



TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta

Matti Savolainen

VAAKAMITTAUSTEKNIIKAN KEHITTÄMINEN KORKEIDEN RAKEN-
NUSTEN VÄRÄHTELYTARKASTELUUN

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tut-
kintoa varten Espoossa 4.5.2009.

TKK
Rakennus- ja
ympäristötekniikan kirjasto

Valvoja

Professori Jari Puttonen

Ohjaaja

Tekniikan tohtori Risto Kiviluoma

Tekijä:	Savolainen, Matti Lassipoika		
Diplomityö:	Vaakamittaustekniikan kehittäminen korkeiden rakennusten värähtelytarkasteluun		
Päivämäärä:	4.5.2009	Sivumäärä:	95+20
Professori:	Talonrakennustekniikka	Koodi:	Rak-43
Valvoja:	Professori Jari Puttonen		
Ohjaaja:	Tekniikan tohtori Risto Kiviluoma		
Avainsanat:	Korkea rakennus, korkeataajuinen vaakamittaustekniikka, moodisummausmenetelmä, ominaisuusmuoto, ominaistaajuus, rajakerrostuulitunneli, spektritiheys, tuulikuorma, värähtely.		

Korkealle rakennukselle tuuli on mitoitukseen merkittävästi vaikuttava kuormitus, joka staattisen rasituksen ohella voi synnyttää rakenteeseen myös värähtelyä. Korkeiden rakennusten tuulitekniinen suunnittelu suunnitteluohjeilla voi olla epätarkkaa tai mahdotonta johtuen tuulen ja rakennuksen välisen vuorovaikutuksen monimutkaisuudesta sekä rakennuksen ja sen ympäristön yksilöllisyydestä. Tästä syystä tuulen vaikutukset rakennukseen joudutaan selvittämään osittain tuulitunnelikokeilla.

Tässä työssä tutkittiin tuulikuorman määrittystä tuulitunnelissa korkeataajuisella vaakamittaustekniikalla. Mittaustekniikassa kevyestä materiaalista tehty jäykkä pienoismalli kiinnitetään rajakerrostuulitunneliin sijoitettavan herkän korkean ominaistaajuuden (2,3-8 kHz) omaavan vaa'an päälle. Tuulikuormien hallitseva taajuusalue on 0-1 Hz. Työssä määritettiin esimerkkirakennuksen tuulikuormat ja tuulen aiheuttamat värähtelyt. Sekä tuulikuormat että tuulen aiheuttamat värähtelyt onnistuttiin määrittämään mittaustekniikan avulla nopeasti ja tarkasti. Työn perusteella määrittämiseen tarvittava aika uuden rakennuksen suunnittelussa on noin 2-3 viikkoa ja määrittystä voidaan pitää luotettavana noin 70-100 m korkeille talorakennuksille. Työssä tehtiin myös eurokoodin mukaiset vertailulaskelmat esimerkkirakennukselle, jotka osoittivat, että tuulikuormien osalta eurokoodilla saatiin reilusti varmallalla puolella olevia tuloksia. Suurimmillaan eurokoodi antoi yli 30 % suurempia tuulikuorman arvoja kuin mittaukset. Värähtelyjen osalta eurokoodin mukaiset tulokset olivat samaa suuruusluokkaa mittauksista saatujen tulosten kanssa. Jos värähtelyt halutaan määrittää tarkemmin on suositeltavaa suorittaa myös tuulitunnelikokeet.

Mittaustekniikan suurin hyöty on, että se on nopea tapa määrittää tuulikuormat ja värähtelyt, minkä takia se soveltuu hyvin osaksi suunnitteluprosessia. Mittaustekniikalla saadaan myös tarkempia ja laajempia tuloksia kuin eurokoodilla. Mittaustekniikan huono puoli on se, että sähköiset häiriöt voivat pahimmillaan estää kokonaan luotettavien tulosten saamisen. Kun häiriöt saadaan pidettyä pienenä, on korkeataajuinen vaakamittaustekniikka nopea ja luotettava tapa selvittää tuulikuormat ja tuulen aiheuttamat värähtelyt.

Author:	Savolainen, Matti Lassinpoika		
Thesis:	Developing of Force Balance Method to Vibration Studies of Tall Buildings		
Date:	May 4, 2009	Pages:	95+20
Professorship:	Structural Engineering	Chair code:	Rak-43
Supervisor:	Jari Puttonen, Professor		
Instructor:	Risto Kiviluoma, Dr. Sc. (Tech.)		
Key Words:	High frequency force balance method, mode-sum method, mode shape, natural frequency, boundary layer wind-tunnel, spectral density, tall building, wind load, vibration.		

Wind affects outstandingly the design of tall buildings because it induces static stress and can also induce vibrations to the structure. Because interaction between the wind and the building can be complex, it can be impossible to design the effects of wind on tall buildings in accordance with design standards. Not only is the interaction a factor but also the individuality of the building and its surroundings. Due to these factors, the effects of wind must be determined partly by wind-tunnel tests.

This thesis examines the determination of wind load in wind-tunnel according to the high frequency force balance method. In this method, a light and rigid model is mounted to a high frequency (2,3-8 kHz) balance. The dominant frequency band of wind is 0-1 Hz. This thesis evaluated wind loads and wind-induced vibrations of model buildings. The evaluation of the wind loads and vibrations alike succeeded quickly and exactly. According to this thesis, it takes 2-3 weeks to determine wind loads and wind-induced vibrations of a new tall building, and the determination is reliable for buildings with a height of 70-100 m. In addition, wind loads and vibrations were calculated according to eurocode. Wind loads calculated by eurocode were well on the safe side. In some cases, wind loads calculated by eurocode exceeded the wind-tunnel test results by over 30 %. Wind-induced vibrations calculated by eurocode were only suggestive. In order to obtain more exact wind-induced vibration results, it is recommended that wind-tunnel tests be evaluated.

The most considerable advantage of the high frequency force balance method is that it is a very quick method for determining wind loads and vibrations. Therefore, the method is well suited to the planning process. With the high frequency force balance method, more accurate and extensive results were obtained than with eurocode. One disadvantage of the method is that, in the worst case, electric failures can wholly prevent obtaining reliable results. The high frequency force balance method is a quick and reliable method for determining wind loads and wind-induced vibrations, as long as electrical failures are small.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty WSP Finland Oy:n palveluksessa. Haluan kiittää työni valvojana toiminutta talonrakennustekniikan professori Jari Puttosta. Haluan kiittää työni ohjaajana toiminutta tekniikan tohtori Risto Kiviluomaa mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta ja hyvästä ohjauksesta. Lisäksi haluan kiittää WSP Finland Oy:tä ja erityisesti esimiestäni Sami Lampista työni rahoituksen ja puitteiden järjestämisestä. Haluan kiittää myös Mika Hurmetta ja muuta TKK:n aerodynamiikan laboratorion henkilökuntaa avusta. Lopuksi haluan osoittaa tasapuoliset kiitokseni kaikille henkilöille, jotka ovat antaneet työhöni liittyen arvokkaita neuvoja.

Espoossa 4.5.2009



Matti Savolainen

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	11
1.1	Tutkimuksen tausta	11
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset	12
2	TUULEN VAIKUTUS KORKEISIIN RAKENNUKSIIN	14
2.1	Tuulen ja turbulenssin ominaisuudet	14
2.2	Ominaistaajuuksien vaikutus rakennuksen värähtelyyn.....	16
2.3	Tuulen aiheuttama värähtely.....	18
2.4	Ihmisten viihtyvyys rakennuksen huojuessa.....	20
3	RAKENNUSRUNGON VÄRÄHTELYJEN PERUSTEET	25
3.1	Usean vapausasteen värähtelysystemi.....	25
3.1.1	Johdanto	25
3.1.2	Moodi-summausmenetelmä	26
3.2	Satunnaisvärähtely	30
3.2.1	Määritelmiä	30
3.2.2	Korrelaatio ja tehospektritiheys	32
3.2.3	Yhden vapausasteen värähtelysystemin tehospektritiheys.....	33
3.3	Tuulikuorman spektritiheyden määrittämisen analyyttiset menetelmät	34
3.3.1	Johdanto	34
3.3.2	Tuulenpuuskaisuuden spektritiheys	35
3.3.3	Tuulikuorman spektritiheys	37
3.3.4	Kiihtyvyyksien ja vasteen huippuarvon määrittäminen.....	38
4	TUULITUNNELITEKNIIKAT	41
4.1	Johdanto	41
4.2	Rajakerrostuulitunneli	41
4.3	Mittausmenetelmät ja välineet	44
4.3.1	Jäykkä painemalli.....	44
4.3.2	Aeroelastinen malli	45
4.3.3	Korkeataajuinen vaakamittaustekniikka	46
5	KORKEATAAJUISEN VAAKAMITTAUSTEKNIIKAN SOVELTAMINEN KORKEIDEN RAKENNUSTEN TUULIVASTEIDEN MÄÄRITTÄMISEEN	49
5.1	Tuulikuormien määrittäminen.....	49

	5.2 Rakennusrungon värähtelyjen määrittäminen.....	52
6	CASE – 100 METRIÄ KORKEA SUORAKAITEEN MUOTOINEN RAKENNUS	58
	6.1 Tutkittava rakennus	58
	6.1.1 Rakennejärjestelmä	58
	6.1.2 Ominaismuodot ja – taajuudet	59
	6.2 Tuulitunnelikokeet.....	61
	6.2.1 Koejärjestelyt	61
	6.2.2 Mittaustulokset.....	67
	6.2.3 Virhetarkastelu	76
	6.3 Eurokoodin mukainen analyyttinen tarkastelu	81
	6.3.1 Tulokset.....	81
	6.3.2 Johtopäätökset eurokoodin mukaisesta analyyttisestä tarkastelusta.....	83
	6.4 Tulosten vertailu	83
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET	86
8	YHTEENVETO	89

LIITTEET

- A HARMONISEN HERÄTTEEN KUORMITTAMAN YHDEN VAPAUASASTEEN VÄRÄHTELYSYSTEMIN RATKAISEMINEN
- B FOURIER-MUUNNOKSET
- C SKAALAUASKERTOIMIEN MUODOSTAMINEN
- D TUULITUNNELIKOKEEN KALIBROINTIMATRIISIN MÄÄRITÄMINEN
- E EUROKOODIN MUKAISET VERTAILULASKELMAT

SYMBOLILUETTELO

A	pinta-ala
A_1, A_2	vakio
B^2	taustapyörteiden vaikutusparametri
C	yleistetty vaimennus
C_c	kriittinen vaimennus
C_D	voimakerroin
c	vaimennuskerroin
c_d	dynaaminen kerroin
c_f	voimakerroin
c_{f0}	voimakerroin, kun vapaan pään ohittava virtaus jätetään huomioimatta
c_{prob}	todennäköisyyskerroin
c_{pe}	ulkoisen paineen kerroin
c_r	rosoisuuskerroin
c_s	koon vaikutuskerroin
$c_s c_d$	rakennekerroin
c_0	pinnanmuotokerroin
b	rakennuksen tuulta vastaan kohtisuoran sivun mitta
d	rakennuksen tuulensuuntaisen sivun mitta
F	kuorma
F_{fr}	kitkakuorma
F_{Qs}	kvasistaattinen tuuli kuorma
F_m	staattinen tuulikuorma
F_w	kokonaistuulikuorma
$F_{w,e}$	ulkopuolinen tuulikuorma
$F_{w,i}$	sisäpuolinen tuulikuorma
f	taajuus
f_L	dimensioton taajuus
g	huippuarvokerroin
h	rakennuksen korkeus
$H(\bar{\omega})$	taajuusvastefunktio
I, I_v	tuulenpuuskien intensiteetti
J	hitausmomentti

K	yleistetty jäykkyys
K_x	dimensioton kerroin
k	jäykkyyskerroin
k_l	pyörteisyyserroin
k_r	maastokerroin
L, L_u	tuulenpyörteen ulottuvuus
M	yleistetty massa
m	massa
m_e	ekvivalentti massa pituusyksikköä kohti
n_l	alin ominaistajuus
P	yleistetty kuorma
q	yleistetty koordinaatti
q_p	puuskanopeuspaine
q_{pm}	nopeuspaine
R	autokorrelaatio
R^2	resonanssivasteen vaikutusparametri
R_h, R_b	aerodynaamiset siirtokerroinfunktiot
r	taajuussuhde
S	tehospektritiheys, spektritiheys
S_L	tehospektrin tiheysfunktio
$S_U(f)$	tuulenpuuskaisuuden spektritiheys
T	aika
u	jännite
U	tuulennopeus
\bar{U}	tuulennopeuden keskinopeus
u_m	tuulennopeuden heilahtelukomponentti
v	tuulennopeus, virtausnopeus
v_b	tuulennopeuden perusarvo 10 metrin korkeudella
$v_{b,0}$	tuulennopeuden modifioimaton perusarvo
$v_{crit,i}$	ominaismuotoa i vastaava kriittinen tuulennopeus
v_m	tuulennopeuden modifioitu perusarvo
w_e	ulkopuolinen tuulenpaine
x_{rms}	neliöllinen keskiarvo
\hat{x}	vasteen huippuarvo

\bar{x}	keskiarvo
z	korkeus, jossa tuulennopeutta tarkastellaan
z_s	rakennekertoimen määrittämiseen käytettävä nopeuspainekorkeus
z_0	rosoisuusmitta
β	dynaaminen suurennustekijä
δ	logaritminen dekrementti
δ_a	aerodynaamisen vaimennuksen logaritminen dekrementti ensimmäisessä ominaisuudessa
δ_d	erityislaitteista aiheutuvan vaimennuksen logaritminen dekrementti
δ_s	sisäisen vaimennuksen logaritminen dekrementti
φ_e	kerroin, joka ottaa huomioon sen, että rakennuksen etu- ja takapuolella esiintyvien paine- ja imuvoimien huippuarvot eivät esiinny samaan aikaan.
λ	tehollinen hoikkuus
ν	resonanssitaajuus/tehollinen taajuus
θ	vaihekulma
ρ	ilmantiheys
σ	keskihajonta
σ_a	kiihtyvyyden keskihajonta
σ^2	variassi
σ_u, σ_v	turbulenssin keskihajonta
η	geometrinen mittakaava
η_h, η_b	aerodynaamisten siirtokerroinfunktioiden määrittämiseen tarvittavat kertoimet
θ	vaihekulma
Φ	ominaismuoto
ω	ominaiskulmataajuus
$\bar{\omega}$	herätteen kulmataajuus
ω_d	vapaan vaimennetun värähtelyn kulmataajuus
ψ_r	pienennyskerroin neliöpoikkileikkaukselle, jonka särmät on pyöristetty
ψ_λ	päätevaikutuskerroin
ζ	vaimennussuhde
φ	ominaisarvo
χ	aerodynaaminen admittanssi

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Tuuli synnyttää korkeisiin rakennuksiin värähtelyä, jota ei matalammissa rakennuksissa havaita. Tuulen vaikutuksesta korkea rakennus voi värähdellä tuulen suuntaan, tuulta vastaan kohtisuoraan tai vääntyä. Värähtelyn seurauksena ihmiset voivat tuntea olonsa epämukavaksi. Korkeiden rakennusten suunnittelussa ihmisten tuntemukset ovatkin usein jäykistyksen mitoitettava tekijä. Tuulitekniikan kannalta korkeana rakennuksena pidetään tavallisesti yli 70 metriä korkeita rakennuksia tai niitä matalampia, mutta oleellisesti muuta rakennuskantaa korkeampaa rakennusta.

Tuulikuormien ja tuulen aiheuttamien värähtelyjen määrittämiseen on olemassa suunnitteluohjeita, joita voidaan käyttää hyödyksi. Suunnitteluohjeet voivat kuitenkin olla puutteellisia ja lisäksi yhä useammat rakennukset ovat niin yksilöllisiä, että niiden suunnittelu suunnitteluohjeiden avulla voi olla epätarkkaa tai mahdotonta. Näissä tapauksissa tuulen aiheuttamat rasitukset ja värähtelyt tulee määrittää muilla tavoin, kuten tuulitunnelikokeilla. Tuulitunnelikokeet ovat luotettava ja tarkka keino selvittää rakennukseen kohdistuvat tuulenpaineet, kokonaistuulikuormat ja tuulen aiheuttamat värähtelyt. Tuulitunnelikokeet perustuvat paine- ja aeroelastisiin malleihin sekä korkeataajuiseen vaakamittaustekniikkaan. Korkeataajuinen vaakamittaustekniikka on saavuttanut suosiota, koska se on yksinkertainen ja nopea tapa määrittää tuulenpaineet, tuulikuormat ja tuulen aiheuttamat värähtelyt. Korkeataajuisessa vaakamittaustekniikassa kevyestä materiaalista tehty jäykkä pienoismalli kiinnitetään tuulitunneliin sijoitettavan herkän vaa'an päälle, jonka ominaistaajuus on voi olla useita kilohertsejä.

