselvityksessä (Liite 4). Tuuliselvityksessä on annettu tuulennopeuden arvot neljässä korkeuspisteessä ja 16 ilmansuunnassa. FEM-mallin nopeamman laskelman takia käytetään ensisijaisesti yhtä ilmansuuntaa, jossa tuulisuus on kovinta.

ICON Suurpellon tuuliselvityksessä on myös annettu tulokset joko 50-vuoden toistumisvälille tai 1-vuoden toistumisvälille. ISO 10137 standardin raja-arvot

kiihtyvyydelle tarkastellaan 1-vuoden toistumisvälille, mutta esimerkiksi (Taranath B. S., 2010, 335 s.) antaa raja-arvoja 10-vuoden toistumisvälille, joten on muistettava, että tulokset eivät ole vertailukelpoisia suoriltaan kaikissa lähteissä annetuille raja-arvoille.



Kuva 5.1 Virtuaalisen tuulitunnelin antamat painekuormat tarkemmalle FEM-mallille.

FEM-mallissa määritetään tuulensuunta neljän pääsuunnan suhteen ja tuulennopeus määritetään muuttuvana korkeuden suhteen, käyttäen ICON Suurpellon tuuliselvityksen (taulukko 5.1) arvoja, jotka vastaavat tuulennopeuksia 1-vuoden toistumisvälillä.

Taulukko 5.1 Tuulennopeus korkeuden suhteen (Liite 4)

H	Tuulennopeus m/s	Suhteellinen osuus
10 m	19 m/s	0,79
26 m	23 m/s	0,96

42 m	24 m/s	1
70 m	26 m/s	1.08

Robot Structural Analysis -ohjelman tuulitunneli teknologiasta on saatavilla hyvin vähän varmaa tietoa. Esimerkiksi turbulentin määrittämiseen käytettyä menetelmää ei ole selvennetty käyttöoppaassa ja ohjelmaan pystyy syöttämään vain muutaman lähtöarvon. Testaus yksinkertaiselle 5x5x20m kappaleelle paljastaa, että ohjelma ei näytä mallintavan tuulen turbulentsisuudesta johtuvaa tuulennopeuden vaihtelua ollenkaan. Tämän ja nopean laskenta-ajan takia voidaan olettaa, että käytetty metodi on jokin RANS-menetelmän variaatioista. Tuulisimulaation todennäköinen tarkoitus Robot Structural Analysis -ohjelmassa on antaa suunnittelijalle helppo tapa määrittää staattiset tuulikuormat, joten ei voida olettaa, että sitä pystyttäisiin käyttämään hyödyksi dynaamisten vasteiden määrittämisessä.

Yksinkertaisen testikappaleen yhteydessä huomattiin, että tuulennopeuden arvona on käytettävä puuskanopeuspainetta vastaavaa tuulennopeutta, jotta kuormitukset vastaavat Eurokoodimitoitusta. Tuulen puuskanopeuspaineessa on jo otettu huomioon turbulenssin vaikutus tuulennopeuteen. Tällä arvolla tulokset olivat 5x5x20 testikappaleessa hyvin lähellä Eurokoodilla laskettua vaakasuuntaista kokonaisvoiman arvoa, kun arvo laskettiin voimakkeroin menetelmällä. Tässä työssä käytetään kuitenkin Robot Structural Analysis -ohjelman tuulitunnelissa keskimääräistä tuulennopeutta v_m , koska turbulentsisuus otetaan huomioon aikahistoria-analyysissä käytetyssä Weibull-jakautuneen tuulennopeushistorian käyttäytymisfunktiossa.

5.2.4 Ominaismuotoanalyysi

Ominaismuotoanalyysissä selvitetään rakenteen ominaismuodot ja niitä vastaavat ominaistaajuudet. Ominaismuotoanalyysi pohjautuu seuraavaan dynaamisen analyysin peruskaavaan (5.3):

$$M * a(t) + C * v(t) + K * d(t) = F(t) \quad (5.3)$$

missä M on massamatriisi

K	on jäykkyysmatriisi
C	on vaimennusmatriisi
d	on siirtymävektori
v	on nopeusvektori
a	on kiihtyvyyssvektori
F	on voimavektori
t	on aika

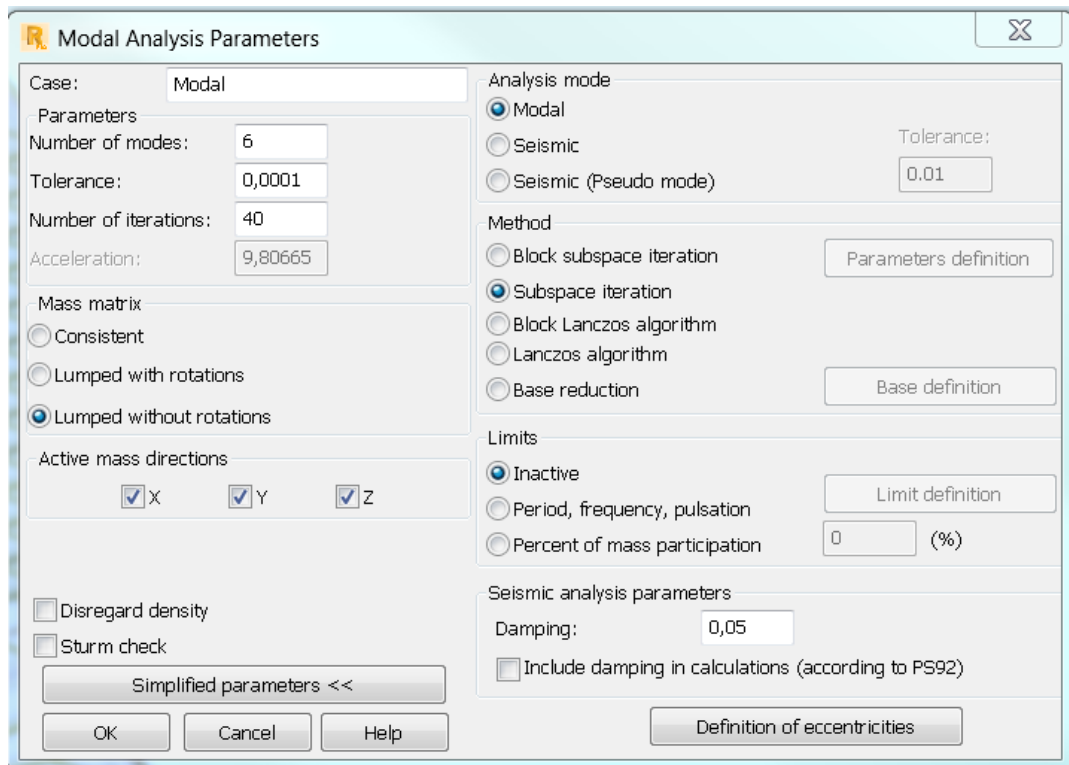
Robot Structural Analysis -ohjelmassa massamatriisi muodostuu rakenteen omapainosta, lisätyistä massoista ja kuorma-massamuunnoksesta. Näin ollen staattiset kuormat, kuten esimerkiksi pysyvät kuormat, hyötykuormat ja lumikuormat täytyy muuttaa kuormista massoiksi, jotta ne otetaan huomioon ominaismuotoanalyysissä. Ilman tätä vaihetta, tulokset voivat olla epävarmalla puolella, koska suurempi massa johtaa pienempään ominaistaajuuden arvoon. Robot Structural Analysis -ohjelmassa ominaismuotoanalyysiä tehdessä ei tarvitse muuttaa rakenteen omapainoa massaksi. Jos näin kuitenkin halutaan tehdä, täytyy ominaismuotoanalyysin määrittäessä merkata rakenteen tiheys huomiotta (Disregard density, kuva 6.2), jotta massa ei tule lasketuksi kahteen kertaan modal-analyysiä määrittäessä.

Kaava (5.3) voidaan esittää kaavan (5.4) muodossa, kun etsitään ominaistaajuuksia vastaavia ominaismuotoja.

$$M * a(t) + K * d(t) = 0 \quad (5.4)$$

missä	M	on massamatriisi
	K	on jäykkyysmatriisi

Kuten kaavasta (5.4) huomataan, ominaismuotoa määrittäessä ei oteta huomioon rakennuksen vaimennusta. Kuvassa 5.2 näkyvä seismic damping -arvo liittyy maanjäristysmitoitukseen. Tuulikuorman aiheuttaman värähtelyn vaimennus otetaan huomioon kappaleessa 5.2.5 esitetyllä tavalla Robot Structural Analysis -ohjelmassa.



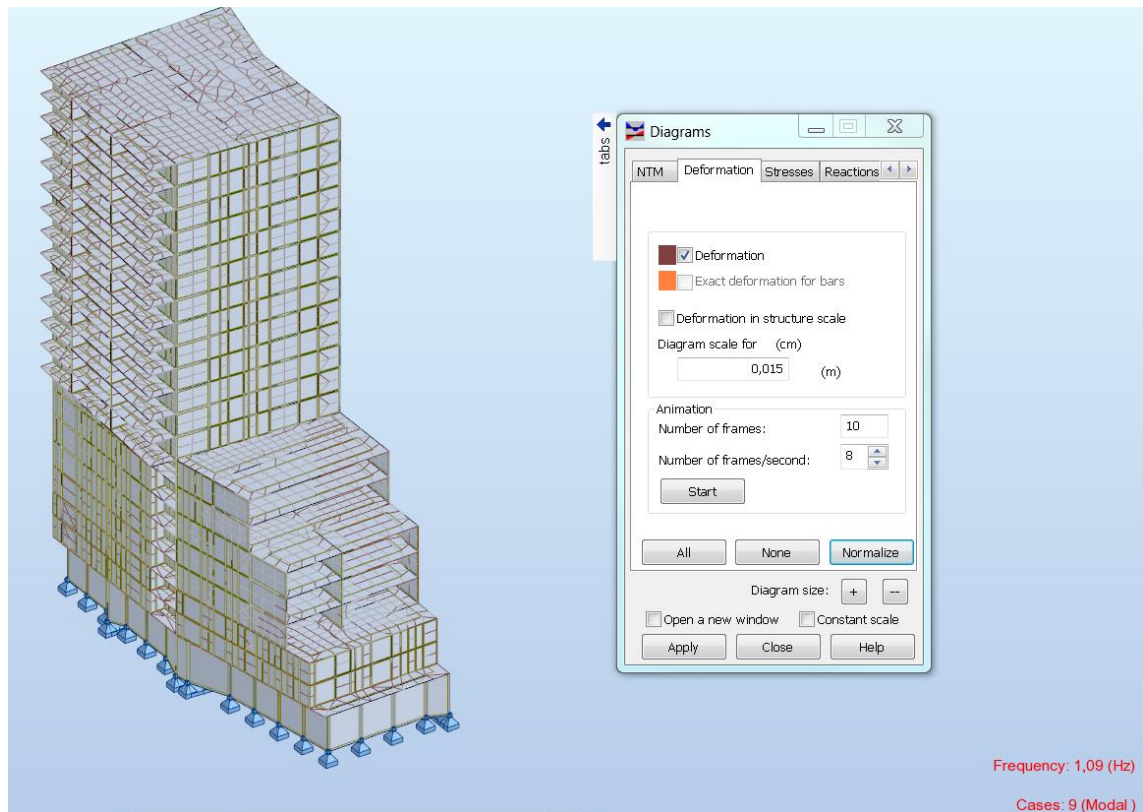
Kuva 5.2 Robot Structural Analysis -ohjelman ominaismuotojen määrittämisen parametrit.

Kappaleen 3.1 mukaisten perusteiden takia valitaan kuusi alinta ominaismuotoa laskentaan, kuten kuvassa 5.2 esitetään.

Massamatriisin Lumped with rotations ja lumped without rotations valinnat ovat diagonaalisia massamatriiseja ja vaativat vähemmän laskentatehoa. Yleisesti voidaan sanoa, että consistent -massamatriisi kuvastaa rakennetta totuudenmukaisemmin, mutta se on laskennaltaan raskas, varsinkin isoissa kohteissa. Normaalissa tilanteissa lumped -massamatriisit antavat hyviä approksimaatioita tuloksista, varsinkin kun tarkastellaan koko rakennuksen käyttäytymistä, eikä esimerkiksi yhden rakenneosan värähtelykäyttäytymistä (Autodesk knowledge network, 2016).

Method välilehdelle on valittu Subspace iteration –menetelmä. Se soveltuu kaikenlaisille massamatriiseille ja mallille, joissa on useita irtonaisia rakenteita. Menetelmä ei tosin sovellu suuren mittakaavan ongelmille, joissa tarvittavien ominaismuotojen määrä alkaa olemaan yli kymmenen. Menetelmä alkaa silloin olemaan liian raskas laskennallisesti. Tällaisissa tapauksissa voidaan käyttää esimerkiksi Lanczosin menetelmää, joka pystyy tehokkaasti selvittämään satoja ominaismuotoja. Rajoituksia Lanczosin menetelmälle

ovat se, että massamatriisin täytyy olla lumped with rotations -tyyppinen ja rakennemallissa ei saa olla erillisiä rakenteita. (Autodesk knowledge network, 2016).



Kuva 5.3 Robot Structural analysis, ominaismuotojen ja ominaistaajuuden laskenta

Laskennan jälkeen, kun avataan Diagrams for bars -välilehti, ja valitaan Deformations, Robot Structural Analysis -ohjelma näyttää ominaismuotoa vastaavan ominaistaajuuden oikeassa alakulmassa kuvan 5.3 mukaisesti. Kuvassa on valittuna ominaismuoto 1, jonka ominaistaajuus on 1,09 Hz. Tuloksia on esitetty tarkemmin kappaleessa kuusi.