Suomeen on viime vuosina rakennettu useita yli 70 metriä korkeita rakennuksia. Tämän korkuiset rakennukset ovat Suomessa selvästi muuta rakennuskantaa korkeampia, jolloin tuulitunnelikokeiden suorittaminen näille rakennuksille on järkevää luotettavien tuulikuormien selvittämiseksi. Tulevaisuudessa Suomeen on tarkoitus rakentaa lisää yhtä korkeita tai korkeampia rakennuksia, joten tuulitunnelikokeiden tarve on lisääntymässä myös Suomessa.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Työssä tutkitaan korkeataajuista vaakamittaustekniikkaa (High-Frequency Force Balance method (HFFB)). Menetelmä on saanut nimensä siitä, että menetelmässä käytettävän tasapainovaa'an ominaistajuus on hyvin korkea verrattuna tutkittavaan taajuusalueeseen. Valmistajan mukaan tasapainovaa'an ominaistajuus on $2,3 \text{ kHz} - 8 \text{ kHz}$ riippuen tutkittavasta voimasuuresta. Luonnossa suurin osa tuulikuormasta on puolestaan keskittynyt paljon matalammalle taajuusalueelle ($<0,2 \text{ Hz}$). Rakennuksen alimmat ominaistajuudet, jotka ovat suuruusluokkaa $0,3-0,6 \text{ Hz}$, ovat myös hyvin matalia verrattuna tasapainovaa'an ominaistajuuksiin. Kun pienoismalli on kiinnitettynä tasapainovaakaan, on tämän vaakamallin ominaistajuus noin 60 Hz . Vaakamallin ominaistajuus voi häiritä mittaustuloksia, joten sen vaikutus tulee huomioida tuloksia analysoidessa. Menetelmässä tuulitunneliin sijoitettavaan tasapainovaakaan kiinnitetään kevyestä materiaalista tehty jäykkä pienoismalli. Tässä työssä pienoismallin mittakaava on $1/400$. Tasapainovaaka on kiinnitetty pyörivään alustaan. Vaaka sisältää kuusi venymäliuskoista koostuvaa voima-anturia. Vaaka yhdistetään vahvistimeen ja tiedot luetaan mittakortin avulla tietokoneelta. Tietokoneella käytettävällä ohjelmalla saadaan tulokseksi voima-anturien jännitearvoja ajan funktiona. Ennen varsinaisia mittauksia vaaka kalibroidaan, jotta jännitteiden ja voimien yhteys saadaan selville. Kun kalibrointi ja varsinaiset mittaukset on suoritettu, saadaan määriteltyä jokaisen kuuden voimasuureen (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y ja M_z) aikahistoriat. Käyttämällä nopeaan Fouriermuunnokseen perustuvaa tietokoneohjelmaa, saadaan muodostettua voimasuureiden aikahistorioita vastaavat spektritiheydet. Tämän jälkeen rakennuksen kiihtyvyydet voidaan määritellä käyttämällä hyväksi satunnaisvärähtelyjen teoriaa ja moodisummausmenetelmää.

Työssä rajoitutaan tutkimaan korkeita rakennuksia, jotka voidaan vielä suunnitella suunnitteluohjeiden avulla, mutta joille tuulitunnelikokeiden suorittaminen on suositeltavaa tuulikuormien luotettavuuden parantamiseksi. Työn kokeellisessa osassa suoritetaan vaakamittaustekniikan mukaiset mittaukset rajakerrostuulitunnelissa pienoismallille, joka vastaa todellisuudessa geometrisesti 100 metriä korkeaa suorakaiteen muotoista rakennusta. Tuulitunnelissa tehdään kaksi eri mittausarjaa: ensin tutkitaan ainoastaan edellä mainittua korkeaa rakennusta, joka on

muuta rakennuskantaa huomattavasti korkeampi. Toisessa mittaussarjassa pienoismallin eteen lisätään toinen korkea rakennus, jolloin voidaan tutkia toisen rakennuksen aiheuttaman häiriön vaikutusta tutkittavan rakennuksen tuulikuormiin ja värähtelyihin. Toinen korkea rakennus voi suurentaa merkittävästi katveessa olevan korkean rakennuksen kiihtyvyyksiä.

Työn kirjallisuusosassa luodaan aluksi lyhyt katsaus siihen, kuinka tuuli vaikuttaa korkeisiin rakennuksiin. Tutkittavia asioita ovat tuulen aiheuttamat rasitukset ja värähtelyt, rakennusten herkkyys tuulen dynaamisille vaikutuksille ja ihmisten viihtyvyys korkeissa rakennuksissa, niiden värähdellessä. Tuulikuorma on luonteeltaan dynaamista, joten kirjallisuusosassa esitetään myös rakenteiden dynamiikan teoriaa tarvittavilta osin. Kirjallisuusosan lopussa käsitellään tuulitunneleita ja tuulitunnelimittausmenetelmiä.

Vaakamittaustekniikkaa pyritään kehittämään niin, että menetelmän käyttö osana suunnitteluprosessia on taloudellisesti ja teknillisesti entistä järkevämpää. Työn tavoitteena on saada määritettyä menetelmän avulla tuulikuormat ja tuulen aiheuttamat rakennuksen värähtelyt. Samalla selvitetään menetelmän hyvät ja huonot puolet sekä arvioidaan, kuinka hyvin menetelmää voidaan käyttää osana suunnitteluprosessia. Yhtenä tavoitteena on myös selvittää toisen korkean rakennuksen aiheuttaman häiriön vaikutusta tutkittavan rakennuksen värähtelyihin. Työssä tehdään myös eurokoodin mukaiset vertailulaskelmat. Vertailulaskelmilla selvitetään eurokoodin soveltuvuutta korkean rakennuksen värähtelyiden ja tuulikuormien määrittämiseen ja missä tilanteissa on hyödyllistä suorittaa tuulitunnelikokeita

2 TUULEN VAIKUTUS KORKEISIIN RAKENNUKSIIN

2.1 Tuulen ja turbulenssin ominaisuudet

Rajakерros on ilmakehän kerros, jossa tuulennopeus muuttuu korkeuden mukaan. Tämä tarkoittaa sitä, että korkean rakennuksen ylempiin kerroksiin kohdistuva tuulenpaine on suurempi kuin alempiin kerroksiin kohdistuva tuulenpaine. Lisäksi rakennuksen korkeuden kasvaessa sen kokonaispinta-ala kasvaa, jolloin rakennukseen kohdistuva kokonaistuulikuorma kasvaa. Rajakerroksessa tuulenkeskinopeus esitetään logaritmisella yhtälöllä [1, s. 32]

$$v_m(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad (1)$$

jossa

$v_m(z)$ on tuulennopeuden modifioitu perusarvo korkeudella z

k_r on maastokerroin

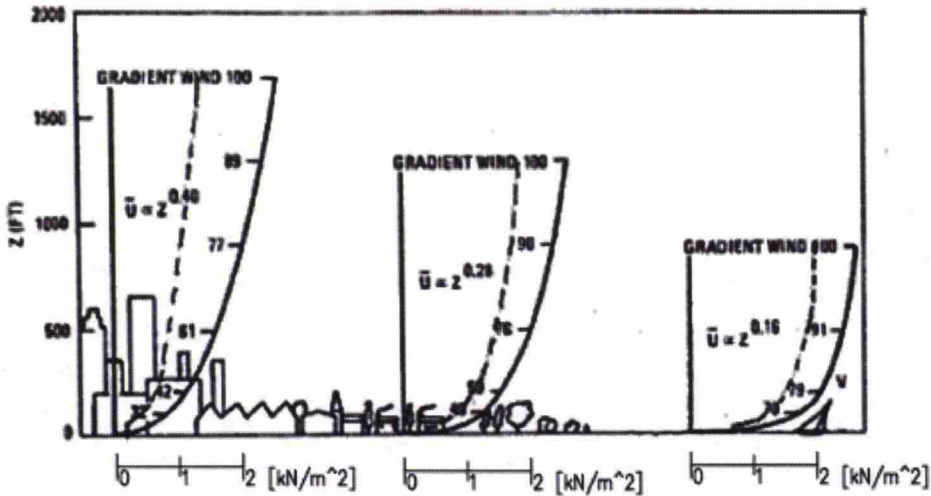
z on korkeus, jossa tuulennopeutta tarkastellaan

z_0 on rosoisuusmitta

$c_0(z)$ on pinnanmuotokerroin

v_b on tuulennopeuden perusarvo 10 metrin korkeudella.

Suunnittelussa käytettävä tuulennopeuden perusarvo on ominaisarvo, jonka keskimääräinen toistumisjakso on 50 vuotta [1, s. 28]. Kuvasta 1 nähdään, että rajakerroksen korkeus vaihtelee maaston muodoista riippuen. Kaupungissa rajakerros voi olla useita satoja metrejä korkeampi kuin merellä.



Kuva 1. Tuulenkeskinopeusprofiilit ja rajakerroksen korkeus eri maastoluokissa [2, s. 166]. Kuvaa on täydennetty hahmottelemalla katkoviivoilla Eurokoodin mukaiset puuskanopeuspaineet [kN/m^2], jotka on laskettu kaavalla (2). Kuvan vasemmassa laidassa olevassa kaupungissa vaikuttavat puuskanopeuspaineet on laskettu käyttämällä eurokoodin maastoluokan IV mukaisia arvoja. Keskellä olevan maaston puuskanopeuspaineet on laskettu käyttäen maastoluokan II mukaisia arvoja, ja oikeassa laidassa olevalla merellä vaikuttavat puuskanopeuspaineet käyttäen maastoluokan 0 mukaisia arvoja.

Puuskanopeuspaine sisältää tuulennopeuden modifioidun perusarvon ja lyhytaikaisten nopeusvaihteluiden vaikutukset. Puuskanopeuspainetta arvioidaan eurokoodin mukaan kaavalla [1, s. 38]

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

jossa

$q_p(z)$ on puuskanopeuspaine

$I_v(z)$ on tuulenpuuskien intensiteetti

ρ on ilman tiheys.

Kuvasta 1 nähdään, että puuskanopeuspaine on merelle huomattavasti suurempi kuin kaupungissa samalla korkeudella. Jossain tapauksissa voidaan olla kiinnostuneita keskimääräisen tuulennopeuden aiheuttamasta keskimääräisestä nopeus-

paineesta, johon ei sisälly puuskien vaikutusta. Tällöin nopeuspaine lasketaan kaavalla

$$q_p(z) = \frac{1}{2} \rho \cdot v_m^2(z). \quad (3)$$

Rakennuksen tulee kestää siihen kohdistuvat tuulenpaineet (ja muut kuormitukset) vaurioitumatta ja niin, että ihmisten viihtyvyys ja rakennuksen toiminnallisuus säilytetään.

2.2 Ominaisaajuuksien vaikutus rakennuksen värähtelyyn

Ominaisaajuudet kuvaavat taajuuksia, joilla rakenne värähtelee helpoiten [3, s. 12]. Eurokoodin [1, s. 234] mukaan yli 50 metriä korkean rakennuksen alin ominaisaajuus voidaan laskea likimäärin kaavalla

$$n_1 = \frac{46}{h} [Hz] \quad (4)$$

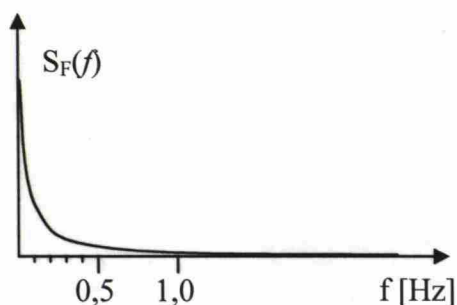
jossa

n_1 on alin ominaisaajuus

h on rakennuksen korkeus metreinä.

Kaavasta (4) nähdään, että 100 metriä korkean rakennuksen alin ominaisaajuus on noin 0,46 Hz ja lisäksi huomataan, että rakennuksen korkeuden kasvaessa rakennuksen alin ominaisaajuus pienenee entisestään. On kuitenkin muistettava, että kaavasta (4) saatavat arvot ovat vain likimääräisiä. Tarkemmat arvot ominaisaajuuksille saadaan ratkaisemalla rakennettu laskentamalli joko analyttisesti tai numeerisesti. Tämän työn perusteella sata metriä korkean rakennuksen alin ominaisaajuus voi olla suuruusluokkaa 0,3 Hz, joka on huomattavasti pienempi kuin kaavasta (4) saatava arvo.

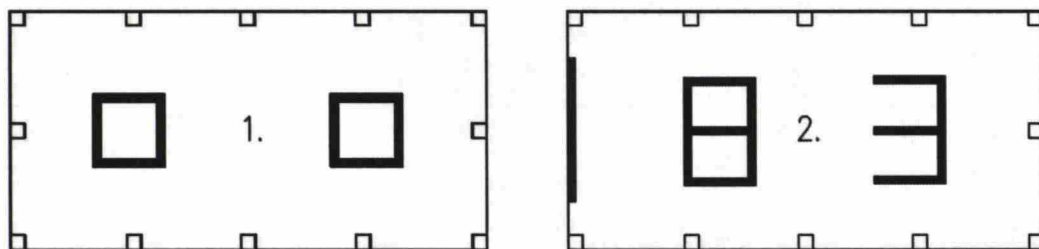
Kuvassa 2 on esitetty tuulikuorman spektritiheys. Tuulikuorman spektritiheys saadaan laskettua kaavalla (43). Tuulen spektritiheys kuvaa sitä, kuinka tuulikuorma on jakautunut eri taajuuksille.



Kuva 2. Tuulikuorman spektritiheys.

Kuvasta 2 nähdään, että suurin osa tuulikuormasta on keskittynyt pienille taajuuksille ($<0,2 \text{ Hz}$). Koska korkean rakennuksen ominaistaajuudet ovat pieniä, voi tuulikuorman taajuus yhtyä johonkin rakennuksen ominaistaajuuksista. Tällaista tilaa kutsutaan resonanssiksi. Resonanssissa värähtelyn amplitudi pyrkii kasvamaan erittäin suureksi. Ellei rakenteen vaimennus rajoita värähtelyn amplitudia tarpeeksi, voi rakenne vaurioitua [4 s. 9]. Korkeiden rakennusten tuulikuormia määriteltäessä on tärkeää huomioida tuulen dynaamiset vaikutukset. Matalilla ja keskikorkeilla rakennuksilla tuulen dynaamiset vaikutukset eivät ole merkittäviä, koska tällaisten rakennusten ominaistaajuudet ovat korkeita.

Rakennuksen ominaistaajuudet riippuvat rakennuksen jäykkyydestä, joten rakennuksen jäykkyys vaikuttaa rakennuksen värähtelyherkkyyteen. Kuvassa 3 on esitetty kaksi tyypillistä korkeiden rakennusten jäykistysratkaisuja vaakakuormille. Vaihtoehdossa 1 jäykistys on hoidettu hissikuiluilla. Jäykistykseen voidaan käyttää myös erillisiä jäykistäviä seiniä ja porraskuiluja hissikuilujen lisäksi kuten vaihtoehdossa 2.



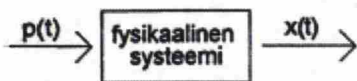
Kuva 3. Korkeiden rakennusten tyypillisiä pystyjäykistysjärjestelmiä.

Monien korkeiden rakennusten vaakajäykistykseen mitoitettava tekijä on ihmisten viihtyvyys eikä niinkään rakenteellinen kestävyys. Ihmiset reagoivat herkästi ra-

kennuksen värähtelyyn ja liikkeisiin. Kuten todettiin, rakennuksen värähtelyt ovat riippuvaisia rakennuksen ominaistajuuksista. Muuttamalla rakennuksen ominaistajuuksia voidaan rakennuksen värähtelyä pienentää. Ominaisajuuksia voidaan muuttaa muuttamalla rakennuksen massaa tai jäykkyyttä. Ominaisajuuksia voidaan muuttaa myös muuttamalla rakennuksen dynaamisten vapausasteiden määrää, esimerkiksi vaimentimien avulla.

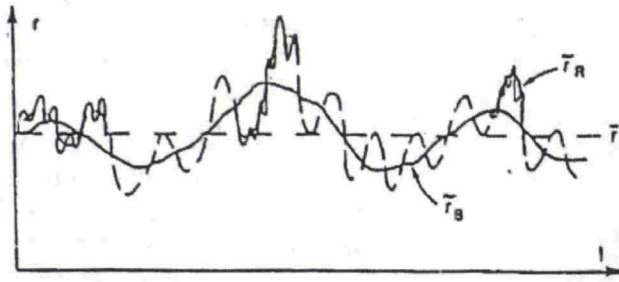
2.3 Tuulen aiheuttama värähtely

Suunniteltaessa korkeita rakennuksia, tulee suunnittelijoiden kiinnittää erityistä huomiota tuulen vaikutuksiin. Kun vaihteleva tuulikuorma osuu rakennuksiin, rakennuksen vaste vaihtuu myös ajan funktiona eli syntyy dynaamisia vasteita [5, s. 429]. Vaste kuvaa fysikaalisen systeemin ulostulosuuretta ja heräte systeemin sisäänmenosuuretta. Fysikaalinen systeemi on esitetty kuvassa 4. Tutkittaessa tuulikuormia fysikaalisena systeeminä on tutkittava rakenne, herätteenä on vaikuttava tuulikuorma ja vasteena tavallisesti rakennuksen siirtymät.



Kuva 4. Fysikaalisen systeemin heräte $p(t)$ ja vaste $x(t)$. [3, 12]

Tuulen aiheuttama vaste voidaan jakaa kahteen osaan: tausta- ja resonanssi vasteseen [5, s. 429]. Taustavaste r_B on epäsäännöllistä hitaasti vaihtelevaa heilahtelua ja resonanssivaste r_R on tietyllä taajuudella tai taajuuksilla (rakennuksen ominaistajuuksilla) tapahtuvaa värähtelyä, jota tapahtuu usean syklin sarjoissa (kuva 5) [6, s. 3]. Hyvin jäykillä rakennuksilla eli rakennuksilla, joiden ominaistajuudet eivät ole merkittäviä tuulen taajuussisällön suhteen, resonanssivasteen osuus kokonaisvasteesta on pieni ja taustavasteen osuus suuri. Joustavilla rakennuksilla eli rakennuksilla, joiden ominaistajuudet ovat merkittäviä tuulen taajuussisällön suhteen, tilanne on päinvastainen [5, s. 429].

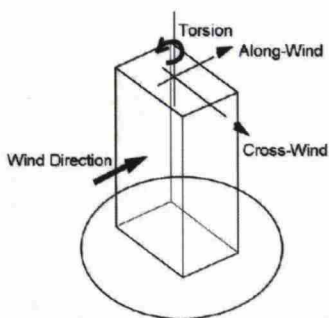


Kuva 5. Dynaamiset vasteet ajan (t) suhteen. Kuvassa r_R on resonanssivaste, r_B taustavaste ja \bar{r} on keskimääräinen vaste. [6, s. 6]

Rakennuksen dynaamiset vasteet syntyvät kolmesta syystä. Ensimmäinen on rakennuksen kohtaavan turbulenttisen virtauksen aiheuttamat kuormat, jotka synnyttävät rakennuksessa tuulen suuntaisia ja tuulta vastaan kohtisuoria tausta- ja resonanssivasteita. [6, s. 3] Rakennukseen kohdistuva virtaus koostuu erikokoisista pyörteistä. Suuria pyörteitä esiintyy harvemmin kuin pieniä pyörteitä. Suurten pyörteiden keskimääräinen taajuus on tavallisesti paljon suurempi kuin mikään tuulen kannalta merkittävä rakennuksen ominaistaajuus, joten suuret pyörteet eivät aiheuta värähtelyjä. Pienet pyörteet, joita esiintyy useammin, voivat saada rakennuksen värähtelemään jollakin sen ominaistaajuuksista. [7, s. 46–47] Toinen syy on pyörerradan aiheuttamat kuormat, jotka aiheuttavat pääosin resonanssivasteita, jotka esiintyvät yleensä tuulta vastaan kohtisuoraan. Kolmas syy on rakennuksen liikkeen aiheuttamat kuormitukset; merkittävin näistä on rakennuksen aerodynaamiset vaimennusvoimat, jotka kontrolloivat resonanssivasteen amplitudia. Nämä voivat lisätä tai vähentää rakenteellista vaimennusta. Negatiivinen aerodynaaminen vaimennus liittyy pääosin tuulta vastaan kohtisuoraan liikkeeseen ja voi aiheuttaa suurta värähtelyä ja pahimmassa tapauksessa voivat johtaa aerodynaamiseen epästabiiliuteen. [6, s. 3] Aerodynaaminen epästabiilius on tilanne, jossa rakenteen värähtelyt edelleen voimistavat värähtelyilmiötä. Aeroelastiset epästabiiliusilmiöt voivat syntyä tietyn kriittisen tuulen nopeuden ylittyessä [8, s. 166]. Korkeilla rakennuksilla voi aeroelastisista epästabiiliusilmiöistä esiintyä pyörerratailmiötä. Pyörerratailmiössä pyörteet irtoavat vuorotellen kappaleen vastakkaisista reunoista tietyin säännöllisin aikavälein. Samalta reunalta irtoavien pyörteiden irtoamisen aikaväliä vastaavaa taajuutta kutsutaan pyörteiden irtoamistaajuudeksi. Jos pyörteiden irtoamistaajuus on lähellä rakenteen geometriselta muodoltaan sopivaa ominaistaajuutta, voi kappaleen ja virtauksen välisestä vuo-

rovaikutuksesta aiheutua irtoamistajuuden lukkiutuminen kappaleen ominaistajuudelle synnyttäen kappaleeseen resonanssivärähtelyä. [9] Pyörreratailmiötä voi esiintyä ainoastaan hyvin hoikilla korkeilla rakennuksilla. Eurokoodin [1, s. 194] mukaan pyörreratailmiötä ei tarvitse tutkia, jos tuulta vastaan kohtisuorassa tasossa rakenteen suurimman mitan suhde pienimpään mittaan on yli 6.

Rakennus voi värähdellä tuuleen suuntaan tai tuulta vastaan kohtisuoraan. Joillakin rakennuksilla voi esiintyä myös vääntövärähtelyä. Vääntövärähtelyä esiintyy erityisesti rakennuksilla, joiden taivutus- ja vääntövärähtelytaajuudet ovat lähellä toisiaan ja, joilla on leikkauskeskiössä epäsymmetristä aksiaalista massan jakautumista. [10, s. 179–184] Vääntövärähtelyä voi esiintyä myös rakennuksilla, joita ei ole jäykistetty niin, että vääntö olisi estetty. Rakennuksen värähtelymuodot on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Korkea rakennus voi värähdellä tuulen suuntaan tai tuulta vastaan kohtisuoraan. Myös rakennuksen vääntyminen on mahdollista. [7, s. 46]

Lisäksi rakennuksiin voi kohdistua tuulen aiheuttamaa värähtelyä. Tuulen aiheuttama värähtely on olemassa kahta erilaista joko vapaasti virtaavan turbulenssin tai esteen tai lähellä olevien esineiden aiheuttamaa. Jälkimmäistä kutsutaan herätetärinäksi tai interferenssiksi [11, s. 123]. Herätetärinän merkitys korkeiden rakennusten värähtelyihin voi olla merkittävä. Eurokoodi suosittelee tuulitunnelikokeita [1, s. 50] kohteissa, joissa herätetärinän esiintyminen on mahdollista.

2.4 Ihmisten viihtyvyys rakennuksen huojuessa

1800-luvun loppupuolella ja 1900-luvun alkupuolella rakennetut korkeat rakennukset olivat hyvin massiivisia, jonka seurauksena ne olivat tuulessa lähes värähtelemättömiä. Uudemmat rakennukset ovat kuitenkin useista syistä, kuten materi-

aalikustannuksista ja vaatimuksista rakentaa rakennukset mahdollisimman nopeasti, johtuen kevyempiä ja joustavampia, jonka seurauksena rakennukset ovat herkempiä reagoimaan kuormiin. [12, s.1] Nykyisin on olemassa standardeja, jotka antavat ohjeellista tietoa rakennusten värähtelyn vaikutuksesta ihmisten viihtyvyyteen. ISO 6897-standardi [12] antaa ohjeita rakennuksille, jotka värähtelevät alle 1 Hz:n taajuudella horisontaalisesti. Värähtelyä korkeammilla taajuuksilla (1-80 Hz) käsitellään standardeissa ISO 2631-1 [13] ja ISO 2631-2 [14]. Korkeiden rakennusten ominaistajuudet ovat yleensä alle 1 Hz:n, joten useissa tapauksissa ISO 6897-standardi on käyttökelpoinen. Täysin kattavan standardin tekeminen on kuitenkin vaikeaa, koska ihmiset reagoivat yksilöllisesti rakennuksen liikkeisiin, jolloin värähtelyrajojen asettaminen kaikkia miellyttävälle tasolle on käytännössä hyvin vaikeaa. ISO 6897-standardi asettaa mukavuusrajaksi sen, että tuulen aiheuttama rakennuksen värähtely ei saa tuntua haitalliselta yli kahdesta prosentista rakennuksen käyttäjistä viiden vuoden mittausaikana. Yleensä rakennus värähtelee eniten rakennuksen huipulla ensimmäisellä ominaistajuudella, mutta mahdolliset korkeammilla ominaistajuuksilla tapahtuvat värähtelyt tulee myös tutkia. Kuvassa 7 on esitetty kiihtyvyyden rms-arvojen raja-arvot normaalissa käytössä oleville rakennuksille eri taajuuksilla. Erikoistarkoituksiin käytössä oleville rakennuksille on esitetty omat kiihtyvyyden rms-arvojen raja-arvot kuvassa 8. Rms-arvot lasketaan kaavalla

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (5)$$

jossa

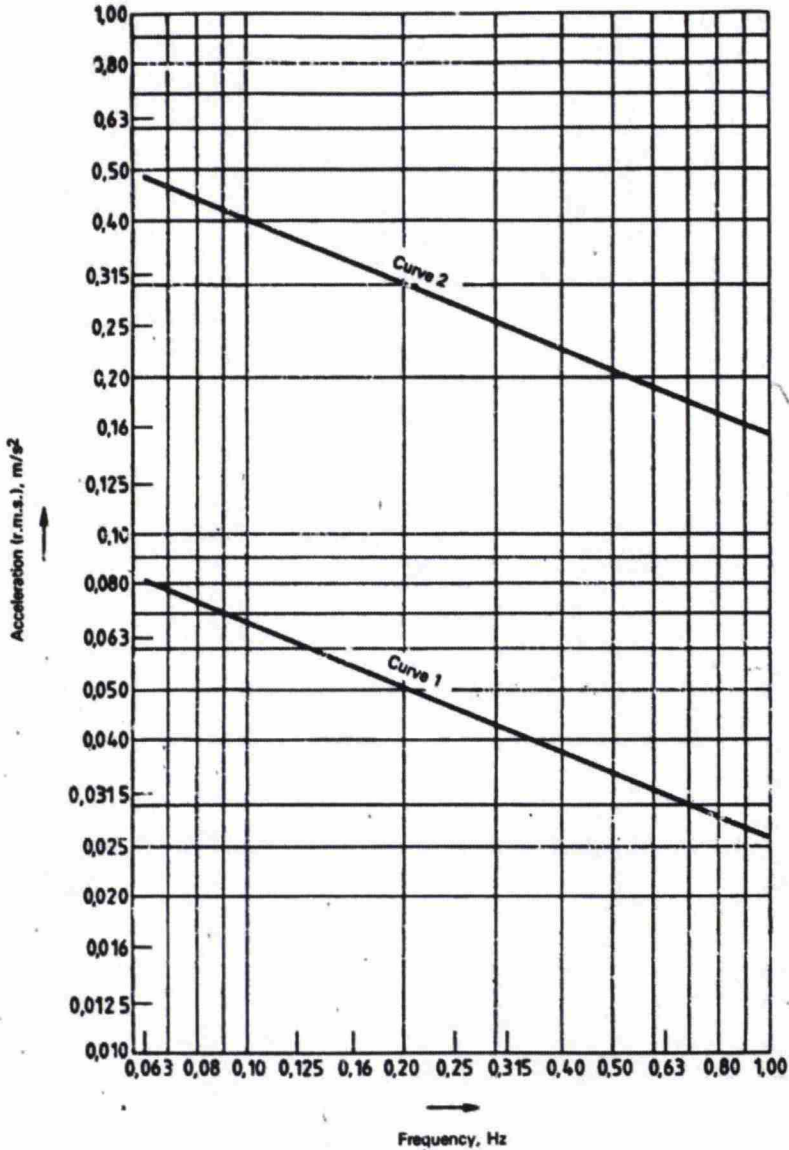
- x_{rms} on rms-arvo
- n on otosten määrä
- x_i on otoksen arvo.

Rakennuksen siirtymiä voidaan kuvata keskihajonnalla, joka lasketaan kaavalla

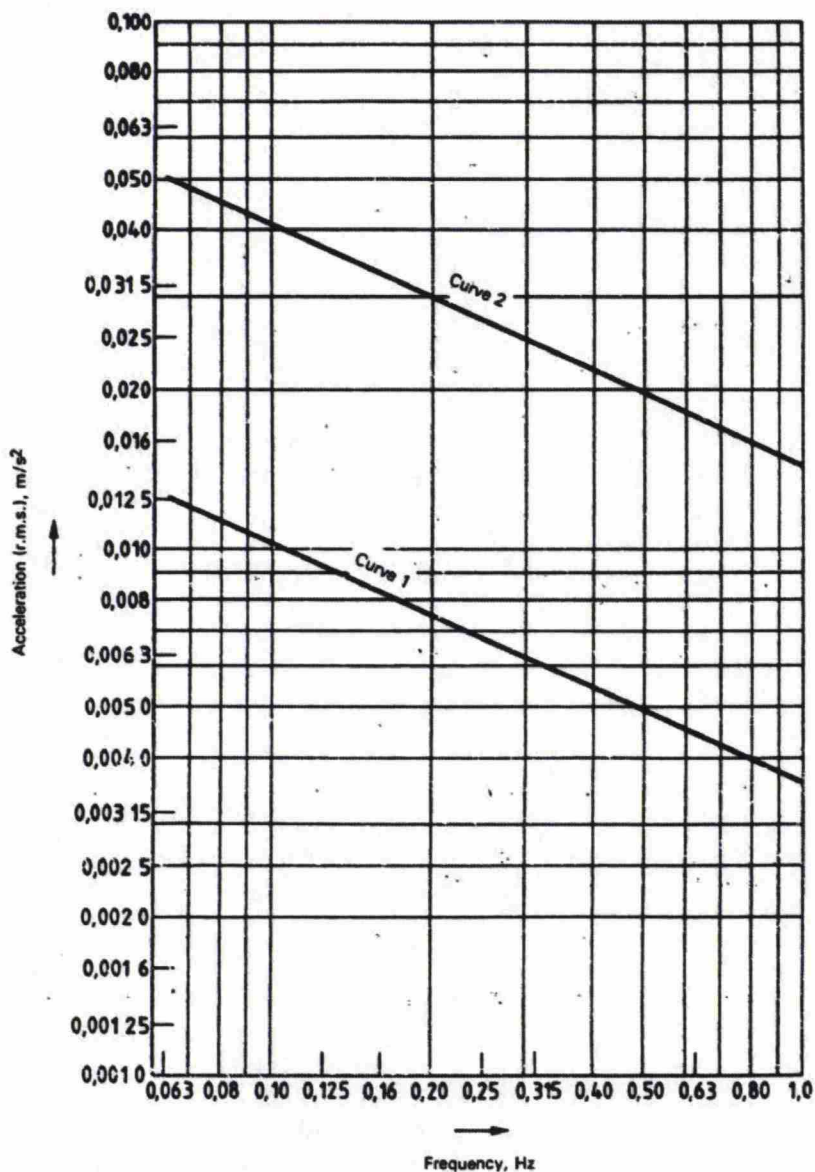
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

jossa

\bar{x} on keskiarvo.



Kuva 7. ISO 6897-standardin asettamat kiihtyvyyksrajat (rms-arvot) rakennuksille, joita käytetään tavanomaisiin tarkoituksiin. Käyrä 1 kuvaa maalla olevia ja käyrä 2 merellä olevia rakennuksia. [12, s. 5]



Kuva 8. Kiihtyvyyssrajat (rms-arvot) erikoistarkoituksiin käytettävissä rakennuksissa ISO 6897-standardin mukaan. Käyrä 1 on raja-arvo herkille ihmisille ja käyrä 2 on keskimääräinen raja-arvo. [12, s. 6]

Rakennusten värähtelystä on tehty useita tutkimuksia, joissa on tutkittu tärkeitä psykologia ja fysiologisia parametreja, jotka vaikuttavat siihen kuinka ihmiset tuntevat korkeiden rakennusten liikkeitä ja värähtelyä alhaisilla 0-1 Hz:n taajuuksilla. Tutkittavia asioita ovat olleet asukkaiden odotukset, kokemukset, heidän toimintansa, vartalon asento ja suuntautuminen, visuaaliset ja akustiset asiat, amplitudit, taajuudet ja kiihtyvyydet. Taulukossa 1 on esitetty kuinka ihmiset yleensä reagoivat erisuuruisiin matalataajuuksiseen värähtelyyn liittyviin kiihtyvyyksiin.

Kuten edellä todettiin, rakennuksen liikettä voidaan rajoittaa lisäämällä vaimennusta. Lisäämällä tuulelle herkän rakennuksen vaimennusta, saavutetaan rakennuksen käyttäjille mukavammat olosuhteet. Joskus vaimennusta voidaan lisätä vain käytännön ja taloudellisista syistä eikä rakenteellisista syistä. Ihmisten viihtyvyys määrittää yleensä rajan korkean rakennuksen värähtelyn hyväksyttävän tason. [7, s. 44, 52]

Taulukko 1. Taulukossa on esitetty kuinka ihmiset yleisesti tuntevat erisuuruiset kiihtyvyydet. [15, s. 13-31]. Alle $0,2 \text{ m/s}^2$ kiihtyvyydet ovat tyypillisiä korkeille rakennuksille. Tällöin vaikutukset pysyvät kohtuullisina. Taulukossa 2 esitetyt suurimmat kiihtyvyyden arvot ovat noin kymmenesosa maanvetovoiman kiihtyvyydestä. Tällöin vaikutukset ovat jo hyvin pahoja. Korkeat rakennukset tulee suunnitella niin, että näin suuria kiihtyvyyksiä ei tuulen aiheuttamana synny.