5.2.5 Aikahistoria-analyysi

Robot Structural Analysis -ohjelmassa voidaan määrittää kuormien dynaamista käyttäytymistä monella eri tavalla, kuten aikahistoria-analyysillä (Time History Analysis) tai FRF (Frequency Response Functions). FRF-analyysissä tehdään FRF kuormitustapaus, jossa määritetty kuormitus vaikuttaa käyttäjän valitsemilla taajuusalueella. Taajuusalueeksi voidaan esimerkiksi valita alue, jonka sisällä on halutut ominaistaajuudet. Menetelmän heikkoutena on se, että käyttäjän on tiedettävä etukäteen, millä taajuuksilla kuormitus voi vaikuttaa ja kuormituksen dynaamisesti vaikuttava

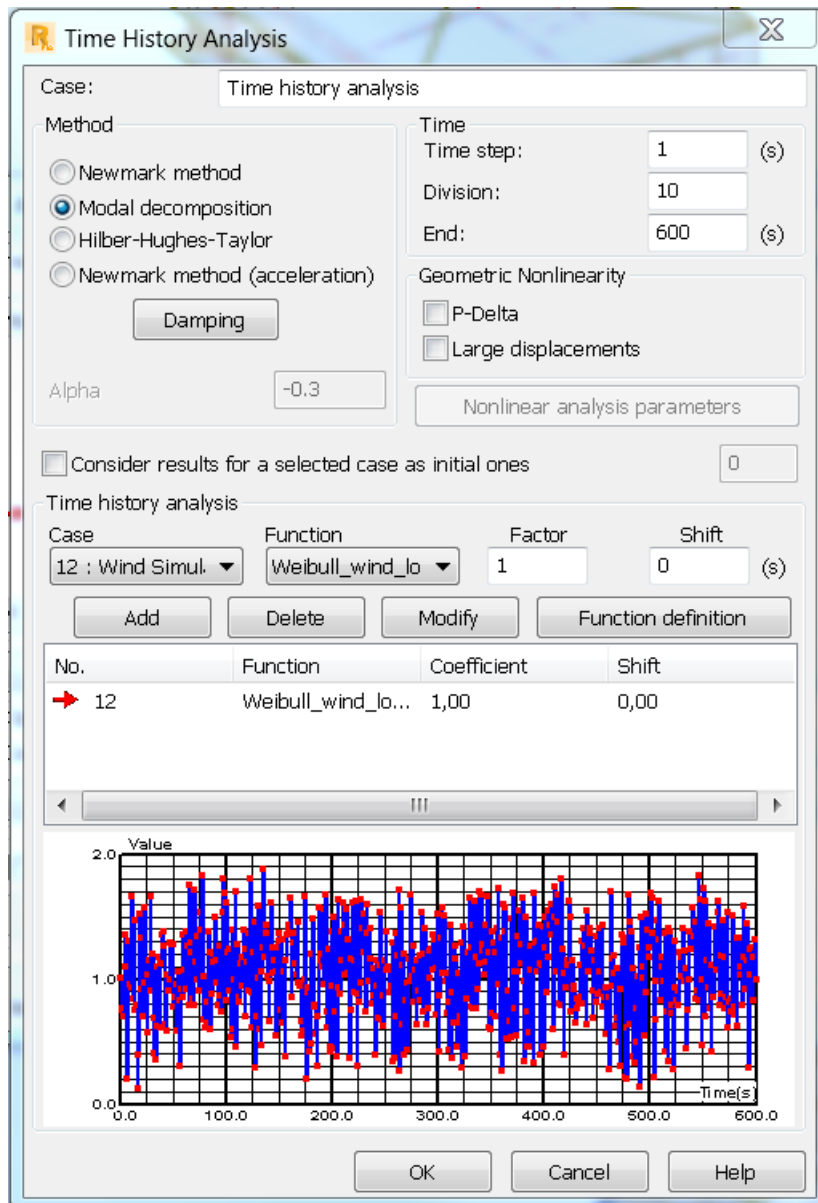
osuus. Tästä syystä menetelmä soveltuu huonosti esimerkiksi tuulen dynaamisten ominaisuuksien määrittämiseen, koska tuulen voimaspektri pienenee taajuuden kasvaessa ja koko tuulikuormaa ei voida laittaa vaikuttamaan dynaamisesti, koska pelkästään tuulen turbulentsisuus aiheuttaa dynaamista vastetta.

Tästä syystä tuulen aiheuttamien dynaamisten vasteiden määrittämiseen aikahistoria-analyysi soveltuu paremmin. Aikahistoria-analyysissä määritetään ajasta riippuva funktio, minkä mukaan tarkasteltavan kuormitustapauksen kuormitukset vaihtelevat määritetyllä aikavälillä. Näin ollen saadaan tuulen turbulentsisuudesta johtuva dynaaminen vaste selville rakennuksessa. On kuitenkin huomattava, että kyseissä menetelmässä ajatellaan turbulentsisuuden, eli tuulenopeuden vaihtelun vaikuttavan koko rakennukseen. Todellisuudessa turbulentsiset pyörteet ovat eri kokoisia ja vaikuttavat vain osaan rakennukseen, mikä otetaan Eurokoodi mitoituksessa esimerkiksi huomioon luonnollisen tuulen keskimääräisenä puuskan kokona $L(z)$.

Tehdäkseen aikahistoria-analyysin robot structural analysis -ohjelmassa, valitaan ensimmäiseksi Analysis -> Analysis type... ja Analysis type välilehdeltä valitaan Time History Analysis New -painikkeen alta.

Ensimmäiseksi valitaan käytettävä metodi aikahistoria-analyysin laskemiseksi. Modal decomposition metodi nimensä mukaisesti rakentaa aikahistoria-analyysin ominaismuotoanalyysin pohjalta (Modal Analysis). Tästä syystä menetelmä on varsin altis ominaismuotojen määrän suhteen. Mikäli ominaismuotoanalyysi ei esimerkiksi liian vähäisten ominaismuotoratkaisuiden vuoksi vastaa hyvin todellista rakennetta, myös aikahistoria-analyysi tulee olemaan virheellinen. Parempi menetelmä tällaisessa tilanteessa on Newmarkin menetelmä, joka pystyy ratkaisemaan yhtälöt ominaismuotojen lukumäärästä huolimatta. Menetelmä on kuitenkin varsin raskas verrattuna Modal Decomposition -menetelmään verrattuna ja Newmarkin menetelmä on puolestaan varsin herkkä aikaintegraalin arvoihin. (Time step/Division) (Autodesk Forum, 2014, Time History Analysis). Tästä syystä käytetään Modal Decomposition menetelmää, vaikka kohteessa on vain laskettuna kuusi alinta ominaismuotoa, koska yleisesti olettaen korkeat rakennukset eivät tarvitse kovin montaa ominaismuotoa kuvaamaan sen ominaisuuksia värähtelyssä todenmukaisesti. Kaksi alinta menetelmää kuvassa 5.4 ottavat huomioon pakotetut siirtymät, nopeudet tai kiihtyvyydet tuilla, mikäli sellaisia halutaan ottaa

mukaan aikahistoria-analyysiin (Kosakowski A., Gaweda R., 2016, Time history analysis).



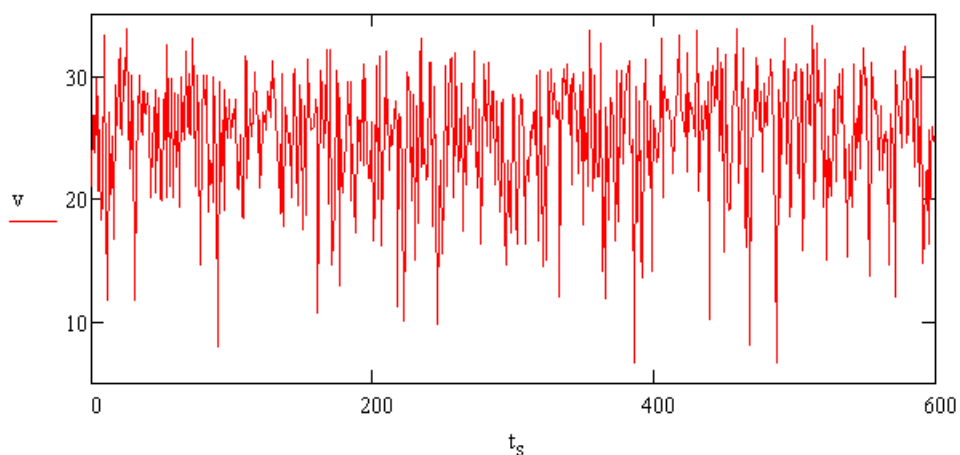
kuva 5.4 Robot Structural Analysis, Time History Analysis.

Damping -painikkeen alta voidaan määrittää tuulikuormituksessa käytetty vaimennus. Modal Decomposition menetelmässä voidaan antaa vaimennusarvo jokaiselle ominaisuudolle erikseen. Mikäli ominaisuudolle ei määritetä vaimennusta, ohjelma käyttää edellisen ominaisuudon vaimennusta tai interpoloi arvon lineaarisesti viereisistä arvoista.

Seuraavaksi valitaan aikaintegroinnin arvot. Aikaväli (time step) kuvastaa aikaväliä, jolla ohjelma laskee ratkaisut. Arvon on oltava tarpeeksi pieni suhteessa kuormien muutoksien taajuuteen, jotta se pystyy tarvittavan tarkasti laskemaan tulokset. Arvona käytetään esimerkkikohteessa 0,15 sekuntia, mikä vastaa noin 1/10 ominaistajuuden värähtelyn jaksoajasta. Loppuajaksi (End) valitaan 600 sekuntia joka vastaa 10 minuuttia, eli aikajaksoa, jolla tuulennopeuden perusarvo määritetään. Jako (Division) ei ole erityisen tärkeä Modal Decomposition analyysissä, koska aikaväli integraatio on sisälletty ominaismuotoanalyysiin. Näin ei ole, jos käytetään esimerkiksi Newmarkin menetelmää, jolloin jako (Division) vaikuttaa suoraan tulosten tarkkuuteen (Kosakowski A., Gaweda R., 2016, Time history Analysis).

Seuraavaksi määritetään haluttu kuormatapaus, jota tarkastellaan. Esimerkki rakenteessa valitaan kuormitustapaukseksi Wind Simulation load X+, eli virtuaalisella tuulitunneli menetelmällä lasketut tuulen painekuormat X-suuntaan. Aikahistoria-analyysin käyttäytymisfunktio toimii kertoimena valitun kuormitustapaoksen kuormille.

Jotta saadaan kuormien kertoimet ajan suhteen, on luotava tuulesta Weibull -jakautunut nopeushistoria. Weibull -jakautunutta nopeushistorian teoriaa on käsitelty kappaleessa 2.5 tarkemmin ja tässä työssä käytettyä nopeushistorian (kuva 5.5) luonti on esitetty liitteessä 3, jonka lähtöarvot on saatu ICON tuuliselvitys raportista.



Kuva 5.5 ICON tuuliselvityksen pohjalta luotu Weibull -jakautunut tuulen nopeushistoria 10 minuutin ajalta.

Tuulen nopeushistoria esittää tuulen nopeusarvot (m/s) ajan suhteen. Tuulennopeuden keskiarvo on 24 m/s korkeudella 42 metriä, joka on määritetty tuuliselvityksen perusteella, kun käytetään 1-vuoden toistumisväliä ja 10 minuutin mittausaikaa. Tuulennopeus voidaan muuntaa tuulenpaineeksi Bernoullin yhtälöllä, koska kyseiset arvot sisältävät jo turbulentsisuuden ja maan rosoisuuden vaikutukset. Bernoullin yhtälö on esitetty kaavassa (5.5):

$$P = \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad (5.5)$$

missä P on tuulen aiheuttama paine [N/m²]

ρ on tuulentiheys [kg/m³]

v on tuulennopeus [m/s]

Tuulen nopeushistoriassa on esitetty tuulen nopeudet tietyllä ajan hetkellä, kun taas tuulitunnelisimulaatiossa käytettiin 24 m/s staattista arvoa kuormien luontiin. Nopeushistoria voidaan muuntaa kuvaamaan kuormien kerrointa muuntamalla nopeus paineeksi Bernoullin yhtälöllä ja jakamalla saatu arvo 24 m/s vastaavalla paineen arvolla. Esimerkki muunnoksesta on esitetty taulukossa 5.2, jossa on muutettu viiden sekunnin kohdalla saatu tuulennopeuden arvo painekuormien kertoimeksi.

Taulukko 5.2 Nopeusarvon muunnos painekuorman kertoimeksi. Ilmantiheytenä käytetty arvoa 1,3 kg/m³

Tuulennopeus [m/s]	Tuulenpaine [kN/m ²]	24 m/s vastaava tuulenpaine	Kuormakerroin
29,134	$\frac{1}{2} * 1,3 * \frac{29,134^2}{1000} =$ 0,552 kN/m ²	$\frac{1}{2} * 1,3 * \frac{24^2}{1000} =$ 0,374 kN/m ²	$\frac{0,552}{0,374} = 1,476$

Taulukon 5.2 vastaava toimenpide tehdään jokaiselle nopeusarvolle tuulen nopeushistoriassa. Apuna voidaan käyttää esimerkiksi Excel -ohjelmaa, jolla toimenpide

voidaan hoitaa tehokkaasti suurelle määrälle mittauspisteitä. Huomautuksena voidaan sanoa, että Robot Structural Analysis ottaa vastaan esimerkiksi txt. tiedoston, jossa ensimmäisellä sarakkeella on aika-arvot ja toisella sarakkeella aikaa vastaava tuulennopeus. Robot Structural Analysis -ohjelma merkitsee lukujen desimaalit käyttäen pistettä. Myös tulokset on syötettävä tässä muodossa. Laskelmat Excel ohjelmassa täytyy kuitenkin tehdä eurooppalaista standardia käyttäen, eli erottaa desimaaliluvut pilkuin. Muunnos onnistuu yksinkertaisesti Excelissä käyttäen SUBSTITUTE -funktiota, jolla voidaan pilkku kyseissä sarakkeessa korvata pisteellä, ja toisin päin.

Robot Structural Analysis -ohjelma piirtää aikafunktion näkyville, kuten kuvassa 5.4 nähdään. X-akselilla on tarkasteltava aikaväli, eli 10 minuuttia ja Y-akselilla on tuulen nopeushistorian pohjalta laadittu tuulipainekuormien kuormakerroin. Tämä funktio nyt muokkaa määritetyn kuormitustapauksen kuormia ajan suhteen ja ohjelma laskee rakennuksen vasteet kuormituksessa. Esimerkkitapauksessa kuormituksena on virtuaalisen tuulitunnelin avulla luodut painekuormat rakennukselle, jossa 42 metrin korkeudessa tuulennopeuden keskiarvo on 24 m/s ja tuulennopeus muuttuu taulukon 5.1 mukaisesti korkeuden suhteessa. Tässä kuormitustapauksessa ei siis ole mallinnettu turbulentsisuuden vaikutusta rakenteeseen, vaan keskinopeutta vastaava paineen jakautuminen rakennukselle. Kuorman käyttäytymisfunktio kertoo kuorman suuruutta, mikä vastaa tuulen turbulentsisuuden osuutta.