Taso	Kiihtyvyys [m/s^2]	Vaikutukset
1	<0,05	Ihmiset eivät tunne liikettä
2	0,05–0,1	a) Herkät ihmiset tuntevat liikkeen b) Riippuvat esineet voivat liikkua kevyesti
3	0,1–0,25	a) Suurin osa ihmisistä tuntee liikkeen b) Liike voi vaikuttaa toimistotyöskentelyyn c) Pitkäaikainen vaikutus voi aiheuttaa pahoinvointia
4	0,25–0,4	a) Toimistotyöskentely käy vaikeaksi tai mahdottomaksi b) Liikkuminen on vielä mahdollista
5	0,4–0,5	a) Ihmiset tuntevat liikkeet hyvin voimakkaasti b) Luonnollinen kävely on vaikeaa c) Seisovat ihmiset voivat menettää tasapainonsa
6	0,5–0,6	Suurin osa ihmisistä ei siedä liikettä eivätkä pysty kävelemään luonnollisesti
7	0,6–0,7	Ihmiset eivät kestä liikettä eivätkä pysty kävelemään
8	>0,85	Esineet alkavat pudota ja ihmiset saattavat loukkaantua

3 RAKENNUSRUNGON VÄRÄHTELYJEN PERUSTEET

3.1 Usean vapausasteen värähtelysystemi

3.1.1 Johdanto

Tutkittaessa korkeiden rakennusten värähtelyjä, mallinnetaan rakennus usean vapausasteen värähtelysysteminä. Vapausasteiden määrä tarkoittaa niiden riippumattomien muuttujien lukumäärää, jotka tarvitaan systeemin liikkeen kuvaamiseksi [16, s. 6]. Rakenteen mallintaminen yhden vapausasteen värähtelysystemiksi on luotettavaa, kun voidaan olla varmoja, että rakennuksen liikkeet voidaan määrittää yhden muuttujan. Jos rakenteella onkin useita siirtymämuotoja, mutta se mallinnetaan yhden vapausasteen systemiksi, liikeyhtälöistä saatavat tulokset ovat vain arvio rakenteen todellisesta dynaamisesta käyttäytymisestä. Rakenteen mallintaminen usean vapausasteen värähtelysysteminä, antaa tarkemmat tulokset rakenteille, joilla on useita siirtymämuotoja. [17, s. 169]

Usean vapausasteen värähtelysystemin liikeyhtälö matriisimuodossa on

$$[m]\{\ddot{x}(t)\} + [c]\{\dot{x}(t)\} + [k]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (7)$$

jossa

$\{\ddot{x}\}$ on kiihtyvyyksivektori

$\{\dot{x}\}$ on nopeusvektori

$\{x\}$ on siirtymävektori

$[m]$ on massamatriisi

$[k]$ on jäykkyyssmatriisi

$[c]$ on vaimennusmatriisi, joka kuvaa nopeuteen verrannollista vaimennusta

$\{F(t)\}$ on kuormitusvektori.

Edellä esitetty yhtälö (7) perustuu oletukseen systeemin toiminnasta, esimerkiksi vaimennuksen suhteen. Yhtälö (7) ei välttämättä kuvaa usean vapausasteen värähtelysysteemiä tarkasti fysikaalisesti, mutta sen avulla usean vapausasteen värähtelysysteemi pysyy matemaattisesti hallittavana. Yhtälöissä (7) massa-, jäykkyys- ja vaimennusmatriisin koko on $n \cdot n$, missä n on systeemin vapausasteiden määrä. Massamatriisi koostuu alkioista m_{ij} , jotka kuvaavat voimaa, joka kohdistuu koordinaattiin i , johtuen koordinaatin j yksikkökiikiihtyvyydestä. Vaimennusmatriisi puolestaan koostuu alkioista c_{ij} , jotka kuvaavat voimaa, joka kohdistuu koordinaattiin i , johtuen koordinaatin j yksikkönopeudesta. Jäykkyysmatriisi koostuu alkioista k_{ij} , jotka kuvaavat voimaa, joka kohdistuu koordinaattiin i , johtuen koordinaatin j yksikkösiirtymästä. [17, s. 171–174]

3.1.2 Moodi-summausmenetelmä

Usean vapausasteen värähtelysysteemin vasteet saadaan laskettua moodi-summausmenetelmällä. Menetelmässä usean vapausasteen värähtelysysteemin vaste määritetään laskemalla yksittäisten värähtelymuotojen vasteet yhteen. Menetelmän ehtona on, että likeyhtälöt ovat toisistaan riippumattomia, jolloin likeyhtälöt voidaan ratkaista riippumattomina yhden vapausasteen värähtelysysteemeinä. Moodi-summausmenetelmä soveltuu ainoastaan lineaarisille systeemeille ja lisäksi systeemin vaimennuksen tulee olla suhteellista eli verrannollinen massa- ja jäykkyysmatriiseihin. Suhteellinen vaimennus voidaan esittää esimerkiksi Rayleigh:n vaimennuksena [4, s. 370]. Moodi-summausmenetelmä on hyödyllisin, kun systeemin vaste voidaan määrittää keskittymällä vain pieneen osaan systeemin värähtelymuodoista. Suurimmalla osalla värähtelysysteemejä vasteen merkitys on suurimmillaan alhaisimmilla ominaismuodoilla, jolloin korkeimpia ominaismuotojen tutkiminen ei ole välttämätöntä. [4, s. 357–373] Korkeita rakennuksia tutkittaessa on rakennuksen värähtely usein merkittävää ainoastaan aivan alhaisimmilla ominaismuodoilla. Moodi-summausmenetelmä on esitetty alla vaiheittain [4, s. 296, 304–305, 357–373; 17, s. 219–258; 18, s. 199–201].

1.) Muodostetaan usean vapausasteen värähtelysteemin liikeyhtälö, joka on muotoa

$$[m]\{\ddot{x}(t)\} + [c]\{\dot{x}(t)\} + [k]\{x(t)\} = \{F(t)\}. \quad (8)$$

2.) Tutkitaan usean vapausasteen vaimentamatonta vapaavärähtelyä eli värähtelyä, johon ei vaikuta ulkoista herätettä. Liikeyhtälöksi saadaan

$$[m]\{\ddot{x}(t)\} + [k]\{x(t)\} = \{0\} \quad (9)$$

jossa

$\{0\}$ on nollavektori.

Oletetaan, että värähtely on harmonista, jolloin saadaan

$$\{x(t)\} = \{\hat{x}\}\sin(\omega t + \theta) \quad (10)$$

jossa

$\{\hat{x}\}$ on systeemin muotoa kuvaava vektori

θ on vaihekulma.

Nyt saadaan ominaisarvotehtävä

$$([k] - \omega^2 [m])\{\hat{x}\} = \{0\}. \quad (11)$$

ω^2 kuvaa yhtälön ominaisarvoja, jotka ovat kulmataajuuksien neliöitä. $\{\hat{x}\}$ kuvaa värähtelysteemin ominaisvektoreita, joita kutsutaan myös ominaismuodoiksi. Yhtälön (10) ominaisarvot ratkaistaan määrittelemällä kerroinmatriisin determinantin nollakohdat

$$|[k] - \omega^2 [m]| = 0. \quad (12)$$

Ominaisarvot ovat reaalisia ja positiivisia, ja ne ovat systeemille mahdollisten kulmataajuuksien neliöitä. Ominaisarvot indeksoidaan niin, että pienimmän arvo on 1, seuraavan 2 jne. Ominaisarvoja vastaa ominaisvektori (ominaismuoto (Φ)). Ominaisvektorit eivät ole yksikäsitteisiä, ainoastaan niiden alkioiden suhteet voidaan ratkaista. Rakennusten ominaisvektorit muodostetaan yleensä niin, että ominaisvektorin alkion arvo rakennuksen huipulla on 1. Muiden alkion arvot ratkais-

taan suhteessa tähän arvoon. Ominaismuodot (ominaisvektorit) ovat rakenteen värähtelymuotoja, joilla rakenne pyrkii värähtelemään. Ominaismuotoa, jolla on pienin ominaistaajuus, kutsutaan 1. ominaismuodoksi, seuraavaa toiseksi jne. [17, s. 201–202] Ominaismuodot voidaan koota ominaismuotomatriisiksi ja se voidaan esittää kaavalla

$$[\Phi] = [\{\Phi_1\}, \{\Phi_2\}, \dots, \{\Phi_n\}]. \quad (13)$$

Ominaismuotomatriisi määrittelee systeemin värähtelymuodot. [4, s. 290–291]

3.) Muodostetaan yleistetyt massa- ja jäykkyyssmatriisit sekä yleistetty voimavektori. Yleistetty massamatriisi $[M]$ lasketaan kaavalla

$$[M] = [\Phi]^T [m] [\Phi] \quad (14)$$

jossa

$[\Phi]^T$ on ominaismuotomatriisin transpoosi

$[M]$ on diagonaalimatriisi, joka koostuu jokaista ominaismuotoa vastaavasta yleistetystä massa-alkiosta.

Vastaavasti voidaan muodostaa yleistetty jäykkyyssmatriisi $[K]$, joka lasketaan kaavalla

$$[K] = [\Phi]^T [k] [\Phi]. \quad (15)$$

$[K]$ on diagonaalimatriisi, joka koostuu jokaista ominaismuotoa vastaavasta yleistetystä jäykkyyssalkiosta.

Yleistetty voimavektori $\{P(t)\}$ lasketaan kaavalla

$$\{P(t)\} = \{\Phi\}^T \{F(t)\}. \quad (16)$$

4.) Muodostetaan riippumattomat liikeyhtälöt. Jotta liikeyhtälöt saadaan toisistaan riippumattomiksi, luodaan uusi koordinaatisto, jota kutsutaan yleistetyksi koordinaatistiksi. Yleistetty koordinaatisto $\{q\}$ määritellään kaavalla

$$\{x\} = [\Phi] \cdot \{q\}. \quad (17)$$

Vaimentamattoman värähtelysystemin liikeyhtälö yleistetyssä koordinaatistossa on

$$[\Phi]^T [m][\Phi]\{\ddot{q}(t)\} + [\Phi]^T [k][\Phi]\{q(t)\} = [\Phi]^T \{F(t)\}. \quad (18)$$

Sijoittamalla yhtälöön (18) yleistetyt massa- ja jäykkyyismatriisit sekä yleistetyt voimavektorin saadaan

$$[M]\{\ddot{q}(t)\} + [K]\{q(t)\} = \{P(t)\}. \quad (19)$$

Oletetaan, että systeemissä vaikuttaa suhteellinen vaimennus eli vaimennustermi on verrannollinen massa- ja jäykkyyismatriisiin. N :nnen ominaismuodon yleistetty vaimennuskertoin voidaan esittää muodossa

$$C_n = 2M_n\omega_n\zeta_n \quad (20)$$

jossa

ζ_n on vaimennussuhde

ω_n on kulmataajuus.

Yleistetty vaimennusmatriisi voidaan nyt ilmaista muodossa

$$[C] = \begin{bmatrix} 2\zeta_1\omega_1M_1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 2\zeta_2\omega_2M_2 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 2\zeta_3\omega_3M_3 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Nyt liikeyhtälö yleistetyssä koordinaatistossa on muotoa

$$[M]\{\ddot{q}(t)\} + [C]\{\dot{q}(t)\} + [K]\{q(t)\} = \{P(t)\}. \quad (22)$$

Yhtälö (22) esittää n määrää toisistaan riippumatonta liikeyhtälöä. N :s liikeyhtälö on muotoa

$$M_n\ddot{q}_n(t) + C_n\dot{q}_n(t) + K_nq_n(t) = P_n(t). \quad (23)$$

Kaava (23) voidaan esittää myös muodossa

$$\ddot{q}_n(t) + 2\zeta_n\omega_n\dot{q}_n(t) + \omega_n^2q_n(t) = \frac{P_n(t)}{M_n(t)}. \quad (24)$$

Jokainen näistä riippumattomista liikeyhtälöistä voidaan nyt ratkaista yhden vapausasteen värähtelysysteminä, jonka ratkaisua käsitellään useissa teoksissa [17], [4], [15]. Liitteessä A on käsitelty yhden vapausasteen värähtelysystemin ratkaisua, kun värähtelysystemiin vaikuttaa harmoninen heräte. Kun liikeyhtälöt on ratkaistu yleistetyssä koordinaatistossa, saadaan vasteet alkuperäisessä ortogonaalisessa koordinaatistossa kaavalla

$$\{x(t)\} = [\Phi]\{q(t)\}. \quad (25)$$

Liikeyhtälöitä voidaan käsitellä myös taajuustasossa. Siirtyminen aikatasosta taajuustasoon tapahtuu Fourier-muunnosten avulla. Yhden ja usean vapausasteen liikeyhtälöiden Fourier-muunnokset on esitetty liitteessä B.

3.2 Satunnaisvärähtely

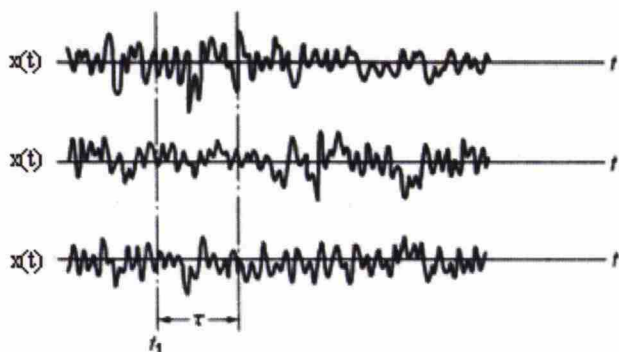
3.2.1 Määritelmiä

Tässä työssä tutkitaan tuulen aiheuttamia värähtelyjä taajuustasossa. Värähtelyjen tutkimista varten työssä muodostetaan tuulikuorman spektritiheys (kuva 2). Spektritiheyden käsite on keskeinen osa tätä työtä, joten tässä kappaleessa (3.2) esitetään lyhyesti spektritiheyden muodostamiseen tarvittavaa satunnaisvärähtelyjen teoriaa. Kappaleissa 3.2.1 ja 3.2.2 esitetään yleisellä tasolla kuinka satunnaisaika-funktioiden spektritiheys saadaan muodostettua. Kappaleissa 3.2.1 ja 3.2.2 esitetyt kaavoja ei tässä työssä sellaisinaan käytetä, vaan tuulikuorman spektritiheydet saadaan muodostettua nopeaan Fourier-muunnokseen perustuvalla tietokoneohjelmalla. Seuraavassa esitetty teoria toimii kuitenkin tärkeänä perustana spektritiheyden käsitteelle.

Nopea Fourier-muunnos on algoritmi, jonka avulla diskreetit Fourier-muunnokset saadaan laskettua nopeasti. FFT:n käyttäminen nopeuttaa laskemista huomattavasti, kun näytepisteiden määrä on suuri. Tässä työssä käytetty FFT-ohjelma perustuu Fortran koodiin [19, s. 150–166, s. 220–221].

Useiden fysikaalisten ilmiöiden, esimerkiksi tuulen, hetkellisiä arvoja tulevaisuudessa ei voida ennustaa deterministisesti. Näiden ilmiöiden ei-deterministisiä ominaisuuksia kuvataan satunnaisaikafunktiolla. Huolimatta satunnaisaikafunkti-

oiden epäsäännöllisyydestä, on monissa satunnaisilmiöissä tilastollista säännöllisyyttä, jota voidaan tutkia tilastomatematiikan avulla. Mitä enemmän tilastollista tietoa on saatavilla, sitä parempi ennuste mallista saadaan.[16, s. 351] Kuvassa 9 on esitetty satunnaisaikafunktioiden joukko.



Kuva 9. Satunnaisaikafunktioiden joukko. [16, s. 352]

Alla on määritelty tilastomatematiikan tunnuslukuja, joita tarvitaan satunnaisaikafunktioiden käsittelyssä [16, s. 352–353]

aikakeskiarvo

$$\overline{x(t)} = \langle x(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt, \quad (26)$$

neliöllinen aikakeskiarvo

$$\overline{x(t)^2} = \langle x(t)^2 \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt, \quad (27)$$

varianssi

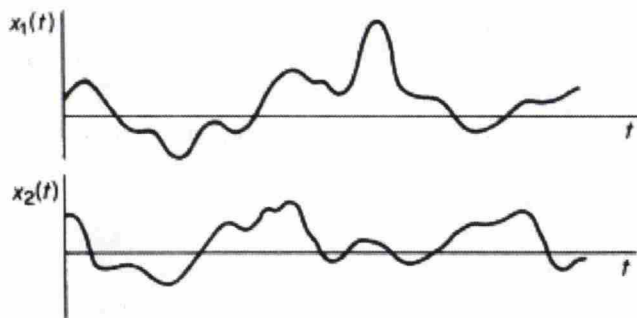
$$\sigma^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T [x(t) - \overline{x(t)}]^2 dt = \overline{x(t)^2} - [\overline{x(t)}]^2 \quad (28)$$

keskihajonta

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}. \quad (29)$$

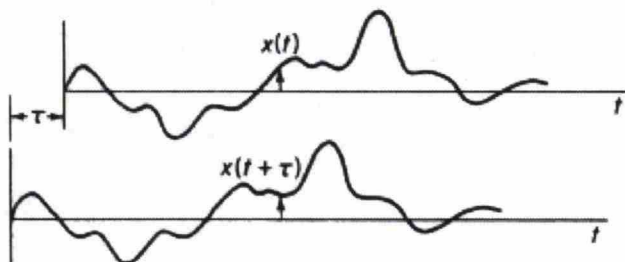
3.2.2 Korrelaatio ja tehosppektritiheys

Korrelaatio kuvaa kahden suureen samanlaisuutta. Korrelaation avulla on mahdollista selvittää ”piilevää” jaksollisuutta. Tutkitaan kuvassa 10 esitettyjä herätteitä $x_1(t)$ ja $x_2(t)$. Herätteiden korrelaatio saadaan kertomalla herätteet ja määrittelemällä saatavalle tulolle aikakeskiarvo $\langle x_1(t)x_2(t) \rangle$.



Kuva 10. $x_1(t)$ ja $x_2(t)$ välinen korrelaatio. [16, s. 364]

Tutkitaan seuraavaksi kuvan 11 mukaista tilannetta, jossa toista identtistä herätettä siirretty vasemmalla ajan τ verran.