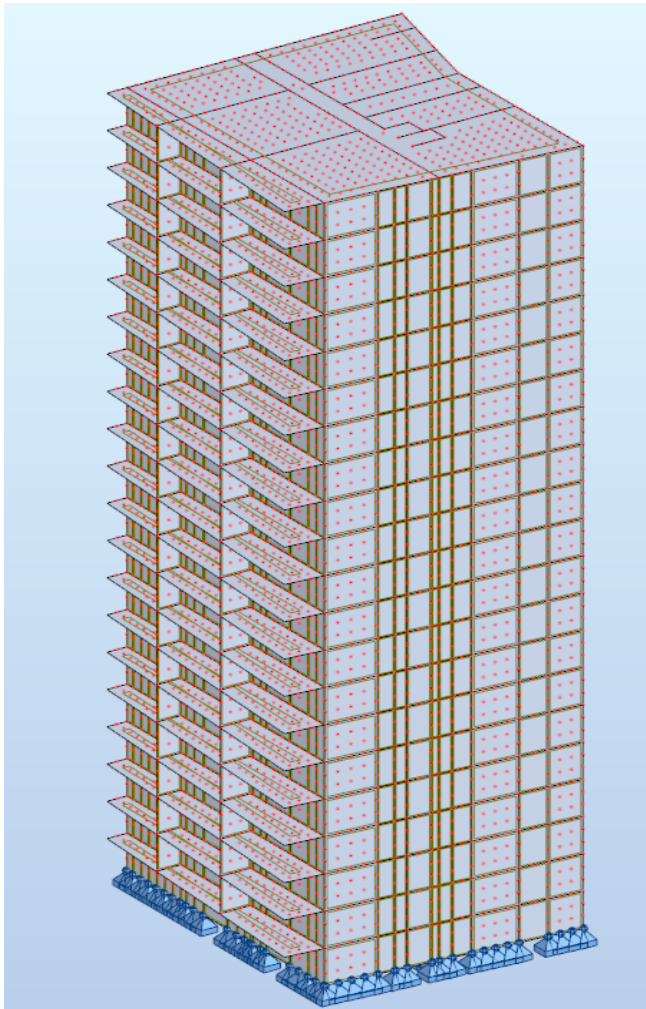
Aikahistoria-analyysin tuloksia saadaan näkyviin Results -> Advanced results -> Time History analysis. Tulokset ovat saatavilla joko diagrammi- tai taulukkomuodossa. Tuloksia on käsitelty tarkemmin kappaleessa 6. Aikahistoria-analyysin tuloksista saadaan muun muassa siirtymät, nopeudet ja kiihtyvyydet jokaiselle solmupisteelle jokaisessa pääsuunnassa. Tämän työn osalta mielenkiintoiset tulokset ovat siirtymät pääsuunnassa, kiihtyvyys tuulen suunnassa sekä kiertymän aiheuttama kiihtyvyys.

Robot Structural Analysis -ohjelma ilmoittaa kiertymän joko Rad/s^2 tai Deg/s^2 yksikössä. Tuloksien vertailu ISO 10137 standardin ilmoittamiin raja-arvoihin vaatii kuitenkin muunnoksen kaavan (2.7) mukaan muotoon m/s^2 . Robot Structural Analysis -ohjelma pystyy laskemaan jokaisen kerroksen kiertymäkeskiön sijainnin, kunhan rakenteelle on määrätty kerrokset Geometry -> Stories välilehden mukaisesti. Tulokseksi saadaan kiertymäkeskiön koordinaatit, josta voidaan laskea tarkastelupisteen etäisyys kiertymäkeskiöön.

5.3 Yksinkertaistettu FEM-malli

Tulosten vertailua varten kohteesta tehdään yksinkertaistettu FEM-malli, jonka avulla voidaan tutkia FEM-ohjelman tuloksien eroavaisuuksia Eurokoodin antamiin tuloksiin. Eurokoodi laskennoissa täytyy tehdä oletuksia rakenteen geometrialle, kuten esimerkiksi se, että massa oletetaan tasan jakautuneeksi korkeuden suhteen. ICON Suurpellon rakennus ei täytä tätä vaatimusta muotonsa vuoksi.

ICON Suurpellon rakennuksen hoikka torniosa sisältää kerrokset 9-21. Yksinkertaisessa FEM-mallissa oletettiin koko rakennuksen poikkileikkaus olevan vastaava kerroksissa 1-21 kuvan 5.6 mukaisesti. Tuulikuormituksen määrittäminen, aikahistoria-analyysi ja geometria on muuten tehty kuten aikaisemmin esitettiin.



Kuva 5.6 ICON suurpellon yksinkertaistettu FEM-malli.

5.4 FEM-mallinnuksen virhetekijät

Elementtien koolla on suuri vaikutus tuloksiin. Vaikka monissa FEM-ohjelmissa on automaattinen elementtiverkotus, on suunnittelijalla hyvä olla vahva käsitys elementtiverkon vaikutuksesta tuloksiin. Mitä pienempiin osiin verkko jaetaan, sitä tarkempia tulokset ovat, mutta varsinkin suurissa rakenteissa laskenta menee liian raskaaksi, jolloin on tehtävä kompromissi laskentatehon ja tarkkuuden väliltä. Robot Structural Analysis -ohjelmassa on myös monia eri menetelmiä ja asetuksia automaattisen elementtiverkon määrittämiseen. Näiden asetusten oikeaoppinen käyttäminen parantaa elementtiverkkoa ja näin ollen tuloksien tarkkuutta.

FEM-mallissa voi esiintyä singulaaripisteitä laatoissa ja jännityksiä kantavissa seinissä, joissa jännitys ja sisäiset voimat kasvavat äärettömästi. Todellisuudessa vastaavaa tilannetta ei voi tulla, koska betoni halkeaminen tai murtuminen jakaa jännityksiä eri rakenteille. Ilmiö johtuu monista yksinkertaistuksista ja olettamuksista FEM-ohjelmistoissa.

Kyseisen aikahistoria-analyysissä käytetyn satunnaisesti luodun tuulen nopeushistorian generointi voi aiheuttaa huomattavaa virhettä kiihtyvyyksiin, mikäli sen luonnissa on tehty virheitä. Tuulennopeus on Eurokoodimitoituksen perusteella yksi voimakkaimmin vaikuttavista tekijöistä värähtelyn kiihtyvyyden suuruudelle. Varmempi menetelmä olisi tuulitunnelikokeella selvitetty painekuormitushistoria, joka toimisi kuormituksen lähtöarvona.

FEM-mallien tekeminen vaatii huomattavan määrän teoreettista osaamista, jotta tulokset ovat luotettavia. Varsinkin monimutkaisten analyysien kohdalla, kuten esimerkiksi edellä esitetty ominaismuotoanalyysi, mallin tekeminen ja oikeiden laskenta algoritmien valinta vaatii syvällistä ymmärrystä. Tästä syystä FEM-mallin tulokset yksinään ovat yleensä epäluotettavia, ja tuloksia olisi syytä aina verrata käsin laskettuihin tuloksiin, tai toisen menetelmän tuloksiin. Myös laskenta-aika nousee suureksi monimutkaisilla malleilla. Tämän työn FEM-mallin laskenta-aika oli korkeimmillaan 2,5 tuntia, joten työskentely ei ole tehokasta, mikäli ei käyttäjällä ei ole varmaa osaamista FEM-ohjelman käyttämisestä.

6 TULOKSET

Tuloksien vertailua varten ICON Suurpellon rakennuksesta tehtiin kaksi mallia. Ensimmäisen mallin tekoa on kuvattu kappaleessa 5.2 ja mallin pohjana käytettiin arkkitehdin tekemiä pohjakaavioita rakennuksesta. Toinen malli on hyvin yksinkertaistettu malli, jossa mallinnettiin ainoastaan korkea torniosuus, joka ulottui alimmasta kerroksesta ylimpään todellisilla huonekorkeuksilla. Yksinkertaistetun mallin tarkoitus on toimia vertailukohtana Eurokoodi mitoitukselle, koska rakenne täyttää silloin Eurokoodissa määritetyt rajoitukset; rakenne on alle 200 metriä korkea, massa on tasan jakautunut korkeuden suhteen ja vain alin ominaisuusmuoto on määräävä. Todellinen rakenne ei täytä Eurokoodissa esitettyjä vaatimuksia, koska rakennuksen muoto on alhaalta ylöspäin suppeneva yhdeksänteen kerrokseen asti, jolloin massa ei ole tasan jakautunut ja kiertymää vastaava ominaisuusmuoto voi olla merkittävässä osassa. Eurokoodimitoituksen lisäksi tehtiin tarkennettu eurokoodimitoitus, jossa käytettiin lähtöarvoina yksinkertaistetun FEM-mallin tuloksia.

6.1 Tuulen suuntainen värähtely

Rakennuksen värähtelyä tuulen suuntaan mitoitettiin Eurokoodien määrittämien menetelmien pohjalta ja tuloksia on esitetty taulukossa 6.1. Eurokoodipohjainen laskenta on esitetty liitteessä 1. Tämän lisäksi Eurokoodimitoitus tehtiin muutetuilla lähtöarvoilla, joiden arvot saatiin yksinkertaistetusta FEM-mallista ja ICON Suurpelto tuuliselvitysraportista. Muutetut lähtöarvot olivat FEM-mallista saatu tarkempi arvo rakennuksen alimmalle ominaistajuudelle ja ICON Suurpellon tuuliselvityksessä annetut tuuliarvot.

ISO 10137 standardi antaa tuulen aiheuttamalle kiihtyvyydelle rajoituksia kuvan 2.7 mukaisesti. Arvot on annettu tuulen yhden vuoden toistumisvälille, joten tuulennopeuden perusarvona käytettiin yhden vuoden toistumisvälin arvoa $v_b = 15,75$ m/s. ICON Suurpellon Tuuliselvitys antaa pienempiä tuulennopeuden modifioituja perusarvoja tuulelle, mikäli Eurokoodi laskelmat tehdään maastoluokan 0 mukaisesti. Vastaavasti Eurokoodin maastoluokan I mukainen tarkastelu antaa tuulelle pienempiä arvoja verrattuna mitattuun tuulidataan. Voidaan siis olettaa, että todellinen maastoluokka on maastoluokan 0 ja I välissä. Tarkennetussa Eurokoodimitoituksessa, sekä FEM-mallien laskelmissa käytetään Suurpellon tuuliselvityksen antamia arvoja tuulennopeuden

modifioidulle perusarvolle, sekä turbulentin intensiteetille. Eurokoodimitoituksessa puolestaan käytettiin maastoluokan 0 mukaisia arvoja.

Taulukko 6.1 Tuulensuuntaisen värähtelyn tulokset

Tuulen suuntaisen värähtelyn tulokset				
	Eurokoodi mitoitus	Tarkennettu Eurokoodimitoitus	Yksinkertaistettu FEM-malli	FEM- malli
v_m (yhden vuoden toistumisväli)	27,1 m/s	27,1 m/s	27,1 m/s	24 m/s
Kiihtyvyys %- osuutena g:stä	0,23%	0,16%	0,14%	0,19%
Alin ominaistaajuus	0,657 Hz	0,82 Hz	0,82 Hz	1,09 Hz

Eurokoodimitoituksessa mitoitus on tehty molempiin suuntiin (X-suuntaan ja Y-suuntaan), joista on valittu pahempi tapaus. FEM-mallinnuksessa mitoitus on tehty neljään suuntaan, joista on valittu pahimman tapauksen arvot (X-akselin molempiin suuntiin ja Y-akselin molempiin suuntiin). ICON Suurpellon tuuliselvitys antaa tuulen mitoituservoja 16 ilmansuunnan mukaan, mutta mallintamisen yksinkertaistamiseksi on käytetty pahinta ilmansuuntaa jokaisen suunnan tarkasteluun.

Suurimman arvon tuulen suuntaiselle kiihtyvyydelle antaa Eurokoodin mukainen mitoitus. Tutkimuksessa, jossa vertailtiin eri maiden normimitoituksen arvoja (Kortelainen P., 2012, 4.5.5), päädyttiin tulokseen, että Eurokoodimitoitus on varsin konservatiivinen, joten tulokset ovat olettamusten mukaisia, että tarkempi menetelmä antaa pienempiä kiihtyvyyksien arvoja Eurokoodimitoitukseen verrattuna.

Kuvassa 6.1 on esitetty yksinkertaistetun FEM-mallin aikahistoria-analyysin tuloksia. Yksinkertaistetun FEM-mallin suurin arvo tuulen suuntaiselle värähtelyn kiihtyvyydelle

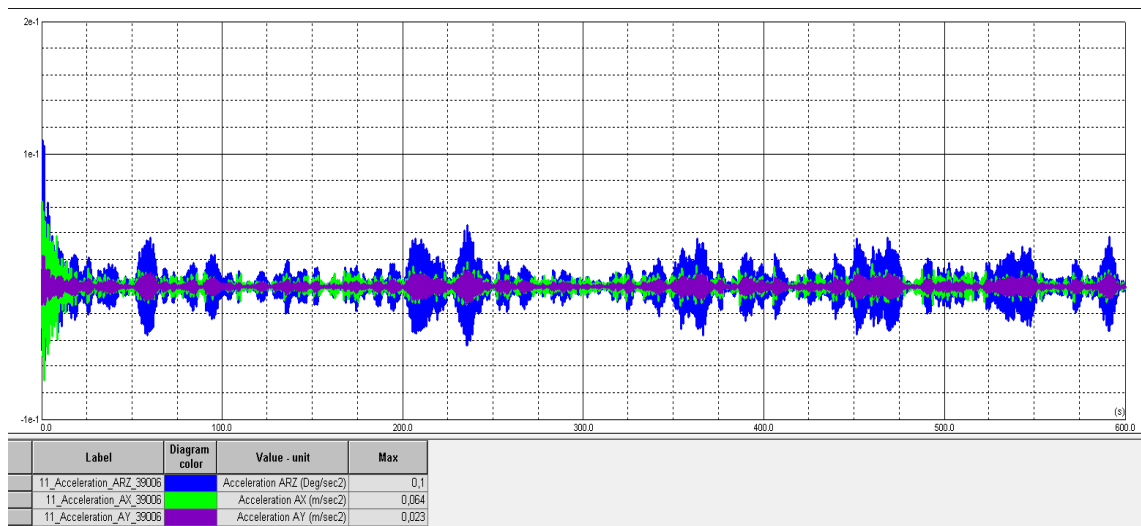
on noin 0,0143 kuvaajasta luettuna, mikä vastaa 0,14% g:stä. Tämä kiihtyvyyden arvo vastaa tilannetta, kun tuulikuormitus on Y+ suuntaan. Rakennuksen jäykkyys on pienempi tässä suunnassa, verrattuna X-suuntaan. X-suunnassa tuulikuormitus on hieman isompi, koska rakennus on suorakaiteen muotoinen, mutta jäykkyys vaikuttaa arvon suuruuteen tässä tilanteessa enemmän. Sininen Weibull -niminen viiva kuvastaa tuulikuorman muutosta ajan suhteen.