Kuva 11. Identtiset herätteet, joista toista on siirretty τ verran. [16, s. 364]

Ajan hetkellä t , kun $x_1 = x(t)$ ja $x_2 = x(t + \tau)$, korrelaatio on $\langle x(t)x(t + \tau) \rangle$. Autokorrelaatio määritellään kaavalla [16, s. 364]

$$R_{xx}(\tau) = \langle x(t)x(t + \tau) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t + \tau) dt. \quad (30)$$

Käsitellään lopuksi kahta eri herätettä $x_1(t)$ ja $x_2(t)$. Herätteiden välinen ristikorrelaatio saadaan kaavalla [16, s. 366]

$$R_{x_1x_2}(\tau) = \langle x_1(t)x_2(t + \tau) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_1(t)x_2(t + \tau) dt. \quad (31)$$

Autokorrelaation Fourier-muunnosta kutsutaan tehosppektritiheydeksi ja lasketaan kaavalla [20, s. 36]

$$S_{XX}(\bar{\omega}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{XX}(\tau) e^{-i\bar{\omega}\tau} d\tau. \quad (32)$$

Vastaavasti saadaan ristikorrelaation ristospektritiheys Fourier-muunnoksella [21, s. 289]

$$S_{X_1X_2}(\bar{\omega}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{X_1X_2}(\tau) e^{-i\bar{\omega}\tau} d\tau. \quad (33)$$

Tehosppektritiheys $S(\bar{\omega})$ kuvaa joukon neliöaikakeskiarvoa taajuustasossa [20, s. 36].

3.2.3 Yhden vapausasteen värähtelysystemin tehosppektritiheys

Tutkitaan yhden vapausasteen värähtelysystemiä, johon vaikuttaa stationaarinen satunnaisheräte $F(t)$. Tällöin vasteen tehosppektritiheydelle voidaan johtaa kaava [15, s. 5-4]

$$S_{XX}(\bar{\omega}) = H(\bar{\omega})^* H(\bar{\omega}) S_{FF}(\bar{\omega}) = |H(\bar{\omega})|^2 S_{FF}(\bar{\omega}) \quad (34)$$

jossa

$S_{FF}(\bar{\omega})$ on herätteen tehosppektritiheys

$S_{XX}(\bar{\omega})$ on vasteen tehosppektritiheys

$H(\bar{\omega})^*$ on $H(\bar{\omega})$ kompleksikonjugaatti

$|H(\bar{\omega})|^2$ on siirtofunktio, joka voidaan laskea kaavalla

$$|H(\bar{\omega})|^2 = \frac{1}{k^2 [1 + (4\zeta^2 - 2)r^2 + r^4]} \quad (35)$$

jossa

k on jäykkyys

ζ on vaimennussuhde

r on taajuussuhde,

joka lasketaan kaavalla

$$r = \frac{\bar{\omega}}{\omega} \quad (36)$$

jossa

ω on ominaiskulmataajuus

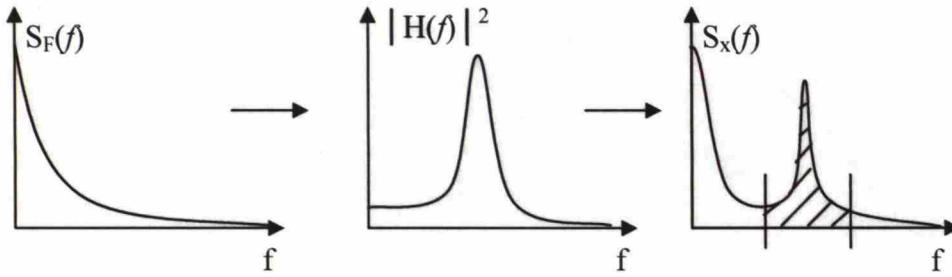
$\bar{\omega}$ on herätteen kulmataajuus.

Jos yhden vapausasteen värähtelysystemin herätteen autokorrelaatio tai tehospektritiheys tiedetään, niin vasteen autokorrelaatio ja tehospektritiheys voidaan ratkaista yhtälön (34) avulla. [15, s. 5-2-6; 17, s. 523] Värähtelysystemiin voi vaikuttaa useampi kuin yksi heräte. Tällöin tilanne on edellä esitettyä monimutkaisempi, koska tällöin vasteeseen vaikuttavat herätteet erikseen ja lisäksi voi syntyä herätteiden välistä ristikorrelaatiota, joka myös vaikuttaa vasteen tehospektritiheyteen. Jos herätteiden välillä on havaittavissa ristikorrelaatiota, tulee vasteen tehospektritiheyden ratkaisemiseksi tuntea myös herätteiden ristikorrelaatiot. [15, s. 5-7-9]

3.3 Tuulikuorman spektritiheyden määrittämisen analyyttiset menetelmät

3.3.1 Johdanto

Jotta rakennuksen vasteet saadaan selvitettyä, tulee tuulikuorman spektritiheys tuntea. Rakennuksen vasteen spektritiheys saadaan yhdenvapausasteen värähtelysystemille laskettua yhtälöllä (34). Spektritiheys voidaan ilmoittaa myös käyttämällä taajuutta f kulmataajuuden $\bar{\omega}$ sijaan. Varsinkin tuulikuorman spektritiheys esitetään usein taajuuden f funktiona. Kuvassa 12 on esitetty yhdenvapausasteen värähtelysystemin vasteen spektritiheyden määrittämistä varten tarvittavien funktioiden kuvaajat taajuuden funktiona.



Kuva 12. Kuvasarja, jossa on esitetty yhden vapausasteen värähtelysteemin, johon vaikuttaa tuulikuorma, herätteen spektritiheys $S_F(f)$ (34), siirtofunktio $|H(f)|^2$ (35) ja vasteen spektritiheys $S_x(f)$ (34).

Kuvasta 12 nähdään, että värähtelysteemin siirtofunktiossa on huippuarvo kohdassa, jossa herätteen taajuus yhtyy värähtelysteemiin ominaistajuuteen eli heräte ja värähtelysteemi ovat resonanssissa. Useamman vapausasteen värähtelysteemissä heräte voi yhtyä värähtelysteemiin eri ominaistajuuksiin, jolloin siirtofunktion kuvaajassa voidaan nähdä useita ”piikkejä”. Vastaava ”piikki” on nähtävissä vasteen spektritiheyden kuvaajassa resonanssitaajuuden kohdalla. Jos vapausasteita on useampi, voi kuvaajassa olla useita ”piikkejä” resonanssitaajuuksien kohdalla. Tutkittaessa rakennuksen värähtelyitä, ei olla kiinnostuneita vasteen spektrin alkuosasta eli taustavasteesta, koska sen merkitys värähtelyyn on mitätön. Värähtelyn kannalta merkittävämpiä ovat resonanssivasteet (kuvassa 12 resonanssivaste on esitetty poikkiviivoin). Kokeellinen menetelmä tuulikuorman spektritiheyden määrittämiseksi esitetään kappaleessa 5.2.

3.3.2 Tuulenpuuskaisuuden spektritiheys

Tutkittaessa tuulenpuuskaisuuden spektritiheyttä, on tuulenpyörteen ulottuvuus tärkeässä osassa. Tuulenpyörteen ulottuvuus kuvaa tuulenpuuskaan keskimääräistä kokoa tarkoituksenmukaiseen suuntaan ja sitä kuinka nopeasti puuskan ominaisuudet vaihtelevat. Tuulensuuntaiseen puuskaisuuden tehospektritiheydelle on esitetty useita erilaisia ehdotuksia muun muassa Karmanin (1948), Panovskin (1964), Davenportin (1967) ja Solarin (1987, 1993) toimesta. Eurokoodin [1] tuulenpuuskaisuuden spektritiheys perustuu Solarin esittämään kaavaan. [22, s. 1-2]

$$\frac{fS_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{6,868x}{(1+10,32x)^{\frac{5}{3}}} \quad (37)$$

jossa

$$x = \frac{L_u^C f}{U(z)} \quad (38)$$

jossa

$$L_u^C = 300 \left(\frac{z}{300} \right)^{0,46+0,074 \ln z_0} \quad (39)$$

jossa

σ_u on turbulenssin keskihajonta

L_u on tuulenpyörteen ulottuvuus

$U(z)$ on tuulen keskinopeus korkeudella z

z_0 on rosoisuusmitta

z on tarkasteltava korkeus

f on taajuus.

Solarin kaavaa voidaan soveltaa alle 200 metriä korkeissa rakennuksissa, joka on myös eurokoodin sovellettavuusraja. Turbulenssin keskihajonta σ_u saadaan turbulenssin intensiteetin avulla. Turbulenssin intensiteetti on riippuvainen maastoluokasta, ja se lasketaan kaavalla [23, s. 75]

$$I = \frac{\sigma_u}{\bar{U}} \quad (40)$$

jossa

σ_u on turbulenssin keskihajonta

\bar{U} on tuulenkeskinopeus.

3.3.3 Tuulikuorman spektritiheys

Tuulennopeus voidaan ilmaista yhtälöllä [2, s. 173]

$$U = \bar{U} + u_m \quad (41)$$

jossa

\bar{U} on tuulennopeuden keskinopeus

u_m on tuulennopeuden heilahtelukomponentti.

Kun \bar{U} on paljon suurempi kuin u_m , voidaan tuulenpaineen spektritiheydelle johdattaa yhtälö [2, s. 173]

$$S_{pp}(f) = \rho^2 \bar{U}^2 C_D^2 S_u(f) \quad (42)$$

jossa

ρ on ilmantiheys

\bar{U} on tuulenkeskinopeus tarkasteltavassa korkeudessa

C_D on voimakerroin

$S_u(f)$ on tuulenpuuskaisuuden spektritiheys.

Nyt kokonaistuulikuorman spektritiheys fysikaalisissa koordinaateissa saadaan kaavalla [2, s. 174]

$$S_{FF}(f) = (\rho^2 C_D^2 A^2 \bar{U}^2) \cdot \chi(f) \cdot S_u(f) \quad (43)$$

jossa

A on rakennuksen pinta-ala

$\chi(f)$ on aerodynaaminen admittanssi.

Aerodynaamisen admittanssin $\chi(f)$ avulla otetaan huomioon rajakerrostuulennopeuden lisäksi tuulen kuormittaman rakennuksen värähtelymuoto [23, s. 250], ja se voidaan määrittää koherenssin avulla [3, s. 44–45]. Koherenssi on ristikorrelaatio kahden eri pisteessä vaikuttavan heilahtelunopeuden välillä kuvaten heilah-

telunopeuksien riippuvuutta toisistaan eli tuulennopeuden avaruusjakaumaa [3, s.44] Tuulitunnelikokeissa $\chi(f)$ sisältyy kokeista saataviin mittaustuloksiin.

3.3.4 Kiihtyvyyksien ja vasteen huippuarvon määrittäminen

Tässä työssä lasketaan esimerkkirakennuksen kiihtyvyyksien ja siirtymien resonanssikomponentit. Kiihtyvyyksille ja siirtymille voidaan määrittää myös taustakomponentit. Tässä kappaleessa esitetään likimääräiskaavat, joilla voidaan laskea kiihtyvyyksien ja siirtymien resonanssi- ja taustakomponentit.

Siirtymän resonanssivasteen keskihajonta yleistetyssä koordinaatistossa voidaan laskea likimääräiskaavalla [24, s. 2643]

$$\sigma_{x,Ri} \approx \frac{1}{K_i} \sqrt{\frac{\pi}{4\zeta_i} f_i S_{PP}(f_i)} \quad (44)$$

jossa

K_i on yleistetty jäykkyys

ζ_i on vaimennussuhde

f_i on taajuus

$S_{PP}(f_i)$ on yleistetyn tuulivoiman spektritiheys.

Vastaavasti siirtymän taustavasteen keskihajonta yleistetyssä koordinaatiossa lasketaan likimääräiskaavalla [24, s. 2643]

$$\sigma_{x,Bi} \approx \frac{1}{K_i} \sqrt{\int_0^{\infty} S_{PP}(f_i) df} \quad (45)$$

Kiihtyvyyden taustakomponentti yleistetyssä koordinaatiossa voidaan laskea likimääräiskaavalla [24, s. 2643]

$$\sigma_{x,Bi} \approx \frac{1}{K_i} \sqrt{\int_0^{\infty} (2\pi f)^4 S_{PP}(f_i) df} \quad (46)$$

ja resonanssikomponentti likimääräiskaavalla [24, s. 2643]

$$\sigma_{x,Ri} \approx \frac{1}{M_i} \sqrt{\frac{\pi}{4\zeta_i} f_i S_{PP}(f_i)} \quad (47)$$

jossa

M_i on yleistetty massa.

Vasteet fysikaalisissa koordinaateissa saadaan laskettua kertomalla yleistetyissä koordinaateissa saadut vasteen ominaismuotomatriisilla (25). Yleensä kiihtyvyyden taustakomponentti jätetään huomioimatta, koska se on pieni kiihtyvyyden resonanssikomponenttiin verrattuna [24, s. 2643].

Vasteen huippuarvo voidaan esittää kaavalla [6, s. 5]

$$\hat{x} = \bar{x} + g\sigma_x \quad (48)$$

jossa

\bar{x} on keskimääräinen vaste

σ_x on heilahteluvasteen keskihajonta

g on huippuarvokerroin.

Davenport [18. s. 473] on esittänyt kaavan, jolla huippuarvokerroin voidaan likimäärin määrittellä

$$g = \sqrt{(2 \ln \nu T)} + \frac{0,5772}{\sqrt{(2 \ln \nu T)}} \quad (49)$$

jossa

T on tarkasteluväli

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{x^{(t)}}^2}{\sigma_x^2}} \text{ on tehollinen taajuus.} \quad (50)$$

Kaavassa (48) esitetty heilahteluvasteen σ_x keskihajonta lasketaan kaavalla [6, s. 5]

$$\sigma_x \approx \sqrt{\sigma_{x,Bi}^2 + \sum_j \sigma_{x,Ri}^2} \quad (51)$$

jossa

$\sigma_{x,Bi}$ on taustavasteen keskihajonta

$\sigma_{x,Ri}$ on resonanssivasteen keskihajonta.

Kaavassa (49) esitettyä huippuarvokerrointa käytetään eurokoodissa, kun määritetään rakenteen rakennekerrointa. Rakennekerroin, jota käytetään kokonaistuulikuormia laskettaessa, ottaa huomioon vaikutuksen, joka johtuu tuulenpaineen huippuarvojen eriaikaisuudesta pinnalla sekä turbulenssista aiheutuvasta rakenteen värähtelystä [1, s. 46].

4 TUULITUNNELITEKNIIKAT

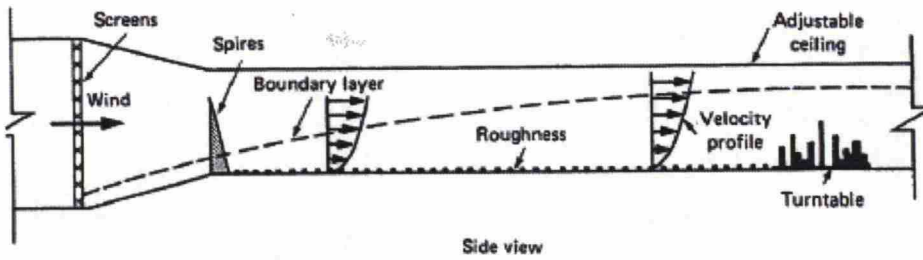
4.1 Johdanto

Kuormitusohjeet eivät anna kaikissa tapauksissa riittävän tarkkoja tietoja tuulen vaikutuksista korkeisiin rakennuksiin. Tällöin tuulitunnelikokeet ovat hyvä tapa selvittää tuulen vaikutukset. Tuulitunnelimittausten avulla saadaan selville paikalliset painejakaumat, tuulikuormat ja tuulen aiheuttamat värähtelyt paljon luotettavammin kuin teoreettisilla menetelmillä [11, s. 147]. Tuulitunnelissa testattavia rakennuksia ovat yleensä korkeat talot, suuren jännevälin omaavat sillat, erikoisen muotoiset rakennukset, ja epätavallisen kevyet ja juostavat rakenteet. Myös maantieteellisesti erikoisilla paikoilla, kuten mäillä, jyrkänteillä, laaksoissa ja kanjo-neissa sijaitsevat rakennukset ovat kohteita, joissa usein hyödynnetään tuulitunnelikokeita. [11, s.147] Suunnittelijoilla käytössä olevat suunnitteluohjeet on tehty perustapauksia varten, joten rakennuksille, jotka ovat rakenteiltaan tai muodoltaan yksilöllisiä, tuulitunnelikokeet voivat olla jopa ainoa tapa saada selville tuulen vaikutukset. Rakennukset omistajat voivat myös vaatia tuulitunnelikokeiden suorittamista, jos rakennuksessa on esimerkiksi herkkiä laitteita. [11, s. 148–151] Tuulitunnelikokeista tulee saada sellaista tietoa, jota ei saada muilla tavoin tarpeeksi tarkasti selville eikä suorittaa tuulitunnelikokeita vain sen takia, että niihin on mahdollisuus.

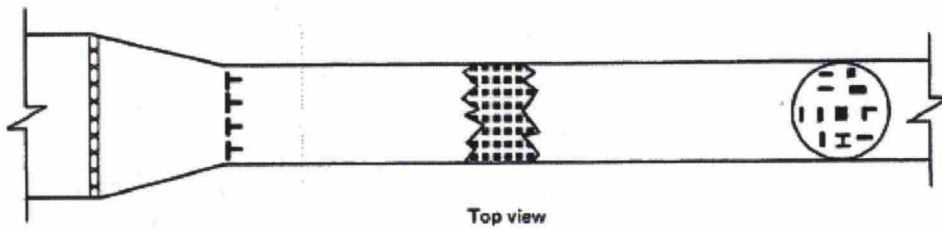
4.2 Rajakerrostuulitunneli

Rakennuksille suoritettavat tuulitunnelikokeet suoritetaan rajakerrostuulitunneliissa, joissa tuulen logaritminen nopeusprofiili (1) ja tuulen turbulenttisuus on mallinnettu todellisuutta vastaavaksi. Rajakerrostuulitunnelit ovat muodoltaan suorakaiteen tai neliön muotoisia, jotta ne simuloivat oikein tuulen nopeuden vaihtelua rajakerroksessa. [11, s. 155] Rajakerrostuulitunnelien leveys vaihtelee yleensä kahdesta neljään metriin, korkeus kahdesta kolmeen metriin ja pituus 15 metristä 30 metriin. Tuulitunneliissa suurin virtausnopeus on 10–45 m/s. [25, s. 83] Rajakerrostuulitunnelin mitta-alueen tulee olla tarpeeksi pitkä luodakseen paksun pystysuuntaisen rajakerroksen, tarpeeksi korkea, jotta rajakerros ei kosketa

kattoa, ja tarpeeksi leveä, jotta malliin voidaan sisällyttää tutkivaa kohdetta ympäröivät rakenteet. Tutkittava malli ei saa estää yli kymmenystä virtauspinta-alasta. Usein testattavia mallit asennetaan kääntyvän alustan päälle, jolloin saadaan tutkittua tuulen vaikutus kaikista suunnista. Tutkittavan rakennuksen ympäristö ja ympäröivät rakennukset tulee mallintaa tarkasti, jotta tilanne vastaa todellisuutta. [11, s. 159–162] Kuvissa 13 ja 14 on esitetty rajakerrostuulitunneli sivulta ja ylhäältä.



Kuva 13. Rajakerrostuulitunneli sivulta. [11, s. 161]



Kuva 14. Rajakerrostuulitunneli ylhäältä. [11, s. 161]

Tuuli saadaan aikaiseksi säädettävällä puhaltimella, jonka avulla mallia voidaan testata eri tuulenopeuksilla. Ensimmäisenä tuuli kulkee suojaverhon läpi. Suojaverhon avulla tuulen nopeus saadaan tasaiseksi. Suojaverho ei saa olla liian tiheä (huokoisuus 90 %), koska muuten se vähentää merkittävästi energiaa ja tuulenopeutta. Tämän jälkeen tuuli oikaistaan suurilla säteittäisillä piikeillä, jotka sijaitsevat heti suojaverhon jälkeen. Tunnelin alkupäässä olevien rakenteiden ja tunnelin lattialla olevien karhennuspalojen avulla tunneliin saadaan muodostuttua todellista rajakerrosta vastaava tuulenopeusprofiili. Samaiset tunnelin alkupään rakenteet ja lattiarakenteet saavat aikaan myös todellisuutta vastaavan tuulen turbulenssin. Edellä mainitut rakenteet tulee aina valita kohdekohtaisesti, mikä vie aikaa. Testattava malli sijoitetaan loppupäähän, jossa tuulen rajakerroksen paksuus on suurimmillaan. Jotta tuulitunnelikokeiden tulokset ovat luotettavia ja vastaavat todellisuutta, tulee testattavan mallin olla geometrisesti identtinen todellisen kohteen

kanssa. Geometrisella identtisuudellä tarkoitetaan sitä, että rakenne ja sitä ympäröivät rakenteet ja maasto on mallinnettu todellisuutta vastaaviin muotoihin. [11, s. 159–162]

Buckinghamin teoreeman mukaisesti ilmiötä kuvaava dimensionaalisesti homogeeninen yhtälö voidaan esittää ilmiöön vaikuttavista muuttujista muodostettujen dimensiottomien tulojen välisenä yhteytenä, jossa kaikki riippumattomat dimensiottomat tulot on otettu huomioon. Jotta tuulitunnelikoe vastaisi täysin todellista ilmiötä eli olisi täysin similaarinen, on jokaisen ilmiöön vaikuttavan dimensiottoman tulon oltava sama kokeessa ja todellisessa ilmiössä. Täydellistä similaarisuutta on kuitenkin vaikea saavuttaa, jos pienoismallin mittakaava on jokin muu kuin 1:1. [26, s. 18] Jokainen dimensioton tulo voidaan esittää mallilakien muodossa [27, s. 66–67]. Tässä työssä tarvitaan muunnetun nopeuden mallilakia, joka esitetään kaavalla [26, s. 19]

$$\left(\frac{v}{fd}\right)_M = \left(\frac{v}{fd}\right)_P \quad (52)$$

jossa

v on tuulennopeus

d on tuulen suuntaisen sivun pituus

$()_M$ tarkoittaa pienoismallin arvoja

$()_P$ tarkoittaa todellisen rakennuksen arvoja

f on taajuus.

Yhtälöä (52) tarvitaan, kun määritellään tuulikuorman spektritiheyden arvoja. Kaavan avulla saadaan selville esimerkiksi rakennuksen ominaistaajuutta vastaava taajuus tuulitunnelissa, kun muut muuttujat tunnetaan. Pienoismallin tuulen suuntaisen sivun pituus d riippuu valitusta geometrisestä mittakaavasta. Geometrinen mittakaava määritellään kaavalla

$$\eta = \frac{d_M}{d_P}. \quad (53)$$

4.3 Mittausmenetelmät ja välineet

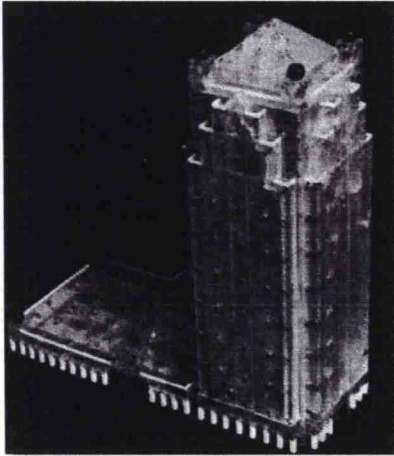
Tuulitunnelit voivat olla rakenteeltaan avoimia ja suljettuja. Avoimet tuulitunnelit ovat rakenteeltaan suorja rakenteita, joista ilma virtaa sisään toisesta päästä ja poistuu toisesta päästä. Suljetut tuulitunnelit ovat suljettuja silmukoita, joissa sama ilma kiertää silmukassa koko kokeen ajan. [11, s. 152]

Tuulitunnelissa voidaan mitata tuulennopeutta, turbulenssia, painetta ja kokonais-tuulikuormia. Mitattavia suureita varten on kehitetty useita erilaisia mittausvälineitä. Tuulennopeuden mittaamista varten on olemassa Pitot-putkia, kuormalanka-tuulimittareita ja niiden sovelluksia, laser-tuulimittareita ja hankaustestejä. Tuulitunneliin asennettavilla paineantureilla voidaan mitata tuulitunnelissa vaikuttavaa painetta tai rakennukseen kohdistuvia paineita. [28, s. 222–240] Tuulitunnelissa voidaan mitata myös rakenteeseen vaikuttavia kokonaistuulikuormia aerodynaamisilla malleilla tai korkeataajuisilla vaakamittaustekniikoilla. Nykyisin on käytössä kolme perusmallia, joita käytetään yleisesti tuulitunnelikokeissa:

- 1.) Jäykkä painemalli
- 2.) Aeroelastinen malli
- 3.) Korkeataajuinen vaakamittaustekniikka. [25, s. 83]

4.3.1 Jäykkä painemalli

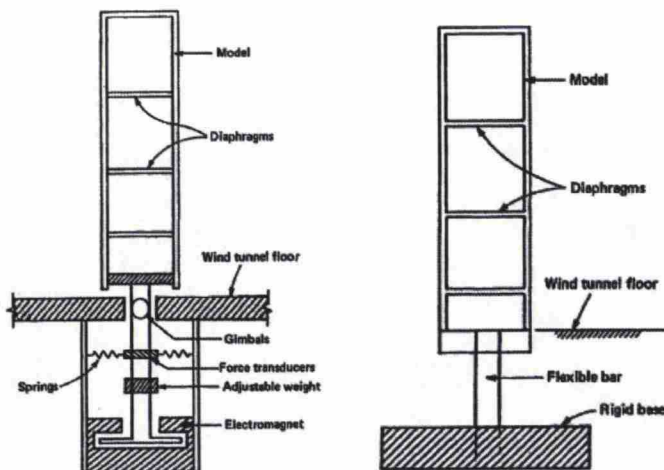
Painemallilla mitataan paikallisia painehiippuja ja keskimääräistä painetta, jonka avulla saadaan määritettyä keskimääräiset kuormat. Painetietoja voidaan käyttää esimerkiksi julkisivuverhouksen mitoittamiseen. Lisäksi mallilla voidaan määrittää jokaisen kerroksen tuulikuorman resultanttivoima, joita voidaan käyttää rakennuksen rungon suunnittelussa. Yleensä mallia voidaan kiertää noin 10–20 astetta kerrallaan, jolloin tuuli saadaan vaikuttamaan joka suunnasta. [25, s. 84] Mallin avulla ei voida tutkia rakennuksen värähtelyjä. Jäykkä painemalli on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Jäykkä painemalli. Kuvasta nähdään, kuinka malliin on kiinnitetty lukuisia painetta mittaavia anturoita. [25, s. 85]

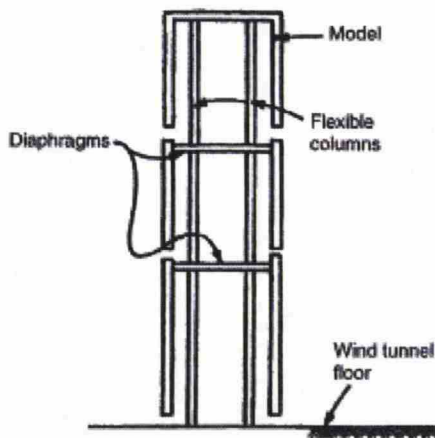
4.3.2 Aeroelastinen malli

Aeroelastisella mallilla voidaan määrittää tuulen rakennukseen aiheuttamat kuormaresultantit, siirtymät ja kiihtyvyydet. Aeroelastisia malleja on useita: jäykkiä (kuva 16), joustavia (kuva 17) ja malleja, jotka simuloivat vääntöä. Malli on käytökelpoinen hoikille, juostaville ja dynaamisesti herkille rakennuksille. Aeroelastisen mallin avulla saadaan luotettavin ennuste todellisen rakennuksen liikkeistä tuulessa. Mallia testaan useissa eri tuulenopeuksissa. [25, s. 83, 86] Aeroelastisten mallien ongelma on, että mittaukset voivat kestää useita kuukausia.



Kuva 16. Jäykkiä aerodynaamisia malleja. Vasemman puoleisessa mallissa kehyksen lähellä olevat jouset on valittu niin, että niiden avulla malli saavuttaa kahden ensimmäisen ominaisuuden mukaiset taajuudet. Mallin alaosassa olevat elektromagneetit simuloivat oikean rakennuksen vaimennusta. Oikean puoleisessa mallissa juostava teräspalkki on valittu niin,

että se kuvaa oikean rakennuksen jäykkyyttä kahteen horisontaaliseen suuntaan. Malli on kiinnitetty jäykästi perustuksiin. Mallissa vaimennusta simuloidaan ilmavaimentimilla. Jäykkiä malleja voidaan käyttää rakennuksille, jotka ovat koko matkaltaan samanmuotoisia, jolloin voidaan olettaa, että niiden ominaismuodot muuttuvat lineaarisesti korkeiden suhteen. Mallia ei voida käyttää rakennuksille joiden muoto ja jäykkyys vaihtelevat korkeuden mukaan, koska tällaisten rakennusten ominaismuodot eivät välttämättä ole lineaarisia ja koska tällaisten rakennusten korkeammilla ominaismuodoilla voi olla suuri merkitys. [25, s. 88–90]

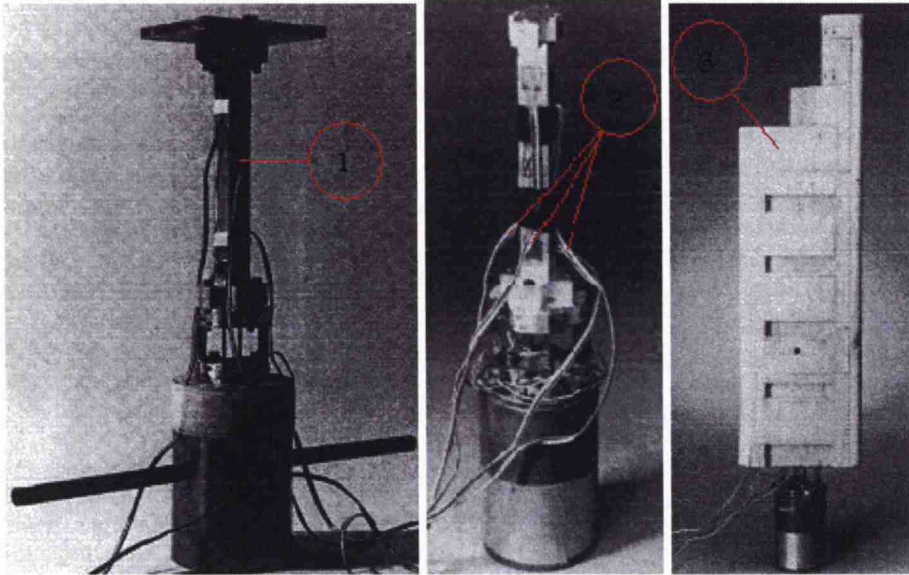


Kuva 17. Juostava aerodynaaminen malli. Yllä olevassa mallissa jäykisteet kuvaavat lattiarakenteita ja ne ovat yhdistettyinä joustaviin pilareihin. Massat ovat keskitettyjä massoja, jotka sijaitsevat jäykisteissä, kuvaten lattiarakenteita. Kuori on katkaistu, mikä mahdollistaa osien suhteellisen liikkeen toisiinsa nähden. Malli sopii monimuotoisille rakennuksille, joiden jäykkyys vaihtelee merkittävästi, ja rakennuksille, joiden ominaismuodot eivät ole lineaarisia ja joiden korkeimmilla ominaismuodoilla voi olla merkittävä vaikutus rakennuksen dynaamisen käyttäytymiseen. [25, s. 90]

4.3.3 Korkeataajuinen vaakamittaustekniikka

Korkeataajuista vaakamittaustekniikkaa on käytetty korkeisiin rakennuksiin tuulen aiheuttamien vasteiden tutkimiseen jo 70- ja 80-lukujen vaihteesta lähtien. [29, s. 579] Aeroelastisen mallin heikkous on sen suunnittelun ja rakentamisen vaikeus, ja testien pituus. Testit voivat kestää 10–12 viikkoa. Korkeataajuisella vaakamittaustekniikalla saadaan samat tiedot, mutta nopeammin ja halvemmalla. [25, s. 92] Tekniikan toiminnan edellytyksenä on, että pienoismallin massa on pieni, jolloin vaakamallin ominaistajuus on huomattavasti suurempi kuin odotetut tuuli-voiman taajuudet eikä mallin ominaistajuus näin ollen häiritse mittaustuloksia. [30, s. 16] Kaksi korkeataajuista vaakamittaustekniikkaa on saanut suosiota. En-

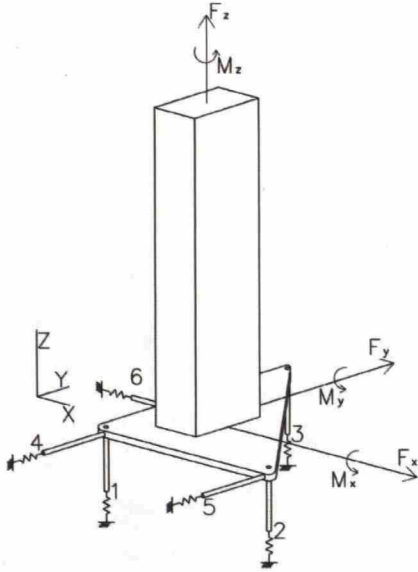
simmäisessä mallissa (kuva 18) ulkokuori on yhdistetty joustavaan ulokepalkkiin. Ulkokuoren sisään on asennettu kiihtyvyyss- ja venymäanturat. Aerodynaamiset voimat saadaan kiihtyvyyss- ja venymämittauksista. [25, s. 92]



Kuva 18. Joustava voimatasapainomalli. Vasemmalla ja keskellä on lähikuvat mittauslaitteistosta ja oikean puoleisessa kuvassa mittauslaitteiston päälle on rakennettu malli tutkittavasta rakennuksesta. [25, s. 94] Kuvaan on lisätty juostavan tasapainomallin osat: 1 = ulokepalkki, 2 = kiihtyvyyss- ja venymäanturat ja 3 = ulkokuori.

Toisessa mallissa hyvin kevyt pienoismalli kiinnitetään alapäästään jäykästi hyvin herkän korkean ominaistaajuuden omaavan tasapainovaa'an päälle, joka mittaa tuulen aiheuttamia voimaresultantteja ja taivutus- ja vääntömomenteja vaa'an ja pienoismallin kiinnityskohdassa. [25, s. 92] Malli esitetään kaavamaisesti kuvassa 19. Voima-antureita on kuvassa kuvattu kaavamaisesti jousilla.

Tässä työssä on käytössä kuvan 19 kaltaista 6-komponenttista vaakaa. Vaa'an sisällä on kuusi venymäliuskoista koostuvaa voima-anturia. Voima-anturit mittaavat kuutta voimasuuretta (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y ja M_z) pienoismallin alareunan tasolla. Tutkittava pienoismalli kiinnitetään teräslevyn avulla vaakaan. Vaaka yhdistetään vahvistimeen ja tiedot luetaan mittakortin avulla tietokoneelta. Tietokoneella käytettävällä ohjelmalla saadaan tulokseksi voima-anturien jännitearvoja ajan funktiona.