Kuva 6.1 Yksinkertaistetun FEM-mallin aikahistoria-analyysin tulokset.

Tulokset yksinkertaistetun FEM-mallin ja tarkennetun Eurokoodimitoituksen välillä ovat todella pienet. Tarkennettu eurokoodimitoitus antaa tuulensuuntaiselle kiihtyvyydelle arvoksi 0,16%, kun taas FEM-mallista saatu arvo on 0,14%. Tulokset vastaavat yhden vuoden toistumisvälin tuulikuormituksella saatua arvoa, jonka rajan ISO 10137 standardi asettaa 0,4%:iin kuvan 2.7 mukaisesti, kun rakennuksen ominaistajuus on lähellä yhtä.

Tarkemman FEM-mallin alimmaksi ominaistajuudeksi saatiin 1,09 Hz. Ero on varsin iso verrattuna Eurokoodin antamaan alimman ominaistajuuden arvoon 0,657 Hz. Syyksi voidaan arvioida sitä, että rakennuksen alimmat kerrokset ovat varsin suuria korkeuteen nähden, ja jäykistävät rakennetta tehokkaasti. On myös muistettava Eurokoodimitoituksessa käytetyn ominaistajuuden virhemarginaali, joka voi olla luokkaa 50%. Kuvassa 6.2 on esitetty tarkemman FEM-mallin antamia vasteita värähtelylle.



Kuva 6.2 FEM-mallin tulokset

Tuulensuuntaiseksi kiihtyvyydeksi saatiin 0,19%-osuus maan vetovoimakiihtyvyydestä. Suurin tulos saatiin X-suuntaisen tuulikuorman tapauksessa, toisin kuin yksinkertaistetun FEM-mallin tapauksessa. Myös tarkemman FEM-mallin jäykkyyks on hieman suurempi X-suuntaan, mutta tuulikuormitus on tässä tapauksessa paljon suurempi talon geometrian takia, mistä johtuu myös kiihtyvyyden hieman suurempi arvo X-suunnassa yksinkertaistetun FEM-malliin verrattuna. Tässäkin tapauksessa tulokset ovat raja-arvon alapuolella, joten voidaan todeta, että tuulensuuntainen kiihtyvyys ei aiheuta ongelmia esimerkkikohteessa.

6.2 Tuulen poikkisuuntainen värähtely

Liitteessä 2 on esitetty Eurokoodin mukainen poikkisuuntaisen värähtelyn mitoitus, mutta tulokset ovat todella epäilyttäviä. Kortelaisen tutkimuksessa (Kortelainen P., 2012, kappale 4.5.5) kyseenalaistetaan myös menetelmän paikkansapitävyyttä. Myös tässä työssä saadut tulokset viittaavat siihen, että menetelmä ei sovellu poikkisuuntaisen värähtelyn tarkasteluun rakennuksen dimensioilla. Eurokoodissa esitetyt menetelmät, milloin pyörreratailmion aiheuttamat vasteet tulisi tutkia, ovat samanlaiset kuin muissa lähteissä ilmoitetut menetelmät (Hallebrand E., Jakobsson W., 2016, s. 39), joten niitä voidaan pitää paikkansapitävinä. Kyseessä olevaa esimerkki kohdetta ei pidä esimerkiksi tutkia pyörreratailmion aiheuttamia vasteita tarkemmin, koska kohde ei täytä mitoituksen tarpeelle asetettuja ehtoja, mitkä on esitetty kappaleessa 4.3.

Liitteessä 2 on myös esitetty Similu & Scanlanin kirjassa esitetty menetelmä kiihtyvyyden laskennalle poikkisuuntaan. Itse menetelmää ei olla työn rajauksen puitteissa avattu sen enempää, mutta tulokseksi saatiin 0,079% maan vetovoima kiihtyvyydestä. Tulosta voidaan pitää järkevänä tässä tapauksessa, koska se on paljon pienempi, mitä tuulen suuntainen kiihtyvyys antoi tulokseksi. Eurokoodin ehtojen mukaan jo todettiin, että pyörreratailmiö ei ole kyseessä olevalle rakennukselle mitoittava tapaus.

Mikäli tarkastelussa päädyttäisiin tulokseen, että poikkisuuntaisen värähtelyn vasteet tulisi tutkia tarkemmin, vaihtoehtoiksi jäävä esimerkiksi Similu & Scanlanin kirjassa esitetty menetelmä (Simiu E., Scanlan R. H., 1996, s. 344) tai jonkin muun maan standardiin pohjautuva mitoitusmenetelmä. Näiden menetelmien käyttö on kuitenkin riskialtista Eurokoodin rinnalla, koska on vaikea tietää ilman syvää perehtymistä, miten esimerkiksi varmuuskertoimet on otettu huomioon eri menetelmissä. Riski kasvaa varsinkin, kun standardeja käytetään ristiin. FEM-ohjelmalla pyörreratailmiön tutkiminen vaatisi sen, että ilmiön aiheuttamasta kuormasta luotaisiin käyttäytymisfunktio, joka mallintaa kuorman suuruutta ja suuntaa ajan suhteen. Kuorman käyttäytymisfunktio voitaisiin luoda esimerkiksi CFD menetelmällä, mutta kuten kappaleessa 5 kerrotaan, on CFD yksinään vielä epävarma tapa määrittää tuulikuormia ja sen aiheuttavia ilmiöitä ilman vahvaa asiantuntemusta, mutta aihe olisi mielenkiintoinen jatkotutkimuksiin. Tarkimmaksi ja varmimmaksi tavaksi jää rakennuksen tuulitunnelikokeen yhteydessä luotu paineen aikafunktio.

6.3 Vääntöväärähtely

Eurokoodi ei anna tapoja mitoittaa vääntöväärähtelyä, mutta vääntöväärähtelyä voidaan tutkia Robot Structural Analysis -ohjelmalla. Kuvasta 6.1 ja 6.2 huomataan, että tulokseksi saadaan kiihtyvyyksiä X -ja Y-suuntaan, vaikka kuormitus on pelkästään Y-suuntaan. X-suuntaisen kiihtyvyys johtuu kuorman aiheuttamasta väännöstä rakenteelle. Tulokseksi on myös otettu tarkastelupisteen kiertymäkiihtyvyys, joka saa maksimi arvoksi 20-600 sekunnin tarkasteluvälillä $0,01 \text{ Deg/s}^2$. Tarkastelupisteen koordinaattien etäisyys kiertymäkeskiön koordinaatteihin on 13,654 metriä, jolloin kiihtyvyyden arvo m/s^2 -yksikössä voidaan laskea kaaren pituuden, kuten se on esitetty kaavassa (2.7).

$$\sigma_r = 2 * \pi * 13,654 \text{ m} * \frac{0,01^\circ/s^2}{360^\circ} = 0,00237 \text{ m/s}^2 \quad (2.7)$$

Tulos vastaa 0,024% maan vetovoimakiiktyvyydestä, ja sen suuruus verrattuna tuulen suuntaisen kiihtyvyyden arvoon 0,14% on todella vähäinen. Tulos on odotusten mukainen, koska yksinkertaistettu FEM-malli on geometrialtaan ja kuormitukseltaan melko symmetrinen. Huomautuksena voidaan sanoa, että kiertymästä aiheutuva kiihtyvyys aiheuttaa tuulensuuntaiseen kiihtyvyyden arvoon joko lisäyksen tai pienennyksen, riippuen tarkastelupisteestä. FEM-ohjelma antaa kiihtyvyydelle y-suuntaisen komponentin, joka sisältää kaikkien kuormitusten aiheuttamien liikkeiden summan, mutta kuten huomattiin, kiertymän vaikutus on pieni ja voidaan tässä tilanteessa jättää huomiotta. Kuvassa 6.1 esitetty X-suuntainen kiihtyvyys saa maksimiarvoksi 20-600 sekunnin tarkasteluvälillä 0,003 m/s², mikä vastaa hyvin kiertymästä saatua kiihtyvyyssarvoa. Kun tarkastellaan rakennuksen deformaatiota, huomataan että tarkastelupiste liikkuu enimmäkseen X-suuntaan kiertymän vuoksi.

Tarkemman FEM-mallin kiertymävärähtelyn kiihtyvyydeksi saatiin 0,041 deg/s², joka vastaa noin 0,1%-osuutta maan vetovoimankiihtyvyydestä x-suunnassa. Arvoksi saatiin 0,036%, kun kuormitus oli y-suuntainen. Verrattuna tuulensuuntaisen kiihtyvyyden arvoon 0,19%, voidaan sanoa, että vääntövärähtely ei ole mitoittavassa asemassa, mutta sen osuus on kohtalaisen merkittävä. Tulokset ovat siinä mielessä odotusten mukaisia, että rakennus on epäsymmetrinen x-suunnan kuormituksessa, jolloin vääntövärähtelyn osuus lisääntyy.

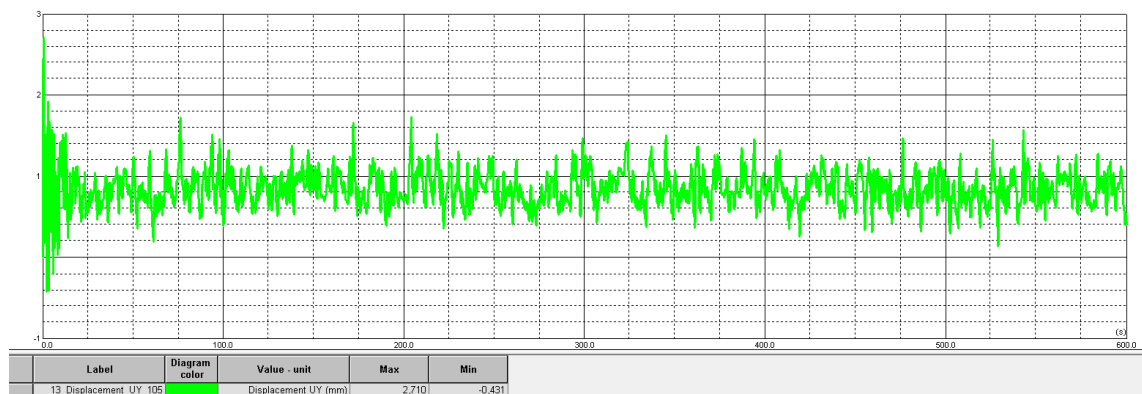
6.4 Taipuma

Yksinkertaistettu FEM-malli saa taipumaksi esimerkiksi yhdessä nurkkapisteessä 2,221 mm kun tarkastellaan Y-suuntaa (tuulikuorma Y-suuntaan on kuormatapaus 12 kuvassa 6.3)

Node/Case	UX (mm)	UY (mm)	UZ (mm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)
105/ 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
105/ 2	-0,217	-0,120	-0,289	0,00000	-0,00000	0,00001
105/ 3	-1,499	-0,780	-0,404	0,00001	-0,00003	-0,00002
105/ 4	0,001	0,002	-0,000	0,00000	0,00000	0,00000
105/ 12	-0,140	2,221	-0,210	-0,00002	-0,00000	0,00002
105/ 14	2,252	0,938	-0,357	-0,00000	0,00003	0,00006
105/ 15	-2,117	-1,448	0,386	0,00000	-0,00003	-0,00009
105/ 16	0,625	-3,099	0,233	0,00003	0,00001	-0,00007

Kuva 6.3 Yksinkertaistetun FEM-mallin siirtymät.

Tämä taipuma siis tarkoittaa taipumaa staattisessa tuulikuormituksessa, jolloin taipumaan ei ole otettu huomioon turbulenssin aiheuttamaa vaikutusta. Aikahistoria-analyysissä voidaan myös kiihtyvyyden ohella tarkastella solmupisteen siirtymiä, jolloin kyseinen siirtymä yhdistettynä staattisen voiman aiheuttamaan siirtymään antaa rakennuksen kokonaissiirtymän.



Kuva 6.4 Yksinkertaistetun FEM-mallin aikahistoria-analyysin siirtymät.

Turbulenssin vaikutuksesta suurin siirtymä on noin 1,7 mm, jolloin kokonaissiirtymäksi saadaan 3,9 mm. Kappaleessa 4.4 esitetyn Eurokoodipohjaisen mitoituksen mukaan siirtymäksi saadaan 3,12 mm, kun lähtöarvoina käytettiin yksinkertaisen FEM-mallin mukaisia arvoja.

Normaalin eurokoodimitoituksen mukaan siirtymäksi saatiin 5,9 mm (liite 1) ja tarkempi FEM-malli antoi siirtymäksi 4,4 mm. Kappaleen 2.6.2 mukaisten raja-arvojen perusteella taipumia voidaan pitää hyväksyttävänä kaikissa tapauksissa.

6.5 Tuloksien pohdinta

Tulokset saavat epärealistisia arvoja analyysin alkaessa. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että ajanhetkellä nolla rakennukseen kohdistuu koko tuulikuorma, eikä vain turbulentin aiheuttama muutos, mutta tulokset tasoittuvat normaalille tasolle noin 20 sekunnin kohdalla, josta eteenpäin tulosten tarkastelu suoritetaan.

FEM-malleilla saadut tulokset ovat hyvin yhdenmukaisia Eurokoodimitoituksen kanssa. Yksinkertaistetun FEM-mallin ja sen pohjalta tehty eurokoodimitoitus viittaisi siihen, että eurokoodimitoitus antaa lähestulkoon saman tuloksen. Tarkempaa FEM-mallia, joka on geometrialtaan monimutkaisempi, on hankala verrata Eurokoodimitoitukseen, koska rakenne ei geometriansa puolesta sovellu normipohjaiseen mitoitukseen, mutta koska yksinkertainen FEM-malli ja sen pohjalta tehty eurokoodimitoitus ovat niin yhteneväisiä, voidaan olettaa myös tarkemman FEM-mallin tuloksien olevan oikeaa suuruusluokkaa.