Kuva 19. Kaavamainen esitys 6-komponenttisesta korkeataajuisesta vaa'asta. Lisäksi kuvassa on esitetty kokeissa mitattavat suuret: tuulensuuntainen resultanttivoima F_x , tuulta vastaan kohtisuora resultanttivoima F_y , pystysuora voimaresultantti F_z , kokonaismomentti x-akselin suhteen M_x , kokonaismomentti y-akselin suhteen M_y ja vääntömomentti z-akselin suhteen M_z . Kuvassa numeroidut jousit 1-6 kuvaavat voima-antureita. Kuvassa on esitetty myös tutkittava suorakaiteen muotoinen rakennus, joka on kiinnitetty aluslevyyn.

Ennen varsinaisia mittauksia tulee suorittaa vaa'an kalibrointi, jonka avulla saadaan selvitettyä mitattujen jännitteiden ja voimasuureiden välinen yhteys. Mittauslaitteet aiheuttavat mittaustuloksiin häiriökohinaa, joka tulee huomioida sekä kalibrointia että varsinaisia mittauksia suoritettaessa. Kalibrointi voidaan suorittaa tekemällä kahdeksan mittausta. Ensimmäisellä ja viimeisellä mittauskerralla määritetään häiriökohinan suuruus. Näiden mittausten välillä suoritetaan kuusi mittausta erisuuntaisille kuormille. Mittausten perusteella saadaan muodostettua 6-kalibrointimatriisi, jolla kerrotaan varsinaisissa mittauksissa kanavista saatavilla jännitearvot. Tästä saadaan tuloksena voimasuureet F_x , F_y , F_z , M_x , M_y ja M_z ajan funktiona. Hyvissä valmisvaa'oissa kanavien keskinäiskytkentä on pientä, jolloin kerroinmatriisi on lähes diagonaalinen. Käyttämällä nopeaan Fouriermuunnokseen perustuvaa tietokoneohjelmaa (FFT) [19], saadaan muodostettua voimasuureiden aikahistorioita vastaavat spektritiheydet. Spektritiheyksien muodostamisen jälkeen rakennuksen kiihtyvyydet määritellään käyttämällä hyväksi satunnaisvärähtelyjen teoriaa ja moodisummausmenetelmää.

5 KORKEATAAJUISEN VAAKAMITTAUSTEKNIIKAN SOVELTAMINEN KORKEIDEN RAKENNUSTEN TUULIVASTEIDEN MÄÄRITTÄMISEEN

5.1 Tuulikuormien määrittäminen

Työssä määritetään staattiset tuulikuormat, ja kvasistaattiset minimi- ja maksimituulikuormat. Tuulikuormat saadaan laskettua kalibrointimatriisin ja mittauksista saatavien jännitearvojen avulla. Tuloksena saadaan voimasuureiden F_x , F_y , F_z , M_x , M_y ja M_z aikahistoriat. Aikahistorioista saadaan laskettua taulukon 2 mukaiset tilastolliset suureet.

Taulukko 2. Esimerkki voimasuureiden aikahistorioista lasketuista tilastollisista suureista. Tuloksena saadaan voimasuureiden keskiarvot, huippuarvot, keskihajonnat ja huippuarvokertoimet.

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
MEAN	-1.37	0.08	-0.07	-0.01	-0.18	-0.01
STDEV	0.22	0.09	0.09	0.01	0.03	0.00
PEAK ⁺	-0.80	0.43	0.21	0.03	-0.11	0.00
PEAK ⁻	-2.11	-0.23	-0.39	-0.05	-0.26	-0.02
G ⁺	2.59	4.09	3.12	3.53	2.59	2.77
G ⁻	-3.37	-3.67	-3.64	-4.04	-3.19	-3.38
G	2.98	3.88	3.38	3.78	2.89	3.07

Ennen varsinaisia mittauksia ja mittausten jälkeen mitataan häiriökohinan aiheuttamat jännitearvot, joista saadaan myös jokaisen kuuden kanavan häiriökohinan keskiarvot, huippuarvot, keskihajonnat ja huippuarvokertoimet. Häiriökohinaa mitatessa virtausnopeus tuulitunnelissa on 0 m/s. Varsinaisia mittauksia suoritetaan 36 kappaletta kääntämällä pienoismallia kymmenen astetta kerrallaan. Tällöin saadaan tuuli vaikuttamaan joka suunnasta. Jokaisesta mittauksesta saadaan yllä esitetyn taulukon kaltaisia tuloksia. Varsinaisista mittaustuloksista tulee vähentää häiriökohinan arvot, josta saadaan tulokseksi tuulen aiheuttamat voimasuureet. Häiriökohinan oletetaan muuttuvan ajan suhteen lineaarisesti ennen varsinaisia mittauksia saatavista arvoista mittausten jälkeisiin arvoihin. Tällä tavoin saadaan selvitettyä jokaisen mittauksen aikana vallinnut häiriökohinan taso. Tulokse-

na saatavat voimasuureiden arvot ovat pienoismalliin kohdistuvia voimia, joten ne pitää skaalata, jotta saadaan todellista rakennusta vastaavat voimasuureet. Skaalaus perustuu dimensiottomiin tuloihin. Voimille ja momenteille on omat skaalaukset. Skaalaukset muodostaminen on esitetty liitteessä C. Voimat skaalataan kertoimella

$$\left(\frac{v_p}{v_m}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{\eta}\right)^2 \quad (54)$$

jossa

η on geometrinen mittakaava

v_p on tuulennopeus luonnossa korkeudella $0,6 \cdot$ rakennuksen korkeus

v_m on virtausnopeus tuulitunnelissa pienoismallin kohdalla, joka

saadaan laskettua kaavalla

$$0,96 \cdot v_{mn} \quad (55)$$

jossa

v_{mn} on nimellinen virtausnopeus tuulitunnelissa.

Tuulitunnelissa vallitseva virtausnopeus mitataan tunnelin alkupäässä, joten sitä joudutaan skaalaamaan kertoimella 0,96, jotta saadaan mallin kohdalla vaikuttava virtausnopeus. Käytettävä kerroin on tuulitunnelikohtainen.

Momentit skaalataan kertoimella

$$\left(\frac{v_p}{v_m}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{\eta}\right)^3 \quad (56)$$

Staattiset tuulikuormat saadaan kertomalla taulukon 2 keskiarvot (MEAN) skaalaukset. Kvasistaattiset tuulikuormat sisältävät rakennuksen koon vaikutuksen ja tuulen puuskanopeuden, mutta eivät rakennuksen dynamiikan vaikutuksia. Jos rakennuksen dynamiikka halutaan huomioida, tulee laskea staattiset korvauskuormat. Staattisia korvauskuormia ei lasketa tässä työssä. Määriteltäessä kvasistaattisia tuulikuormia rajoitetaan matalalle taajuusalueelle, joilla rakennuk-

sen dynamiikalla ei ole merkitystä. Tutkittavat taajuudet ovat luonnossa alle 0,05 Hz. Tuulitunnelissa 0,05 Hz vastaavaa taajuus saadaan laskettua kaavalla (52). Tätä taajuutta suuremmat taajuudet suodatetaan mittauksista pois. Esimerkiksi kuorman F_x kvasistaattiset positiiviset ja negatiiviset huippuarvot saadaan laskettua kaavoilla

$$F_{Qs,x}^+ = F_{m,x} + g^+ \cdot \sigma_{F,x} \quad (57)$$

$$F_{Qs,x}^- = F_{m,x} + g^- \cdot \sigma_{F,x} \quad (58)$$

jossa

$F_{Qs,x}$ on kvasistaattinen tuulikuorma

$F_{m,x}$ tuulikuorman keskiarvo

$\sigma_{F,x}$ tuulikuorman keskihajonta

g huippuarvokerroin.

Soveltamalla kaavaa (48) taulukon 2 mukaisiin tilastollisiin suureisiin, saadaan huippuarvokertoimet kaavoilla

$$g^- = \frac{PEAK^- - MEAN}{STDEV} \quad (59)$$

ja

$$g^+ = \frac{PEAK^+ - MEAN}{STDEV} \quad (60)$$

Todellisuudessa pienoismalli ei yleensä ole aivan halutussa mittakaavassa, koska pienoismalli on niin pieni, että sen valmistamisessa syntyy helposti pieniä mitta-
virheitä. Tästä seuraa se, että tuulitunnelimittauksesta saadut tuulikuormat kohdis-
tuvat todellisuudessa erikokoisille pinta-aloille kuin todellisessa rakennuksessa.
Tämä otetaan huomioon kertomalla skaalattu tuulikuorma vielä pinta-alojen skaa-
lauskerroimella

$$\frac{A_p}{\left(\frac{1}{\eta}\right)^2 b_M h_M} \quad (61)$$

jossa

A_p on todellisen rakennuksen tuulta vastaan kohtisuora pinta-ala

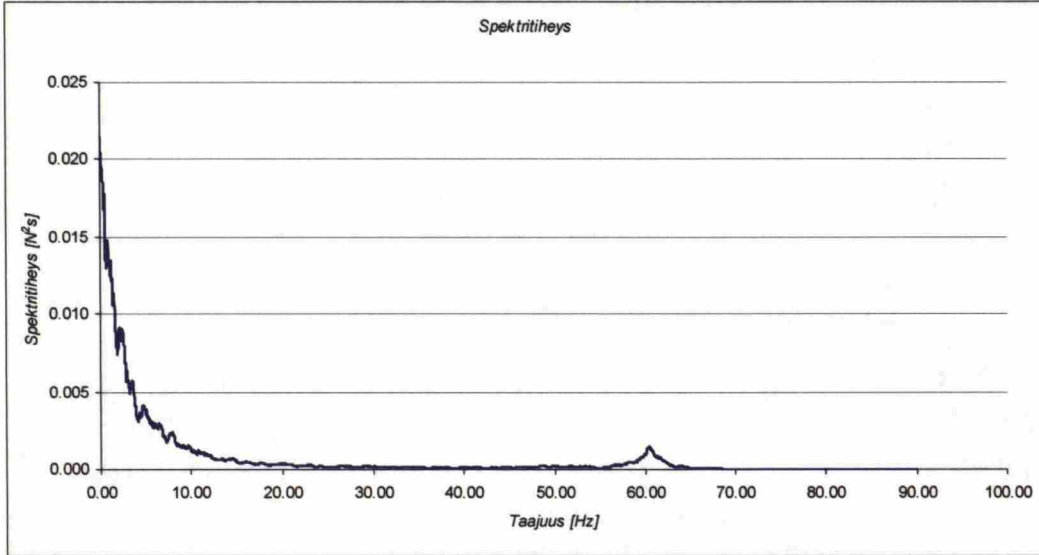
b_M on pienoismallin tuulta vastaan kohtisuoran sivun pituus

h_M on pienoismallin tuulta vastaan kohtisuoran sivun korkeus.

Jos pienoismalli mallinnetaan huolellisesti, ei pinta-alojen suhteessa ole eroa kuin muutamia prosentteja. Tällöin ei tehdä suurta virhettä, vaikka pinta-alojen suhdetta ei huomioitaisikaan.

5.2 Rakennusrungon värähtelyjen määrittäminen

Tuulikuormien lisäksi tuulitunnelikokeista saadaan määritettyä rakennuksen värähtelyt. Tässä työssä esitetty kiihtyvyyksien ja siirtymien laskentaan käytetty laskentamalli perustuu diplomityönohjaajan kanssa käytyjen keskustelujen perusteella tehtyyn yksinkertaiseen otaksumaan tuulikuormasta ja kappaleessa 3 esitettyyn moodisummausmenetelmään ja satunnaisvärähtelyjen teoriaan. Tässä työssä on tehty otaksuma, että vaa'alla rakennuksen perustustasolla lasketut skaalatut kokonaistuulikuormat vaikuttavat yhtä suurina kokonaistuulikuormina rakennuksen korkeudella $0,6h$. FFT-ohjelman avulla saadaan laskettua voimasuureiden spektritiheydet, joista on vähennetty häiriökohina. Kuvassa 20 on esitetty esimerkki tuulitunnelikokeista saaduista spektritiheyksistä.



Kuva 20. Esimerkki tuulikuorman spektritiheydestä. Kuvassa vaakamallin ominaistaajuus näkyy resonanssiipiikkinä noin 60 Hz:n kohdalla.

Nyt tehdyissä mittauksissa vaakamallin ominaistaajuus on noin 60 Hz, joten se tulee suodattaa mittaustuloksista pois. Soveltamalla kappaleessa 3.2.3 esitettyä kaavaa (34), saadaan korjattu spektritiheys määritettyä kaavalla

$$S_{FF, \text{korjattu}}(f) = \frac{1}{|H(f)|^2} \cdot S_{FF}(f) \quad (62)$$

jossa

$S_{FF}(f)$ on mittauksista saatu spektritiheys eli vaste

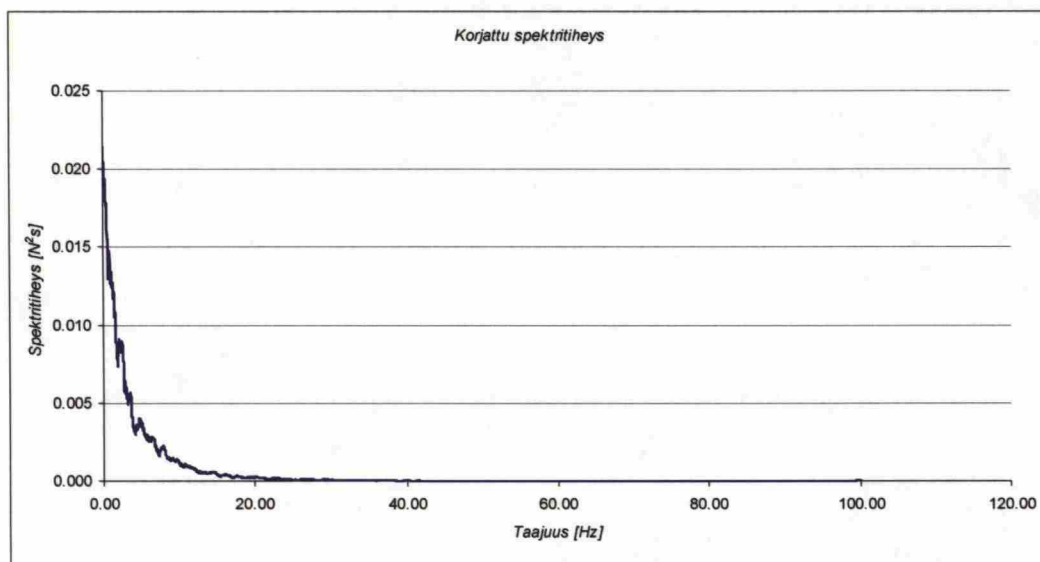
$S_{FF, \text{korjattu}}(f)$ on korjattu spektritiheys eli heräte

$|H(f)|^2$ on siirtofunktio, joka voidaan laskea kaavalla

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{[1 + (4\zeta^2 - 2)r^2 + r^4]} \quad (63)$$

Siirtofunktion määrittämisessä tarvittava resonanssitaajuus saadaan luettua kuvan 20 mukaisen resonanssiipiikin huipulta. Vaimennussuhde tulee valita niin, että korjatun spektritiheyden ja siirtofunktion tulosta $S_{FF, \text{korjattu}}(f) \cdot |H(f)|^2$ saatavan spektritiheyden resonanssiipiikin muoto vastaa mittauksista saatavan spektritihey-

den $S_{FF}(f)$ resonanssiipiikin muotoa. Esimerkki korjatusta spektritiheydestä on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Tuulikuorman korjattu spektritiheys.

Korjatusta spektritiheydestä saadaan jokaista rakennuksen ominaistaajuutta f_i vastaavat tuulikuorman spektritiheyden arvot $S_{FF}(f_i)$. Arvoja ei kuitenkaan voida lukea suoraan rakennuksen ominaistaajuuksien kohdalta vaan arvoja lukiessa tulee huomioida kaavan (52) mukainen skaalaus. Yhtälöstä (52) saadaan muodostettua yhteys, jonka avulla saadaan laskettua taajuus, jonka kohdalta tehospektrin tiheysfunktion arvo tulee lukea, jotta se vastaa oikean rakennuksen ominaistaajuutta vastaavaa tehospektrin tiheysfunktion arvoa. Taajuus saadaan laskettua kaavalla

$$f_m = \frac{f_p d_p v_m}{v_p d_m}. \quad (64)$$

Kaavassa f_p on oikean rakennuksen ominaistaajuus. Virtausnopeus tuulitunnelissa v_m ja tuulenopeus todellisessa tilanteessa v_p valitaan tilanteen mukaan. Tuulenopeus v_p määritellään korkeudella $0,6 \cdot h$. Kuten tuulikuormat niin myös spektritiheyden arvot tulee skaalata, jotta ne vastaavat todellisen tuulikuorman spektritiheyden arvoja. Skaalauskerroimien muodostaminen on esitetty liitteessä C.

Voimien spektritiheydet skaalataan kertoimella

$$\left(\frac{v_p}{v_m}\right)^3 \cdot \left(\frac{1}{\eta}\right)^5 \quad (65)$$

ja momenttien spektritiheydet kertoimella

$$\left(\frac{v_p}{v_m}\right)^3 \cdot \left(\frac{1}{\eta}\right)^6 \quad (66)$$

Rakennuksen siirtymä- ja kiihtyvyydvasteiden resonanssikomponentit yleistetyssä koordinaatistossa saadaan laskettua kaavoilla (44) ja (47). Kaavoissa tarvitaan tuulikuorman spektritiheyden arvot yleistetyssä koordinaatistossa. Mittauksista saatavat spektritiheyksien arvot ovat fysikaalisessa koordinaatistossa. Usean vapausasteen spektritiheys fysikaalisessa koordinaatistossa saadaan muutettua yleistettyyn koordinaatistoon kaavalla [15, s. 5-28]

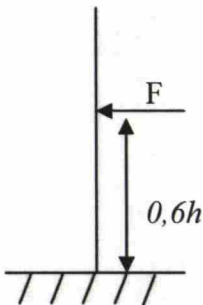
$$[S_{PP}(\bar{\omega})] = [\Phi^T] [S_{FF}(\bar{\omega})] [\Phi] \quad (67)$$

jossa

$[S_{PP}(\bar{\omega})]$ on spektraalitiheys yleistetyssä koordinaatistossa

$[S_{FF}(\bar{\omega})]$ on spektraalitiheys fysikaalisessa koordinaatistossa.