FEM-mallin tarkastelussa on syytä muistaa, että virtuaalisen tuulitunnelin antama kuormitus on staattinen paine rakennuksen pinnoilla. Dynaamista osaa mallinnetaan kertomalla tämän staattisen kuorman suuruutta aikahistorian käyttäytymisfunktiolla, mutta todellisuudessa tuulen aiheuttama kuormitus vaihtelee rakennuksen pinnoilla esimerkiksi pyörteiden vaikutuksesta. Menetelmä ei siis pysty mallintamaan esimerkiksi pyörreratailmiötä, jossa rakennuksen sivuilta irtoilee pyörteitä, aiheuttaen voimaimpulsseja. Tämä voi aiheuttaa myös virheitä tuulensuuntaisen värähtelyn yhteydessä koska tuulen aiheuttama paine ei ole oikeasti staattinen rakennuksen pinnoilla, vaan paineiden suhdanteet eri kohdissa voivat vaihdella. Tästä johtuvaa virheiden suuruusluokkaa on vaikea arvioida ilman tuulitunnelikokeita ja vertaamalla niitä FEM-laskennan tuloksiin.

7 YHTEENVETO

Korkea rakentaminen luo haasteita suunnittelijoille, erityisesti koska tuulikuormituksen osuus ja sen aiheuttamien ilmiöiden vaikutukset kasvavat korkeuden mukaan. Suomessa on rakennettu suhteellisen vähän yli 100 metrin rakennuksia, jolloin tuulen aiheuttamat värähtely voi alkaa tuottamaan ongelmia. Voidaan sanoa, että osaaminen tämän asian osalta on suhteellisen vähäistä suunnittelijoiden keskuudessa.

Eurokoodimitoituksessa on puutteita ja epätarkkuuksia, kun mitoitetaan rakennuksen vastetta tuulikuormitukselle. Tuulen suuntaisen värähtelyn mitoitukseen Eurokoodi soveltuu tarpeeksi hyvin, kun pysytään Eurokoodimitoituksen asettaman 200m korkeuden alapuolella ja rakenne on geometrialtaan yksinkertainen, mutta tuloksien perusteella voi olla tarpeellista suorittaa tarkempia numeerisia analyysejä jo reilusti alle 200m rakennuksien tapauksessa. Tuulen poikkisuuntaiseen värähtelyyn Eurokoodi ei taas sovellu ollenkaan tulosten perusteella. Eurokoodissa esitetyt ehdot, jolloin mitoitus on tehtävä, ovat suhteellisen samat, kun muiden maiden mitoitusnormeissa, joten niitä voidaan pitää luotettavina. Mikäli pyörreratailmiö syntyy, Eurokoodi ei kuitenkaan sovellu tämän työn perusteella sen aiheuttamien vasteiden määrittämiseen. Lisäksi jos vääntövärähtely on määräävä tapaus, Eurokoodi ei anna ollenkaan tapoja sen määrittämiseen.

Työssä ei tehty tuulitunnelikoetta rahoitus- ja aikataulusyistä, mitä yleisesti pidetään varmimpana tapana määrittää tuulikuormituksen vasteet. Myös CFD menetelmää, eli vasteiden määrittystä virtuaalisella tuulitunnelilla, tarkasteltiin vain teorian osalta, koska sen antamat tulokset ovat nykyvalossa yksinään epävarmoja, ellei niitä pystytä varmentamaan tuulitunnelikokeen saatuihin tuloksiin verrattuna. Näistä syistä päädyttiin käyttämään FEM-mallin hyödyntämistä. Näin tehtynä tuuli ja sen turbulentsisuuden vaikutus mallinnetaan edelleen Eurokoodin tavoin tilastollisesti, ja menetelmä rajoittuu Eurokoodin asettamaan 200 metrin ylärajaan tuulikuormien tarkastelussa. Sen sijaan FEM-mallilla pystytään mallintamaan rakennuksen värähtelyominaisuuksia todennukaisemmin, kuin Eurokoodin antamalla menetelmällä. Esimerkiksi Ominaisuotoja voidaan ottaa enemmän tarkasteluun mukaan ja ominaisvärähtelyn taajuus selvitetään numeerisesti.

Tuloksien perusteella värähtely ei aiheuta esimerkkikohteessa ongelmia, vaan arvot pysyvät raja-arvojen alapuolella niin tuulensuuntaisen värähtely, poikittaisvärähtelyn, vääntövärähtelyn kuin taipumienkin osalta. Mitoittavaksi tapaukseksi osoittautui tuulensuuntainen värähtely, joka sai arvoksi 0,23% maan painovoimakiihtyvyydestä Eurokoodimitoituksella, raja-arvon ollessa 0,3% ISO 10137 mukaisesti. FEM-mallilla saatiin arvo 0,19%, jolloin tuulennopeutena käytettiin ICON tuuliselvityksen hieman pienempää arvoa kuin Eurokoodin mukainen 0-maastoluokka antaa. Vaikka tuloksissa on epävarmuuksia, ovat tulokset sen verran kaukana raja-arvoista, ja rakennuksen ominaistaajuus suhteellisen korkea, että tarvetta tarkemmalle tuulitunnelikokeelle ei tässä tapauksessa ole.

FEM-mallinnuksella tehty aikahistoria-analyysi antoi tässä työssä varsin samanlaisia tuloksia kuin Eurokoodimitoitus. Tuulikuormituksen dynaamisen komponentin määrittäminen FEM-malliin pohjautuu Eurokoodimitoitukseen, joten tuloksien yhteneväisyys oli odotettavissa. FEM-mallin hyödyt kuitenkin ilmenevät mahdollisuutena selvittää vääntövärähtelyn vasteet ja tulokset ovat todennäköisesti hieman tarkempia kuin Eurokoodimitoituksen antamat vasteet rakennuksen tarkemman määrittelyn seurauksena. On kuitenkin syytä muistaa, että vaikka työssä käytettiin virtuaalista tuulitunneliä, sitä käytettiin ainoastaan tuulikuormien staattisten painearvojen määrittämiseen, eikä tuulen dynaamisten ominaisuuksien selvittämiseen. Tuulen dynaamista käyttäytymistä mallinettiin Eurokoodin mukaisin keinoin, jolloin ne saattavat poiketa huomattavasti todellisesta tilanteesta.

FEM-laskentaohjelman tulokset ovat toisaalta varsin arkoja tarkkuutensa puolesta, koska tulokset riippuvat hyvin paljon käyttäjän osaamisesta ja teorian tuntemuksesta, kun mitoitetaan monimutkaisia ilmiöitä, kuten tuulen aiheuttaman värähtelyn vasteita. Ongelmakohtina ovat lähinnä vasteet, joita ei voida mitoitaa Eurokoodin mukaan ja ainoana tuloksena jää FEM-mallin antamat tulokset ilman vertailukohtaa. Jatkotutkimuksena olisi hyödyllistä tutkia FEM-mallin antamia vasteita kokeellisesti saatuihin tuulitunnelitestauksen antamiin tuloksiin. Tuulitunnelitestausta pidetään yleisesti kaikista luotettavimpana tapana määrittää rakenteen vasteet. Tätä voitaisiin käyttää hyväksi, jotta FEM-mallinnuksen helposti syntyvät virhemallinnukset voitaisiin välttää ja luoda käyttäjille varmaa osaamista niin mallinnuksesta kuin tuloksien tulkitsemisesta.

LÄHDELUETTELO

Autodesk Flow Design tuotesivu, 2015, Wind Tunnel [Verkkolähde]. Saatavissa: <https://knowledge.autodesk.com/support/flow-design/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/ENU/FlowDesign/files/GUID-9B85F4A0-5072-454D-8710-CCFF26507BE9-htm.html> [Viitattu 14.2.2019]

Autodesk Forum, 2014, Time History analysis, reply 15/19 [Verkkolähde]. Saatavissa: <https://forums.autodesk.com/t5/robot-structural-analysis-forum/time-history-analysis/td-p/4782985> [Viitattu 13.3.2019]

Autodesk knowledge network, 2016, Theoretical basis of methods used during structure dynamic analysis [Verkkolähde]. Saatavissa: <https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ENU/RSAPRO-UsersGuide/files/GUID-CBD64D76-847E-4CFC-A366-674F04CCC4D5-htm.html> [Viitattu 16.8.2019]

BES 2010, Korkeiden rakennusten jäykistys, Betoniteollisuus ry 2010, 8s. [Verkkodokumentti], saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/rakennuksen-jaykistys/laskentaperiaatteet> [viitattu 4.1.2019]

Hallbrand E., Jakobsson W., 2016, Structural Design of High-rise Buildings, master's dissertation, ISSN 0281-6679

Holmes J. D., 2001, Wind Loading of Structures. Spoon Press, 348 s. ISBN 0-419-24610-X

Homer Energy, 2018, Weibull K Value [Verkkolähde]. Saatavissa: https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.11/weibull_k_value.html [Viitattu 4.7.2018]

Ilmatieteenlaitos Tuulen voimakkuus [Verkkolähde]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/tuulet> [Viitattu 4.1.2019]

Ilmatieteenlaitos, tuuliruusut [verkkolähde]. Saatavissa:
<http://ilmatieteenlaitos.fi/tuuliruusut> [viitattu 9.1.2019]

Ilmatieteenlaitos, tuulitilastot [Verkkolähde]. Saatavissa:
<http://ilmatieteenlaitos.fi/tuulitilastot> [viitattu 9.1.2019]

International Organization for Standardization (ISO). Standardi ISO 10137:2007. 44 s.

Kortelainen P., 2012, Korkeiden rakennusten vaste tuulikuormituksessa. Tampereen teknillinen yliopisto, 153+52 s.

Kosakowski A., Gaweda R., 2016, Time history analysis, Webinar Autodesk Robot Structural Analysis Professional. [Verkkolähde], saatavissa:
<https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-products/learn-explore/caas/sfdarticles/sfdarticles/ROBOT-How-to-define-a-time-history-analysis-and-how-to-explore-results.html> [Viitattu 15.5.2019]

NASA Landsat 7 image, September 15th, 1999 [Verkkolähde]. Saatavissa:
<https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=2613> [Viitattu 3.1.2019]

Paz M., 1994, International Handbook of Earthquake Engineering, Codes, Programs, and Examples. Springer US, 545 s. eBook ISBN 978-1-4615-2069-6

Reliability Hot Wire – The eMagazine for the Reliability Professionals, Issue 14, April 2002, Characteristics of the Weibull Distribution. [Verkkolähde]. Saatavissa:
<https://www.weibull.com/hotwire/issue14/re basics14.htm> [Viitattu 4.4.2019]

Simiu E., Scanlan R. H., 1996, Wind Effects on Structures – Fundamentals and Applications to Design. John Wiley & Sons 1996, 688 s.

Suomen Standardoimisliitto SFS ry. 2005. Standardi SFS – EN1991-1-4 + Kansalliset liitteet. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

Taranath B. S., 2010, Reinforced Concrete Design of Tall Buildings. U.S.A: CRC Press, 923 s. ISBN 978-1-4398-0480-x

Tuuliatlas, rajakerros [Verkkolähde]. Saatavissa:
http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/tuulisuus_4.html [viitattu 9.1.2019]

Tuuliatlas, Weibull [Verkkolähde]. Saatavissa:
http://www.tuuliatlas.fi/mallinnus/mallinnus_2_1.html [Viitattu 29.10.2018]

Wind load Simulation in Autodesk Robot Structural Analysis Professional, 2015.
[Verkkodokumentti] saatavissa: <http://bimandbeam.typepad.com/files/wind-load-simulation-in-autodesk-robot-structural-analysis-professional.pdf> [viitattu 31.8.2018]

WindPower Program, 15. statistics and the Weibull distribution [Verkkolähde]
Saatavissa: http://www.wind-power-program.com/wind_statistics.htm [viitattu:
24.8.2018]

Zuo W., Intorduction of Computational Fluid Dynamics [Verkkodokumentti] Saatavissa:
http://wwwmayr.informatik.tu-muenchen.de/konferenzen/Jass05/courses/2/Zuo/Zuo_paper.pdf [Viitatu 13.9.2018]

Rakennuksen tuulen värähtelymitoitus Eurokoodi 1991-1-4:2005

Lähtötiedot:

$h := 70$ rakennuksen korkeus [m] Korkeus rajoitettu välille $50 < h < 200$

$b := 27$ rakennuksen leveys [m]

$d := 24$ rakennuksen syvyys [m]

$$\frac{d}{b} = 0.889$$

$m_d := 450$ Massatiheys [kg/m^3]

$r := 0.05$ Rakennuksen kulman pyöristys [m]

Maastoluokka 0

$$z_0 := 0.003$$

$$z_{\min} := 1$$

Rakennuksen ominaismuotoapproksimaation eksponentti

$$\zeta := 1.5$$

Sisäisen vaimennuksen logaritminen dekrementti

$$\delta_s := 0.10$$

$\rho := 1.3$ Ilman tiheys kg/m^3

$$c_{\text{prob}} := \left(\frac{1 - 0.2 \cdot \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{1.59} \right) \right)}{1 - 0.2 \cdot \ln(-\ln(0.98))} \right)^{0.5} = 0.75$$

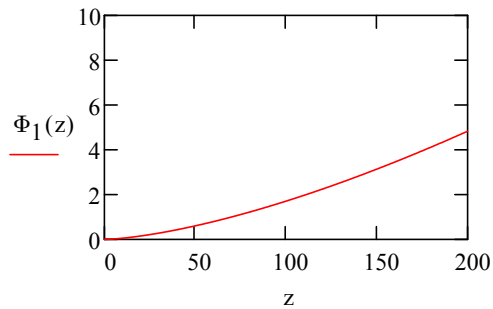
Vastaa yhden vuoden
toistumisvälin tuulennopeutta

$v_b := 21 \cdot c_{\text{prob}} = 15.752$ Tuulennopeuden perusarvo [m/s]

Alin ominaismuoto (SFS-EN 1991-1-4, kaava F.13)

$$\Phi_1(z) := \left(\frac{z}{h}\right)^\zeta$$

Taivutusvärähtelyn alin ominaismuoto,
missä z = korkeus maanpinnan yläpuolella

Ekvivalentti massa (SFS-EN 1991-1-4, kaava F.14)

$$m_m(z) := m_d \cdot d \cdot b$$

$$m_e := \frac{\int_0^h m_m(s) \cdot (\Phi_1(s))^2 ds}{\int_0^h (\Phi_1(s))^2 ds}$$

Ekvivalentti massa alimman ominaismuodon
pituusyksikkö kohti

$$m_e = 2.916 \times 10^5$$

$$m_{1,x} := m_e$$

Poikkileikkaukseltaan suorakaiteen muotoisen rakennuksen
Voimakerroin (SFS-EN 1991-1-4, kaava 7.9)

$$c_f := c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda$$

$$c_{f,0} := \begin{cases} 2 & \text{if } 0 \leq \frac{d}{b} \leq 0.2 \\ \left[2 + 0.875 \cdot \left(\frac{d}{b} - 0.2 \right) \right] & \text{if } 0.2 \leq \frac{d}{b} \leq 0.6 \\ \left[2.35 + 0.5 \cdot \left(\frac{d}{b} - 0.6 \right) \right] & \text{if } 0.6 \leq \frac{d}{b} \leq 0.7 \\ \left[2.4 - \left(\frac{d}{b} - 0.7 \right) \right] & \text{if } 0.7 \leq \frac{d}{b} \leq 1 \\ \left[2.1 - 0.45 \cdot \left(\frac{d}{b} - 1 \right) \right] & \text{if } 1 \leq \frac{d}{b} \leq 2 \\ \left[1.65 - \frac{13}{60} \cdot \left(\frac{d}{b} - 2 \right) \right] & \text{if } 2 \leq \frac{d}{b} \leq 5 \\ 1.1 - 0.02 \cdot \frac{d}{b} & \text{if } 5 \leq \frac{d}{b} \leq 10 \\ 0.9 & \text{if } \frac{d}{b} \geq 10 \end{cases}$$

c.f0 on terävsärmäisen suorakaidepoikkileikkauksen voimakerroin, kun vapaan pään ohittava virtaus jätetään huomiotta

$$c_{f,0} = 2.211$$

Pyöreäsärmäisen suorakaidepoikkileikkauksen pienennyskerroin
(SFS-EN 1991-1-4, kuva 7.24)

$$\psi_r := \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{r}{b} \right) \cdot 2.5 \right] & \text{if } 0 \leq \frac{r}{b} \leq 0.2 \\ 0.5 & \text{if } \frac{r}{b} \geq 0.2 \end{cases}$$

$$\psi_r = 0.995$$

Päätevaikutuskerroin (SFS-EN 1991-1-4, kuva 7.36)

Tehollinen hoikkuus:

$$\lambda_{15\text{m.min}} := 2 \cdot \frac{h}{b} = 5.185$$

$$\lambda_{50\text{m.min}} := 1.4 \cdot \frac{h}{b} = 3.63$$

$$\lambda := \begin{cases} 2 \cdot \frac{h}{b} & \text{if } h \leq 15 \\ \left[\lambda_{15\text{m.min}} + \frac{\lambda_{15\text{m.min}} - \lambda_{50\text{m.min}}}{35} \cdot (h - 15) \right] & \text{if } 15 < h < 50 \\ 1.4 \cdot \frac{h}{b} & \text{if } h \geq 50 \end{cases}$$

$$\lambda = 3.63$$

$$\psi_{\lambda} := \begin{cases} \left(0.6 + \frac{\log(\lambda)}{\log(10)} \cdot 0.1 \right) & \text{if } 0 \leq \lambda \leq 10 \\ \left[0.7 + \left(\frac{\log(\lambda)}{\log(100)} - \frac{\log(10)}{\log(100)} \right) \cdot 0.5 \right] & \text{if } 10 < \lambda \leq 100 \end{cases}$$

$$\psi_{\lambda} = 0.656$$

Voimakerroin

$$c_f := c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_{\lambda} = 1.444$$

Rakennekertoimen määrittämiseen käytettävä nopeuspainekorkeus
(SFS-EN 1991-1-4, kuva 6.1)

$$z_s := \begin{cases} (0.6 \cdot h) & \text{if } h \geq z_{\min} \\ z_{\min} & \text{if } h < z_{\min} \end{cases}$$

$$z_s = 42$$

Tuulenpuuskien intensiteetti (SFS-EN 1991-1-4, kaava 4.7)

$$I_V(z_s) := \frac{k_1}{c_0(z_s) \cdot \ln\left(\frac{z_s}{z_t}\right)}$$

$$k_1 := 1 \quad \text{Pyörteisyyserroin (suositusarvo } k_1 = 1)$$

$$c_0(z_s) := 1 \quad \text{Pinnanmuotokerroin}$$

$$I_V(z_s) := \frac{k_1}{c_0(z_s) \cdot \ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right)}$$

$$I_V(z_s) = 0.105$$

Modifioitu tuulennopeuden perusarvo (SFS-EN 1991-1-4, kaava 4.3)

$$v_m := c_f \cdot c_0(z_s) \cdot v_b$$

Maaston rosoisuus (SFS-EN 1991-1-4, kaava 4.4)

$$c_f := k_f \cdot \ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right)$$

Maaston rosoisuusmitta (SFS-EN 1991-1-4, kaava 4.5)

$$k_f := 0.19 \cdot \left(\frac{z_0}{0.050}\right)^{0.07} = 0.156$$

(HUOM! jos maastoluokka on 0, niin $k_f = 0,18$)

$$k_f := 0.18$$

$$c_f := k_f \cdot \ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right) = 1.718$$

$$v_m := c_f \cdot v_b \cdot c_0(z_s) = 27.069$$

Tuulennopeuden modifioitu perusarvo

Turbulenssin keskihajonta

$$\sigma_v := k_f \cdot k_1 \cdot v_b = 2.835$$

Vaimennuksen logaritminen dekrementti (SFS-EN 1991-1-4, kaava F.15)

$$\delta := \delta_s + \delta_a + \delta_d$$

$$\eta_1 := \frac{46}{h} = 0.657$$

Suositellaan käytettäväksi jotain tarkempaa menetelmää ominaistajuuden laskemiseksi

$$\delta_a := \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m}{2 \cdot \eta_1 \cdot m_e}$$

Aerodynaamisen vaimennuksen logaritminen dekrementti alimmassa ominaismuodossa

$$\delta_a = 3.579 \times 10^{-3}$$

$$\delta_d := 0$$

Erikoislaitteista johtuva vaimennuksen logaritminen dekrementti

$$\delta_{\text{ww}} := \delta_s + \delta_a + \delta_d = 0.104$$

Dimensiottoman voiman spektrisen tiheyden funktio (SFS-EN 1991-1-4, kaava B.2)

$$S_L(z_s, \eta_1) := \frac{6.8 \cdot f_L(z_s, \eta_1)}{(1 + 10.2 \cdot f_L(z, n))^{\frac{5}{3}}}$$

Tuulen taajuusjakautuma ilmaistaan dimensiottoman tehospektrin tiheysfunktion $S(z, n)$ avulla

$$f_L(z_s, \eta_1) := \frac{\eta_1 \cdot L(z_s)}{v_m}$$

Dimensiottoman taajuuden funktio (SFS-EN 1991-1-4, Liite B s. 176)

$$L(z_s) := L_t \left(\frac{z_s}{z_t} \right)^\alpha$$

Tuulenpyörteen ulottuvuus (kaava B.1) esittää luonnollisen tuulen keskimääräistä puuskan kokoa. Kaava on voimassa korkeuden ollessa alle 200m

$L_t := 300$ Ulottuvuuden vertailuarvo

$$\alpha := 0.67 + 0.05 \cdot \ln(z_0) = 0.38$$

$z_t := 200$ Vertailu korkeus

$$L(z_s) := L_t \cdot \left(\frac{z_s}{z_t} \right)^\alpha$$

$$L(z_s) = 165.911$$

$$f_L(z_s, \eta_1) := \frac{\eta_1 \cdot L(z_s)}{v_m}$$

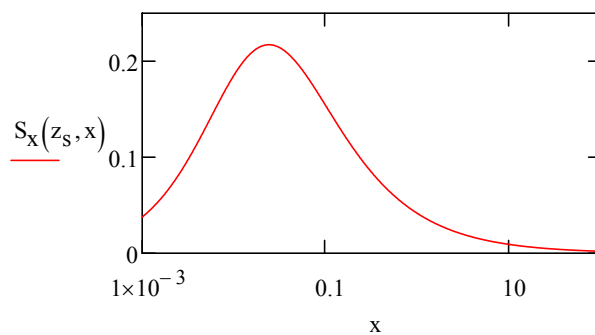
$$f_L(z_s, \eta_1) = 4.028$$

$$S_L(z_s, \eta_1) := \frac{6.8 \cdot f_L(z_s, \eta_1)}{\left(1 + 10.2 \cdot f_L(z_s, \eta_1) \right)^{\frac{5}{3}}}$$

$$S_L(z_s, \eta_1) = 0.054$$

(Taulukkoa varten)

$$S_x(z_s, x) := \frac{6.8 \cdot f_L(z_s, x)}{\left(1 + 10.2 \cdot f_L(z_s, x) \right)^{\frac{5}{3}}}$$



Tehospektrin tiheysfunktio

Aerodynaamiset siirtokertoimet (SFS-EN 1991-1-4, kaava B.7 ja B.8)

$$R_h := \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) \quad \text{Alinta ominaismuotoa vastaavat aerodynaamiset}$$

siirtokerroinfunktiot R_h ja R_b

$$R_b := \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \eta_b})$$

$$\eta_h := \frac{4.6 \cdot h}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, \eta_1) = 7.817$$

$$\eta_b := \frac{4.6 \cdot b}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, \eta_1) = 3.015$$

$$R_h := \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) = 0.12$$

$$R_b := \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) = 0.277$$

Dimenssioton kerroin (SFS-EN 1991-1-4, kaava B.12)

$$K_x := \frac{\left[(2 \cdot \zeta + 1) \cdot \left[(\zeta + 1) \cdot \left(\ln \left(\frac{z_s}{z_0} \right) + 0.5 \right) - 1 \right] \right]}{(\zeta + 1)^2 \cdot \ln \left(\frac{z_s}{z_0} \right)} = 1.617$$

Resonanssivasteen vaikutusparametrin neliöjuuri (SFS-EN 1991-1-4, kaava B.6)

$$R_{\text{res}} := \sqrt{\frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot \sqrt{S_L(z_s, \eta_1)} \cdot R_h \cdot R_b} = 0.291$$

Resonanssivasteen vaikutusparametri R^2 , jonka avulla otetaan huomioon rakenteen tarkastellun värähtelymuodon kanssa resonanssissa esiintyvä trubulenssi

Taustapyörteiden vaikutusparametri (SFS-EN 1991-1-4, kaava B.3)

$$B := \sqrt{\frac{1}{1 + 0.9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_s)}\right)^{0.63}}} = 0.78$$

Taustapyörteiden vaikutusparametri B^2 , jonka avulla otetaan huomioon rakenteen pinnalla vaikuttavan paineen osittainen keskinäinen riippumattomuus

Tuulikuorma (SFS-EN 1991-1-4, kaava 5.4)

$$F_w := (c_{sd}) \cdot c_f \cdot q_p \cdot z_e$$

Kerrottuna F_w rakennuksen pinta-alalla A_{ref} , saadaan tuulikuorman kokonaisvoima.

$$q_p(z_s) := \left(1 + 7 \cdot I_v(z_s)\right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{v_m^2}{1000}$$

Puuskanopeuspaine korkeudella z_s , joka sisältää tuulennopeuden modifioidun perusarvon ja lyhytaikaisten nopeusvaihteluiden vaikutukset (SFS-EN 1991-1-4, kaava 4.8)

$$q_p(z_s) = 0.825 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$v := \eta_1 \cdot \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} = 0.23$$

Resonanssitaajuus (SFS-EN 1991-1-4, kaava B.5)

$$T_{\text{res}} := 600$$

T on tuulennopeuden perusarvoa mitattaessa käytetty aika, eli 10 minuuttia (600 sekuntia)

$$k_p := \max\left(3, \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}}\right) = 3.33$$

huippuarvokerroin, joka on määritelty vasteen vaihtelevan osan suhteen vasteen keskihajontaan (SFS-EN 1991-1-4, kaava B.4)

$$k_{p,\max} := \max\left(3, \sqrt{2 \cdot \ln(\eta_1 \cdot T)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \cdot \ln(\eta_1 \cdot T)}}\right) = 3.631$$

Huippuarvokerroin, kun resonanssitaajuuden käytetään ominaistaajuutta η_1 . Käytetään huippukiihtyvyyden laskemiseen

$$c_{sd} := \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_V(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_V(z_s)} = 0.912$$

Rakennekerroin (SFS-EN 1991-1-4, kaava 6.1)

$$c_d := \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_V(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_V(z_s) \cdot \sqrt{B^2}} = 1.006$$

Dynaaminen kerroin

Kiihtyvyyden keskihajonnan laskenta (SFS-EN 1991-1-4, kaava B.10)

$$\sigma_{a,x}(z) := \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot I_V(z_s) \cdot v_m^2}{m_{1,x}} \cdot R \cdot K_x \cdot \Phi_1(z)$$

Kiihtyvyyden keskihajonta

$$\sigma_{a,x}(h) = 6.285 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\sigma_{0,x} := k_{p,\max} \cdot \sigma_{a,x}(h) = 0.023 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Huippukiihtyvyyksien ominaisarvot saadaan kertomalla keskihajonta huippuarvokertoimella käyttämällä resonanssitaajuutena ominaistaajuutta

$$\text{kiihtyvyydsarvo} := \frac{\sigma_{0,x}}{9.81} \cdot 100 = 0.233 \%$$

Kiihtyvyyden arvo %-osuutena maan vetovoimakiihtyvyydestä

Siirtymän laskenta

Eurokoodissa ei määritetty kaavaa suurimman siirtymän laskennalle, vaan sanotaan, että suurin tuulen suuntainen siirtymä määritetään SFS-EN 1991-1-4, kohdan 5.3 ekvivalentin staattisen Tuulikuorman perusteella.

$$F_w := c_{sd} \cdot c_f \cdot q_p(z_s) \cdot b \cdot h \cdot 1000 = 2.055 \times 10^6$$

Hooken laki

$$k := \frac{F}{x_{def}}$$

kulmataajuus

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot \eta_1 = 4.129$$

Dynamiikan peruslaista ja hooken laista johdettu riippuvuus kulmataajudelle ja jousivakiolle

$$\omega := \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\omega^2 = \frac{F}{m \cdot x_{def}}$$

$$x_{def} := \frac{F}{m \cdot (2 \cdot \pi \cdot \eta_1)^2}$$

$$x_{def} := \frac{F_w \cdot 1000}{m_{1,x} \cdot h \cdot (2 \cdot \pi \cdot \eta_1)^2} = 5.905 \text{ mm}$$

**Rakennuksen tuulen poikkisuuntainen värähtelymitoitus
Eurokoodi 1991-1-4:2005**

Lähtötiedot:

 $h := 70$ rakennuksen korkeus [m] Korkeus rajoitettu välille $50 < h < 200$ $b := 24$ rakennuksen leveys [m] $d := 27$ rakennuksen syvyys [m] $m_d := 450$ Massatiheys [kg/m^3] $r := 0.05$ Rakennuksen kulman pyöristys [m]

Maastoluokka I

 $z_0 := 0.003$ $z_{\min} := 1$

Rakennuksen ominaismuotoaprosimaation eksponentti

 $\zeta := 1$

Sisäisen vaimennuksen logaritminen dekrementti

 $\delta_s := 0.1$ $\rho := 1.25$ Ilman tiheys kg/m^3 $\frac{d}{b} = 1.125$ $v_b := 21$ Tuulennopeuden perusarvo [m/s]

Eurokoodi 1991-1-4 liite E antaa kaksi erinlaista tapaa määrittää pyörerataherätteen aiheuttama dynaaminen herätevoima: E.1.5.2 ja E.1.5.3. Tapa E.1.5.3 ottaa huomioon tilanteen, jossa ilmavirtaus on laminaarista. Laminaariset ilmavirtaukset ovat luonteenomaisia Suomessa usein esiintyvän lämpötilainversion aikana, joten menetelmää E.1.5.3 suositellaan käytettäväksi Suomessa.

Arvot taulukosta SFS-EN 1991-1-4, taulukko E.6

$C_s := 0.04$	Aerodynaaminen vakio
$K_{a,max} := 6$	Aerodynaamisen vaimennuksen parametri
$a_L := 0.4$	Normalisoitu raja-amplitudi

Strouhalin luku (SFS-EN 1991-1-4, kuva E.1)

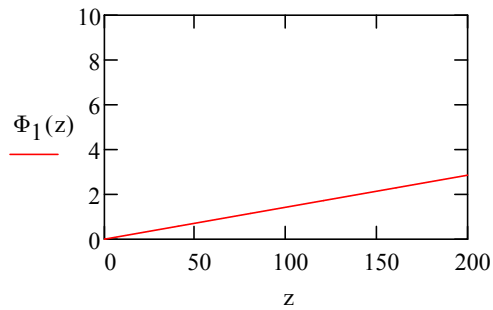
$$St := \begin{cases} 0.12 & \text{if } \frac{d}{b} < 1 \\ \left[0.12 - 0.06 \cdot \left(\frac{d}{b} - 1 \right) \right] & \text{if } 1 \leq \frac{d}{b} \leq 2 \\ 0.06 & \text{if } 2 \leq \frac{d}{b} \leq 3 \\ \left[0.06 + 0.09 \cdot \left(\frac{d}{b} - 3 \right) \right] & \text{if } 3 \leq \frac{d}{b} \leq 3.5 \\ \left[0.15 + 0.04 \cdot \left(\frac{d}{b} - 3.5 \right) \right] & \text{if } 3.5 \leq \frac{d}{b} \leq 5 \\ \left[0.11 + 0.02 \cdot \left(\frac{d}{b} - 5 \right) \right] & \text{if } 5 \leq \frac{d}{b} \leq 10 \\ 0.9 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$St = 0.113$$

Alin ominaismuoto (SFS-EN 1991-1-4, kaava F.13)

$$\Phi_1(z) := \left(\frac{z}{h}\right)^\zeta$$

Taivutusvärähtelyn alin ominaismuoto,
missä z = korkeus maanpinnan yläpuolella



Ekvivalentti massa (SFS-EN 1991-1-4, kaava F.14)

$$m_m(z) := m_d \cdot d \cdot b$$

$$m_e := \frac{\int_0^h m_m(s) \cdot (\Phi_1(s))^2 ds}{\int_0^h (\Phi_1(s))^2 ds}$$

Ekvivalentti massa alimman ominaismuodon
pituusyksikkö kohti

$$m_e = 2.916 \times 10^5$$

Scrutonin luku Sc (SFS-EN 1991-1-4, kaava E.4)

$$Sc := \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_e}{\rho \cdot b^2} = 81$$

Rakennekertoimen määrittämiseen käytettävä nopeuspainekorkeus
(SFS-EN 1991-1-4, kuva 6.1)

$$z_s := \begin{cases} (0.6 \cdot h) & \text{if } h \geq z_{\min} \\ z_{\min} & \text{if } h < z_{\min} \end{cases}$$

$$z_s = 42$$

Modifioitu tuulenopeuden perusarvo (SFS-EN 1991-1-4, kaava 4.3)

$$v_m := c_r \cdot c_0(z_s) \cdot v_b$$

Maaston rosoisuus (SFS-EN 1991-1-4, kaava 4.4)

$$c_r := k_r \cdot \ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right)$$

Maaston rosoisuusmitta (SFS-EN 1991-1-4, kaava 4.5)

$$k_r := 0.19 \cdot \left(\frac{z_0}{0.050}\right)^{0.07} = 0.156$$

(HUOM! jos maastoluokka on 0, niin $k_r = 0,18$)

$$c_r := k_r \cdot \ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right) = 1.718 \quad k_{rw} := 0.18$$

$$c_0(z_s) := 1 \quad \text{Pinnanmuotokerroin}$$

$$v_m := c_r \cdot v_b \cdot c_0(z_s) = 36.087$$

$$v_{m1}(z_s) := k_r \cdot \ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right) \cdot v_b \cdot c_0(z_s)$$

Pyörreratailmiön vaikutukset tulee tutkia, kun tuulta vastaan kohtisuorassa tasossa rakenteen suurimman mitan suhde pienimpään mittaan on yli 6 (SFS-EN 1991-1-4, kohta E.1.2(1)).

$$\frac{h}{d} = 2.593$$

Pyörreratailmiön vaikutusta ei tarvitse tutkia, kun (SFS-EN 1991-1-4, kohta E.1.2(2)):

$$v_{\text{crit}} > 1.25 \cdot v_m$$

$$1.25 \cdot v_m = 45.109$$

$$\eta_1 := \frac{46}{h} = 0.657 \quad \text{Hz} \quad \text{Suositellaan käytettäväksi jotain tarkempaa menetelmää ominaistajuuden laskemiseksi}$$

$$v_{\text{crit}} := \frac{b \cdot \eta_1}{St} = 140.19$$

Huippuarvokerroin (SFS-EN 1991-1-4, kaava E.17)

$$k_p := \sqrt{2} \cdot \left[1 + 1.2 \cdot \text{atan} \left[0.75 \cdot \left(\frac{Sc}{4 \cdot \pi \cdot K_{a,\text{max}}} \right)^4 \right] \right] = 2.746$$

Vakiot c1 ja c2 (SFS-EN 1991-1-4, kaava E.16)

$$c_1 := \frac{a_L^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{Sc}{4 \cdot \pi \cdot K_{a,\text{max}}} \right) = -5.944 \times 10^{-3}$$

$$c_2 := \frac{\rho \cdot b^2}{m_e} \cdot \frac{a_L^2}{K_{a,\text{max}}} \cdot \frac{C_s^2}{St^4} \cdot \frac{b}{h} = 2.255 \times 10^{-4}$$

Siirtymän keskihajonta (SFS-EN 1991-1-4, kaava E.15)

$$\sigma_y := b \cdot \sqrt{c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}} = 2.425 \text{ m}$$

Suurin siirtymä:

$$x_{\text{def.max}} := \sigma_y \cdot k_p = 6.659 \text{ m}$$

Suurin kiihtyvyys:

$$a_{\text{max}} := (2 \cdot \pi \cdot \eta_1)^2 \cdot x_{\text{def.max}} = 113.517 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Tulokset ovat varsin epänojhdonmukaisia, millaisia siirtymiä ja kiihtyvyyksiä on odotettavissa. Kyseinen rakennus ei tarvitse Eurokoodin mukaisia tarkasteluja molempien ehtojen E.1.2(1) ja E.1.2(2) perusteella, joten sitä seuraavat värähdystarkastelut eivät välttämättä sovellu. Voi myös olla, että Eurokoodin tarkastelut ovat tarkoitettu todella hoikille rakenteille, kuten savupiipuille, evätkä ne sovellu rakennuksen tarkasteluun.

Pyörteiden irtoamisen taajuus (Taranath, 2010, 262-263 s.)

$$f_p := \frac{v_m \cdot St}{b} = 0.169$$

Tarkistetaan, ettei taajuus osu rakennuksen ominaistajuuden alueelle

$$\eta_1 = 0.657$$

Poikkisuuntaisen värähtelyn mitoitus, Simiu & Scanlan

$$C_s := 0.0006$$

$$n := 3.5$$

$$A_s := b \cdot d = 648$$

$$\beta_c := 6.5$$

Avoimella maastoalueella

$$T_s := 3600$$

1 tunnin mitoitusjakso

$$\sigma_{ys} := \frac{\sqrt{A_s}}{K_{xs}} \cdot C_s \cdot \left(\frac{V_H}{\eta_1 \cdot \sqrt{A_s}} \right)^n \cdot \frac{1}{\zeta} \cdot \frac{\rho}{m_d}$$

Siirtymien keskihajonnan kaava

$$z_d := 0$$

$$V_H := \frac{v_b}{1.07} \cdot \sqrt{0.5 \cdot \left(\frac{h}{10} \right)^{0.28}} = 18.224$$

National Building code of Canada 2005
 Altistusluokka A (avoin maasto)
 jakaja = 10
 eksponentti = 0,28

$$Q := 2 \cdot \left(1 - \frac{z_d^2}{h^2} \right) \cdot \ln \left(\frac{h - z_d}{z_0} \right) - 1 = 19.115$$

$$\beta := \frac{6.71 \cdot Q^2}{1 + 0.26 \cdot \left(\frac{b}{h} \right)} = 2.251 \times 10^3$$

$$u_s := \frac{v_{m1}(10) \cdot 1.07}{2.5 \cdot \ln \left(\frac{10}{z_0} \right)} = 1.618$$

$$f_1 := \eta_1 \cdot \frac{h}{u_s} = 28.433$$

$$C(x) := \frac{1}{x} - \frac{1}{2 \cdot x^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot x})$$

$$x_2 := 3.55 \cdot \frac{f_1}{Q} \quad x_1 := 12.32 \cdot \frac{f_1}{Q} \cdot \frac{d}{h} = 7.068$$

$$C_w := 0.8 \quad C_1 := 0.5$$

$$C_D := C_w + C_1 = 1.3$$

$$C_{Df} := C_w^2 + 2 \cdot C_w \cdot C_1 \cdot C(x_1) + C_1^2 = 0.995$$

$$R_s := 0.59 \cdot \frac{Q^2}{\left(\frac{\delta_s}{2 \cdot \pi}\right)} \cdot \left(\frac{Q}{f_1}\right)^{\left(\frac{2}{3}\right)} \cdot \frac{C_{Df}}{C_D^2} \cdot C(x_2) \cdot \frac{1}{1 + 3.95 \cdot \left(\frac{f_1}{Q}\right) \cdot \left(\frac{b}{h}\right)} = 348.151$$

$$v_x := \eta_1 \cdot \left(\frac{R_s}{\beta_c \cdot \frac{6}{6} + R_s}\right)^{\frac{1}{2}} = 0.232$$

$$K_{xs} := \left(1.175 + 2 \cdot \ln(v_x \cdot T_s)\right)^{\frac{1}{2}} = 3.825$$

$$\sigma_{ys} := \frac{\sqrt{A}}{K_{xs}} \cdot C_s \cdot \left(\frac{V_H}{\eta_1 \cdot \sqrt{A}}\right)^n \cdot \frac{1}{(0.016)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{\rho}{m_d} = 1.183 \times 10^{-4}$$

$$a_{max} := (2 \cdot \pi \cdot \eta_1)^2 \cdot (\sigma_{ys} \cdot K_{xs}) = 7.716 \times 10^{-3}$$

$$a_{max\%} := \frac{a_{max}}{9.81} \cdot 100 = 0.079 \quad \%$$

Kiihityvyyden arvo %-osuutena
maan vetovoimakihtyvyydestä

Tuulen Weibull-jakautuneen nopeushistorian generointi

$$v_m := 24$$

Tuulen keskinopeus [m/s]
Saatu ICON Suurpellon
tuuliselvityksestä

$$I_v := 0.14$$

Tuulen intensiteetti

$$rms := v_m \cdot I_v = 3.36$$

Turbulenssin neliöllinen keskiarvo
(Root mean square)

$$k := 3.4$$

Muotokerroin

$$t := 600$$

Kuormitusaika 10 minuuttia (600s)

$$d_t := 1$$

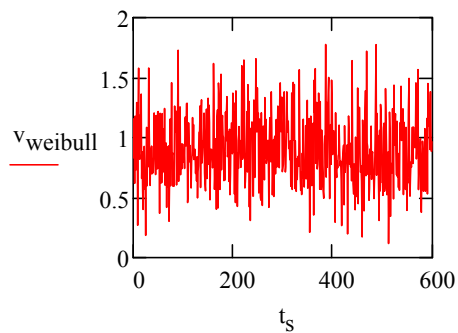
Tarkasteluväli 1 sekuntia

$$v_{\text{weibull}} := \text{rweibull}\left(\frac{t}{d_t}, k\right)$$

Palauttaa arvoksi vektori t:n, joka
saa satunnaisesti generoituja arvoja
Weibull-jakauman mukaisesti käyttäen k
muotokerrointa

$$t_s := 0..(t-1) =$$

...

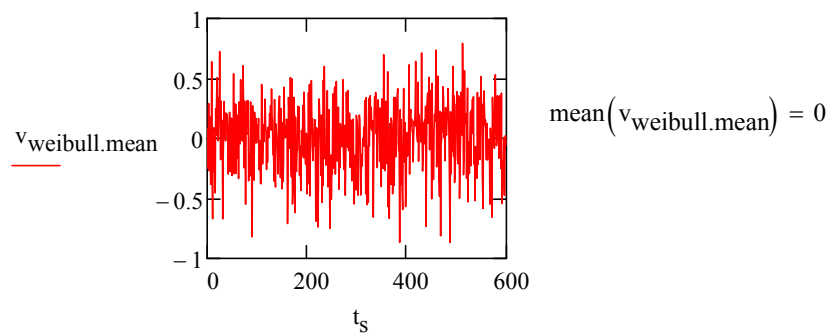


Satunnaisesti luotuja arvoja,
jotka noudattavat Weibull-jakaumaa.
Arvojen keskiarvo 0,909

$$\text{mean}(v_{\text{weibull}}) = 0.909$$

Generoidaan uusi jakauma, jossa jokaisen ajan hetkea vastaava arvo vähennetään keskiarvosta. Uuden jakauman keskiarvo on 0

$$v_{\text{weibull.mean}} := (\text{mean}(v_{\text{weibull}}) - v_{\text{weibull}})$$



Lasketaan Weibull-jakautuneen satunnaisesti generoidun datan neliöllinen keskiarvo

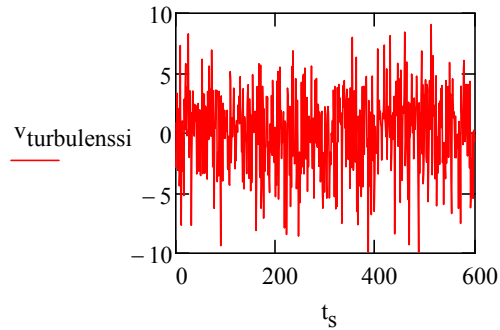
$$\text{rms}_{\text{weibull}} := \sqrt{\text{mean}\left[\left(\text{mean}(v_{\text{weibull.mean}}) - v_{\text{weibull.mean}}\right)^2\right]} = 0.294$$

Satunnaisesti generoidun Weibull-jakauman neliöllisen keskiarvon suhde ICON Suurpellon tuuliselvityksen antamaan turbulenssin neliölliseen keskiarvoon:

$$\text{rms}_{\text{suhde}} := \frac{\text{rms}}{\text{rms}_{\text{weibull}}} = 11.44$$

Kerrotaan tällä arvolla weibull-jakauman arvoja, jotta saadaan tulokset skaalattua todellista tilanetta vastaaviksi

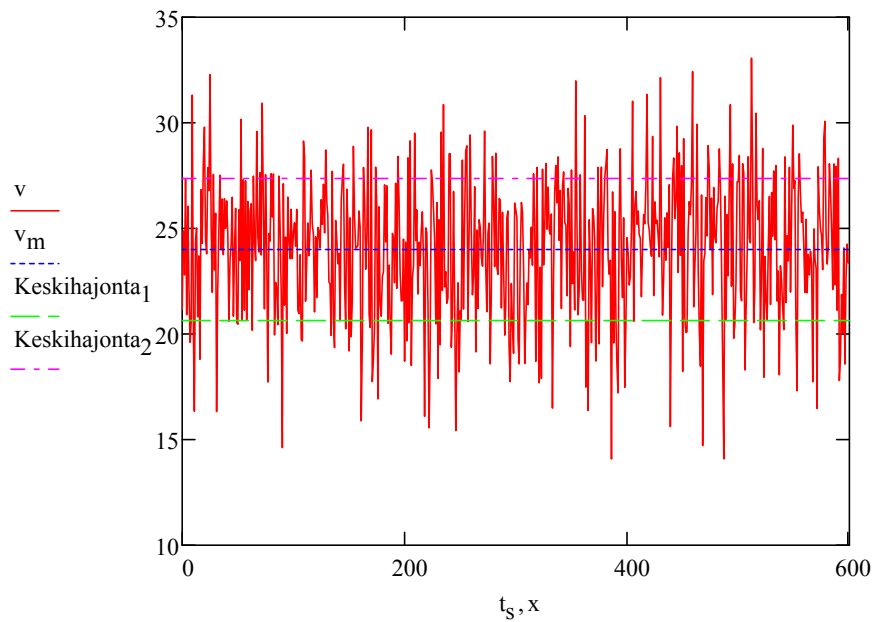
$$v_{\text{turbulenssi}} := \text{rms}_{\text{suhde}} \cdot v_{\text{weibull.mean}}$$



Lisätään turbulenssin vaikutus tuulenopeuden keskiarvoon (24 m/s)

$$v := v_{\text{turbulenssi}} + v_m \quad x := 0..600 \quad \text{Keskihajonta}_1 := v_m - \text{rms}$$

$$\text{Keskihajonta}_2 := v_m + \text{rms}$$



$$\text{mean}(v) = 24$$

$$\text{rms}_v := \sqrt{\text{mean}[(\text{mean}(v) - v)^2]} = 3.36$$

	0
0	21.154
1	24.871
2	22.792
3	27.321
4	20.912
5	26.052
v = 6	22.351
7	19.608
8	20.545
9	31.313
10	20.109
11	16.338
12	24.4
13	...

$$v_{\max} := \max(v) = 33.059$$

1 v toistumisvälin tuuli ja tuulen puuskanopeuspaineet rakennesuunnitteluun

Symboli	Yks.	Tuulen suuntakulma															Kommentti	Viite		
		0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315			337.5	
V_{mr}	m/s	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8	keskituulen perusarvo (10 min, 10 m, 50 v, z_{0r})	Tuulitilatost	
k		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	toistumisvälin kerroin	BS 6399-2: 1997	
V_{ref}	m/s	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	1 v toistumisvälin tuuli		
u^*_r	m/s	1.139	1.139	1.139	1.139	1.139	1.139	1.139	1.139	1.139	1.139	1.139	1.139	1.139	1.139	1.139	1.139	kitkanopeus (friction velocity) vastaten z_{0r}		
z_{0r}	m	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	rosoisuusmitta (roughness length) keskituulen perusarvoon liittyen	ESDU	
z_{01}	m	0.3	0.3	0.3	0.3	0.03	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.1	0.7	0.7	0.3	0.3	0.3	kohdealueen ympäristössä	Eurokoodi	
$(z_{01}/z_{0r})^{0.07}$	m/s	1.380	1.380	1.380	1.380	1.175	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.278	1.465	1.465	1.380	1.380	1.380			
u^*_1	m/s	1.572	1.572	1.572	1.572	1.338	1.139	1.139	1.139	1.139	1.139	1.139	1.456	1.668	1.668	1.572	1.572	kitkanopeus vastaten z_{01}	Eurokoodi, Simiu & Scanlan	
$lv(z=10\text{ m})$		0.29	0.29	0.29	0.29	0.17	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.22	0.38	0.38	0.29	0.29	0.29	turbulenssin intensiteetti	Eurokoodi	
$lv(z=26\text{ m})$		0.22	0.22	0.22	0.22	0.15	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.18	0.28	0.28	0.22	0.22	0.22			
$lv(z=42\text{ m})$		0.20	0.20	0.20	0.20	0.14	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.17	0.24	0.24	0.20	0.20	0.20			
$lv(z=70\text{ m})$		0.18	0.18	0.18	0.18	0.13	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.15	0.22	0.22	0.18	0.18	0.18			
$vm(z=10\text{ m})$	m/s	14	14	14	14	19	23	23	23	23	23	17	11	11	14	14	14	10 min keskituuli	Eurokoodi	
$vm(z=26\text{ m})$	m/s	18	18	18	18	23	26	26	26	26	26	20	15	15	18	18	18			
$vm(z=42\text{ m})$	m/s	19	19	19	19	24	27	27	27	27	27	22	17	17	19	19	19			
$vm(z=70\text{ m})$	m/s	21	21	21	21	26	29	29	29	29	29	24	19	19	21	21	21			
$vh(z=10\text{ m})$	m/s	13	13	13	13	18	22	22	22	22	22	16	10	10	13	13	13	tunnin keskituuli	Simiu & Scanlan	
$vh(z=26\text{ m})$	m/s	16	16	16	16	21	25	25	25	25	25	19	14	14	16	16	16			
$vh(z=42\text{ m})$	m/s	18	18	18	18	23	26	26	26	26	26	21	16	16	18	18	18			
$vh(z=70\text{ m})$	m/s	20	20	20	20	25	28	28	28	28	28	23	18	18	20	20	20			
$v(z=10\text{ m})$	m/s	24	24	24	24	29	32	32	32	32	32	27	21	21	24	24	24	puuskatuuli	Eurokoodi	
$v(z=26\text{ m})$	m/s	28	28	28	28	32	34	34	34	34	34	30	26	26	28	28	28			
$v(z=42\text{ m})$	m/s	30	30	30	30	34	36	36	36	36	36	32	28	28	30	30	30			
$v(z=70\text{ m})$	m/s	32	32	32	32	36	37	37	37	37	37	34	30	30	32	32	32			
z_{02}	m	0.03	0.03	0.03	0.03	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.7	3.0	3.0	0.1	0.3	0.3	kohdealueella	Eurokoodi	
$(z_{02}/z_{01})^{0.07}$		0.851	0.851	0.851	0.851	1.175	1.380	1.380	1.380	1.380	1.380	1.146	0.942	0.873	1.000	1.000	0.851			
u^*_2	m/s	1.338	1.338	1.338	1.338	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.668	1.572	1.456	1.572	1.572	1.338	kitkanopeus vastaten z_{02}		
$lv(z=10\text{ m})$		0.17	0.17	0.17	0.17	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.38	0.29	0.22	0.29	0.29	0.17	turbulenssin intensiteetti	Eurokoodi	
$lv(z=26\text{ m})$		0.15	0.15	0.15	0.15	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.28	0.22	0.18	0.22	0.22	0.15			
$lv(z=42\text{ m})$		0.14	0.14	0.14	0.14	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.24	0.20	0.17	0.20	0.20	0.14			
$lv(z=70\text{ m})$		0.13	0.13	0.13	0.13	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.18	0.15	0.18	0.18	0.13			
$vm(z=10\text{ m})$	m/s	19	19	19	19	14	14	14	14	14	14	11	14	14	14	14	19	10 min keskituuli	Eurokoodi	
$vm(z=26\text{ m})$	m/s	23	23	23	23	18	18	18	18	18	18	15	18	20	18	18	23			
$vm(z=42\text{ m})$	m/s	24	24	24	24	19	19	19	19	19	19	17	19	22	19	19	24			
$vm(z=70\text{ m})$	m/s	26	26	26	26	21	21	21	21	21	21	19	21	24	21	21	26			
$vh(z=10\text{ m})$	m/s	18	18	18	18	13	13	13	13	13	13	10	13	16	13	13	18	tunnin keskituuli	Simiu & Scanlan	
$vh(z=26\text{ m})$	m/s	21	21	21	21	16	16	16	16	16	16	14	16	19	16	16	21			
$vh(z=42\text{ m})$	m/s	23	23	23	23	18	18	18	18	18	18	16	18	21	18	18	23			
$vh(z=70\text{ m})$	m/s	25	25	25	25	20	20	20	20	20	20	18	20	23	20	20	25			
$v(z=10\text{ m})$	m/s	29	29	29	29	24	24	24	24	24	24	21	24	27	24	24	29	puuskatuuli	Eurokoodi	
$v(z=26\text{ m})$	m/s	32	32	32	32	28	28	28	28	28	28	26	28	30	28	28	32			
$v(z=42\text{ m})$	m/s	34	34	34	34	30	30	30	30	30	30	28	30	32	30	30	34			
$v(z=70\text{ m})$	m/s	36	36	36	36	32	32	32	32	32	32	30	32	34	32	32	36			
Maaston rosoisuuden muutoksen ($z_{01} \rightarrow z_{02}$) vaikutus ESDU85020 mukaisesti																				
x	m	2000	1000	600	200	18000	16000	4500	4000	5000	19000	3000	5000	1000	1000	5000	1500	etäisyys muutoskohtaan		
zi	m	44	22	13	4	414	379	146	134	158	431	133	229	26	70	350	33	sis. rajakerroksen korkeus		
$lv(z=10\text{ m})$		0.22	0.22	0.23	0.24	0.26	0.25	0.23	0.23	0.23	0.25	0.32	0.31	0.28	0.29	0.29	0.22			
$lv(z=26\text{ m})$		0.18	0.19	0.20	0.21	0.21	0.20	0.18	0.18	0.18	0.20	0.23	0.24	0.23	0.22	0.22	0.19			
$lv(z=42\text{ m})$		0.17	0.18	0.18	0.19	0.19	0.18	0.17	0.17	0.17	0.19	0.21	0.22	0.21	0.20	0.20	0.18			
$lv(z=70\text{ m})$		0.16	0.17	0.17	0.18	0.17	0.17	0.15	0.14	0.15	0.17	0.18	0.19	0.20	0.18	0.18	0.17			
10 min keskituuli																				
$vm(z=10\text{ m})$	m/s	17	16	16	15	15	16	17	16	15	13	13	14	14	14	16	16			
$vm(z=26\text{ m})$	m/s	19	19	19	18	19	19	21	21	19	17	17	17	18	18	19	19			
$vm(z=42\text{ m})$	m/s	21	20	20	20	21	21	23	23	21	19	18	18	19	19	21	21			
$vm(z=70\text{ m})$	m/s	22	22	22	22	23	24	25	25	23	22	20	20	21	21	22	22			
Tunnin keskituuli																				
$vh(z=10\text{ m})$	m/s	15	15	15	14	14	14	15	15	14	12	12	12	13	13	15	15			
$vh(z=26\text{ m})$	m/s	18	18	18	17	18	18	20	20	18	16	15	15	16	16	18	18			
$vh(z=42\text{ m})$	m/s	20	19	19	19	20	20	22	22	20	18	17	17	18	18	19	19			
$vh(z=70\text{ m})$	m/s	21	21	21	20	22	22	24	24	22	20	19	19	20	20	21	21			
Puuskatuuli (EN1991-1-4:2005 puuskamäärittely)																				
$v(z=10\text{ m})$	m/s	26	26	25	25	25	27	27	26	25	23	23	24	24	24	26	26	n. 1 s huippuarvo		
$v(z=26\text{ m})$	m/s	29	29	29	28	29	30	32	32	31	30	28	27	27	28	28	29			
$v(z=42\text{ m})$	m/s	31	31	31	30	32	32	34	34	34	32	31	29	29	30	31	31			
$v(z=70\text{ m})$	m/s	33	33	33	33	34	35	36	36	36	35	33	31	31	32	32	33			
Puuskatuulen nopeuspaine (EN1991-1-4:2005 puuskatuulimäärittely): ilman tiheys = 1,30 kg/m³																				
$q(z=10\text{ m})$	kN/m ²	0.45	0.43	0.42	0.40	0.40	0.41	0.46	0.46	0.45	0.41	0.34	0.35	0.37	0.37	0.37	0.44	50 v toistumisväli	NA	
<																				