Tässä työssä oletetaan, että saadun voimasuureet vaikuttavat yhtä suurina kokonaispistekuormina rakennuksen korkeudella $0,6 \cdot h$ (kuva 22).



Kuva 22. Työssä on tehty oletus, että kokonaistuulikuorma vaikuttaa pistekuormana rakennuksen korkeudella $0,6h$.

Kun edellä mainittu oletus huomioidaan kaavaa (67) soveltaessa, tuulikuorman spektritiheys yleistetyssä koordinaatistossa saadaan tässä työssä kaavalla

$$S_{PP}(f_i) = \varphi_{i,60}^2 S_{FF}(f_i) \quad (68)$$

jossa

$\varphi_{i,60}$ on rakennuksen ominaistaajuutta f_i vastaava ominaismuoto korkeudella $0,6 \cdot h$.

Kaavoissa (44) ja (47) esiintyvät ominaistaajuutta f_i vastaava yleistetty massa M_i ja jäykkyys K_i saadaan laskettua moodisummausmenetelmän avulla. Kappaleessa 3.1.2 esitetty kaava (14) yleistetyn massan M_i laskentaa varten saadaan tässä muotoon

$$M_i = \sum_{j=1}^n [m_j (\varphi_{x,j}^2 + \varphi_{y,j}^2 + \varphi_{z,j}^2) + J_j \cdot \varphi_{rz,j}^2] \quad (69)$$

jossa

n on kerrosten lukumäärä

j on tarkasteltava kerros

m_j on kerroksen j massa ($[m]$ on diagonaalinen)

$\varphi_{x,j}$ on x-akselin suuntainen ominaismuoto kerroksen j kohdalla

$\varphi_{y,j}$ on y-akselin suuntainen ominaismuoto kerroksen j kohdalla

$\varphi_{z,j}$ on z-akselin suuntainen ominaismuoto kerroksen j kohdalla

$\varphi_{rz,j}$ on kiertymän ominaismuoto z-akselin suhteen kerroksen j kohdalla

J_j on hitausmomentti kerroksen j kohdalla korkeusakselin suhteen.

Ominaisarvot saadaan selvitettyä FEM-laskentaohjelmalla. Hitausmomentilla huomioidaan rakennuksen väännön vaikutus. Kun yleistetty massa M_i on laskettu, yleistetty jäykkyys K_i saadaan määriteltävä kaavalla

$$K_i = M_i (2\pi f_i)^2. \quad (70)$$

Kaavoissa (44) ja (47) esiintyvä moodikohtainen vaimennussuhde ζ_i saadaan laskettua vaimennussuhteen ja logaritmisen dekrementin välisestä yhteydestä. Vaimennuksen ollessa pientä saadaan yhteys [18, s. 47]

$$\zeta_i = \frac{\delta}{2\pi} \quad (71)$$

jossa

δ on vaimennuksen logaritminen dekrementti.

Vaimennuksen logaritminen dekrementti saadaan laskettua eurokoodin liitteen F.5 avulla [1, s. 246]. Vaimennuksen logaritminen dekrementti koostuu sisäisen vaimennuksen, aerodynaamisen vaimennuksen ja erityislaitteista aiheutuvan vaimennuksen logaritmisesta dekrementista. Jos rakennuksessa ei ole erillisiä vaimennuslaitteita, on erityislaitteiden aiheuttavan vaimennuksen logaritminen dekrementti nolla. Sisäisen vaimennuksen logaritminen dekrementti on riippuvainen rakennetyypistä [1, s. 250]. Aerodynaamisen vaimennuksen dekrementti asetetaan usein nolllaksi, koska sen osuus vaimennuksen logaritmisesta dekrementista rakennuksen suuresta massasta johtuen on pieni.

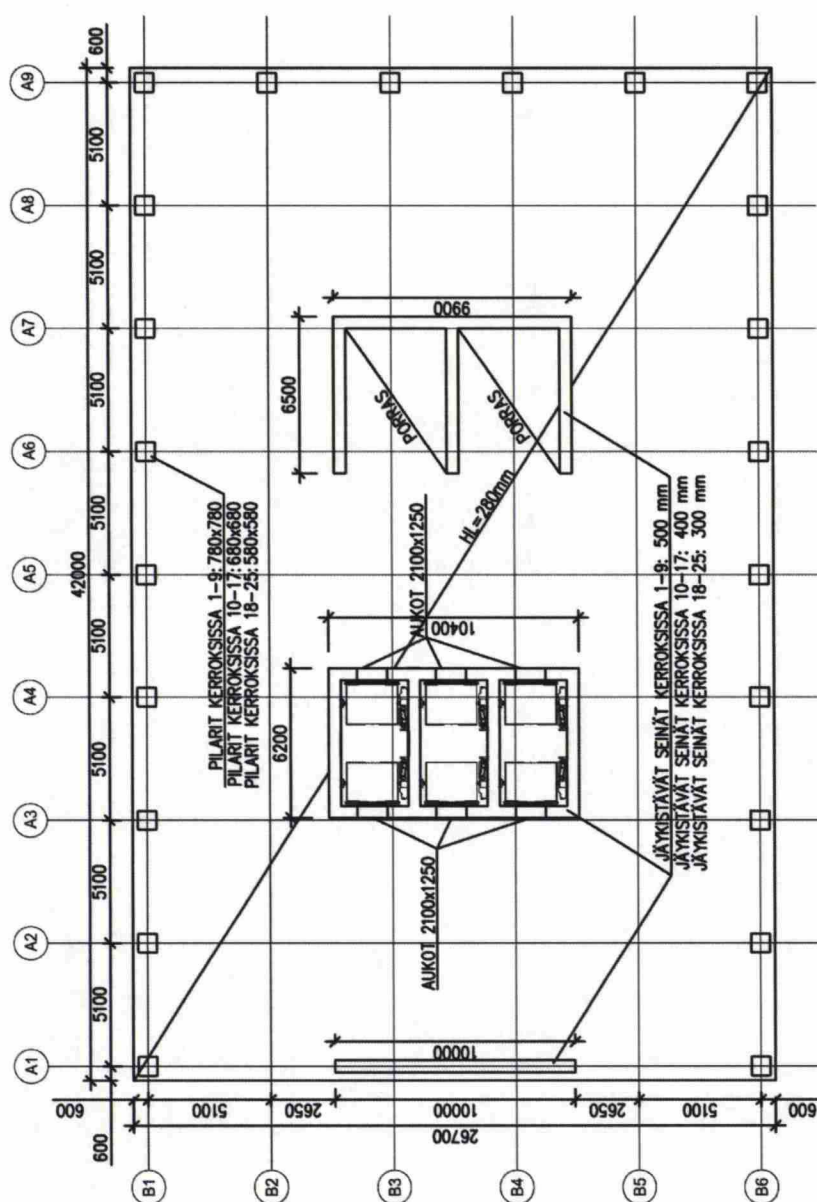
Kun rakennuksen kiihtyvyydet ja siirtymät on laskettu yleistetyssä koordinaatistossa, saadaan kiihtyvyydet ja siirtymät fyysikaalisessa koordinaatistossa kertomalla yleistetyssä koordinaatistossa saatavat arvot rakennuksen ominaismuodoilla (25). Ominaismuodot valitaan sillä korkeudella, jolla kiihtyvyydet ja siirtymät halutaan määrittää. Yleensä kiihtyvyyksiä ja siirtymiä tutkitaan rakennuksen huipulla, jossa ne ovat suurimmillaan.

6 CASE – 100 METRIÄ KORKEA SUORAKAITEEN MUOTOINEN RAKENNUS

6.1 Tutkittava rakennus

6.1.1 Rakennejärjestelmä

Työssä tutkitaan kuvitteellista 100 metriä korkeaa toimistorakennusta. Rakennuksen tasokuva on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Tutkittavan rakennuksen tasokuva.

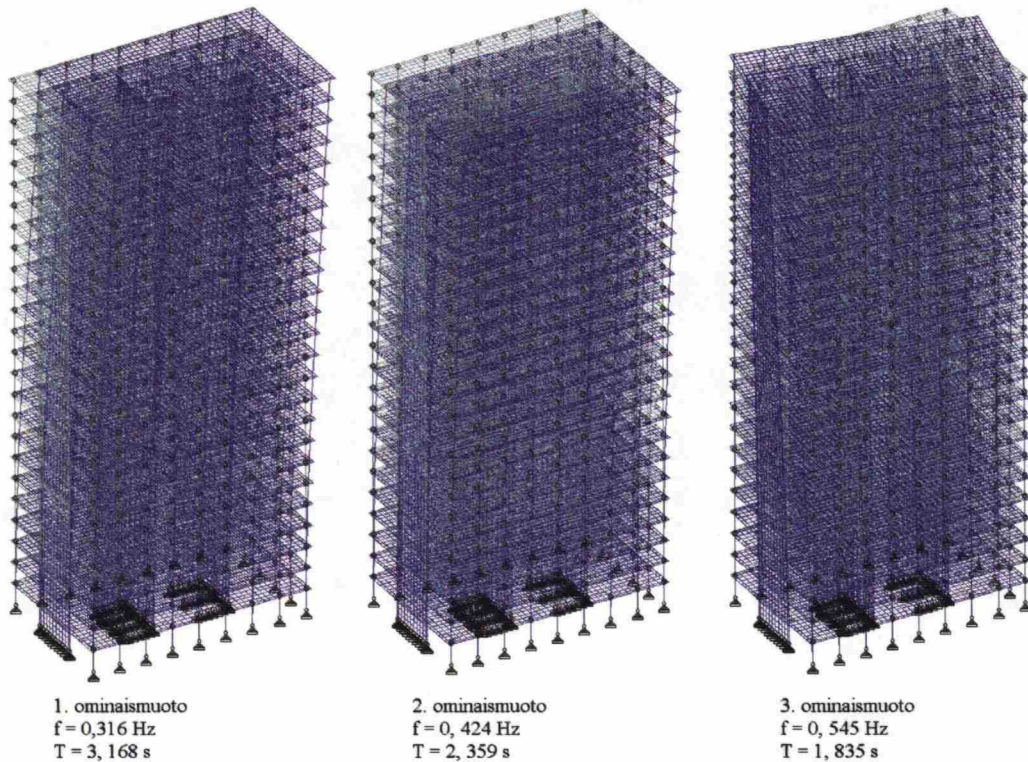
Yhden kerroksen korkeudeksi on määritelty neljä metriä, ja rakennus sisältää 25 kerrosta. Rakennuksen leveys on 26,7 metriä ja pituus 42 metriä. Rakennuksen muoto säilyy samana perustuksista räystäälle saakka, ja rakennuksessa on tasakatto. Rakennus on oletettu rakennettavaksi paikalla valettuna pilarilaattarakenteena. Välipohjien ja yläpohjan korkeus on 280 millimetriä. Rakennuksen pilarien ja jäykistävien rakenneosien dimensiot on pyritty optimoimaan, joten sekä pilarit että jäykistävät rakenneosat pienenevät mentäessä rakennuksessa ylöspäin. Ylemmissä kerroksissa kuormitusten aiheuttamat rasitukset eivät ole niin suuria kuin alemmissä kerroksissa, joten pienemmät rakenneosat riittävät. Rakennuksessa olevat neliöpilarit ovat kolmea eri kokoa: ensimmäisessä yhdeksässä kerroksessa pilarit ovat kooltaan $780 \times 780 \text{ mm}^2$, seuraavassa kahdeksassa kerroksessa $680 \times 680 \text{ mm}^2$ ja kahdeksassa ylimmässä kerroksessa $580 \times 580 \text{ mm}^2$. Rakennus jäykistetään paikalla valetuilla jäykistysseinillä, joiden paksuus ensimmäisessä yhdeksässä kerroksessa on 500 mm, seuraavassa kahdeksassa kerroksessa 400 mm ja kahdeksassa ylimmässä kerroksessa 300 mm. Linjalla A1 sijaitsevan jäykistysseinän lisäksi rungon jäykistävät rakennuksessa olevat hissi- ja porraskuilut. Jäykistys on tarkoituksella valittu epäsymmetriseksi, jotta tässä työssä päästään tutkimaan myös vääntöväärähtelyä.

Tarkasteltaessa rakennuksen värähtelyä, oletetaan, että rakennuksessa vaikuttaa 1/3 eurokoodin [31, s. 2] ohjeellisesta toimistorakennuksen hyötykuormasta ($2,5 \text{ kN/m}^2$), joka on noin $0,83 \text{ kN/m}^2$. Betonin lujuus on C50/55. Rakennus sijaitsee eurokoodin maastoluokan I [1, s. 156] mukaisella alueella. Rakennuksen oletetaan sijaitsevan rannikolla, jossa vaikuttaa kansallisen liitteen [32, s. 2] mukainen merituulen nopeus 22 m/s.

6.1.2 Ominaismuodot ja –taajuudet

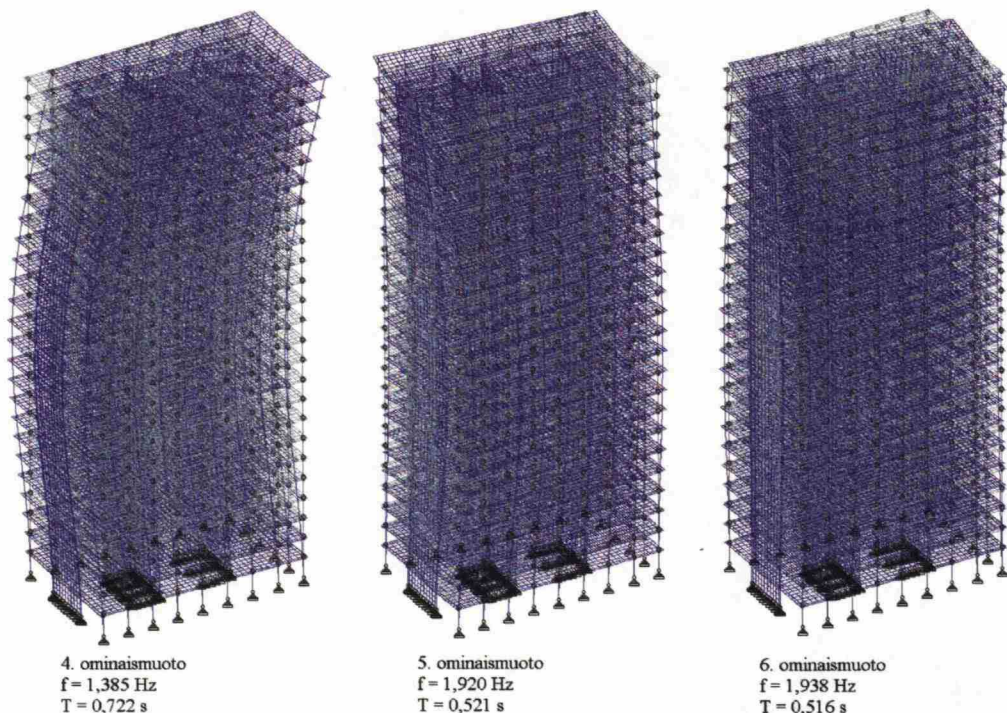
Rakennuksella on lukuisia ominaismuotoja, mutta vain muutamat ensimmäiset ominaismuodot ovat merkittäviä tutkittaessa tuulen aiheuttamia värähtelyjä, koska tuulikuormat ovat keskittyneet pienille taajuuksille (kuva 2). Rakennuksen ominaismuodot ja –taajuudet laskettiin Staad.pro 2007-laskentaohjelmalla. Tutkittaessa ohjelmalla rakennuksen ominaismuotoja ja –taajuuksia, tulee kuormituksia määriteltäessä lisätä kuormitustapakukseen ”modal calculation” –komento. Väräh-

telytarkastelussa värähteleviksi massoiksi huomioidaan omapainot ja edellä mainitun suuruinen hyötykuorma. Kuormia määriteltäessä sekä omapainot että hyötykuormat tulee asettaa vaikuttamaan kolmeen suuntaan: negatiivisen z-akselin suuntaan ja positiivisten x- ja y-akselien suuntaan (akselit kuvan 19 mukaisesti). Kuvissa 24 ja 25 on esitetty tutkittavan rakennuksen kuusi ensimmäistä ominaismuotoa.



Kuva 24. Rakennuksen kolme ensimmäistä ominaismuotoa. Kuvassa vaaleanvihreä rakenne kuvaa itse rakennusta ja tumman sininen ominaismuotoa.

1. ominaismuodossa rakennus värähtelee rakennuksen pitkän sivun suuntaisesti. 1. ominaismuotoa vastaava ominaistajuus on $0,316 \text{ Hz}$. 2. ominaismuoto vastaa rakennuksen lyhyen sivun suuntaista värähtelyä. 2. ominaismuotoa vastaava ominaistajuus on $0,42 \text{ Hz}$. 3. Ominaismuoto vastaa rakennuksen vääntövärähtelyä, jonka ominaistajuus on $0,545 \text{ Hz}$.



Kuva 25. Rakennuksen 4., 5. ja 6. ominaismuoto. Kuvassa vaaleanvihreä rakenne kuvaa itse rakennusta ja tummansininen ominaismuotoa.

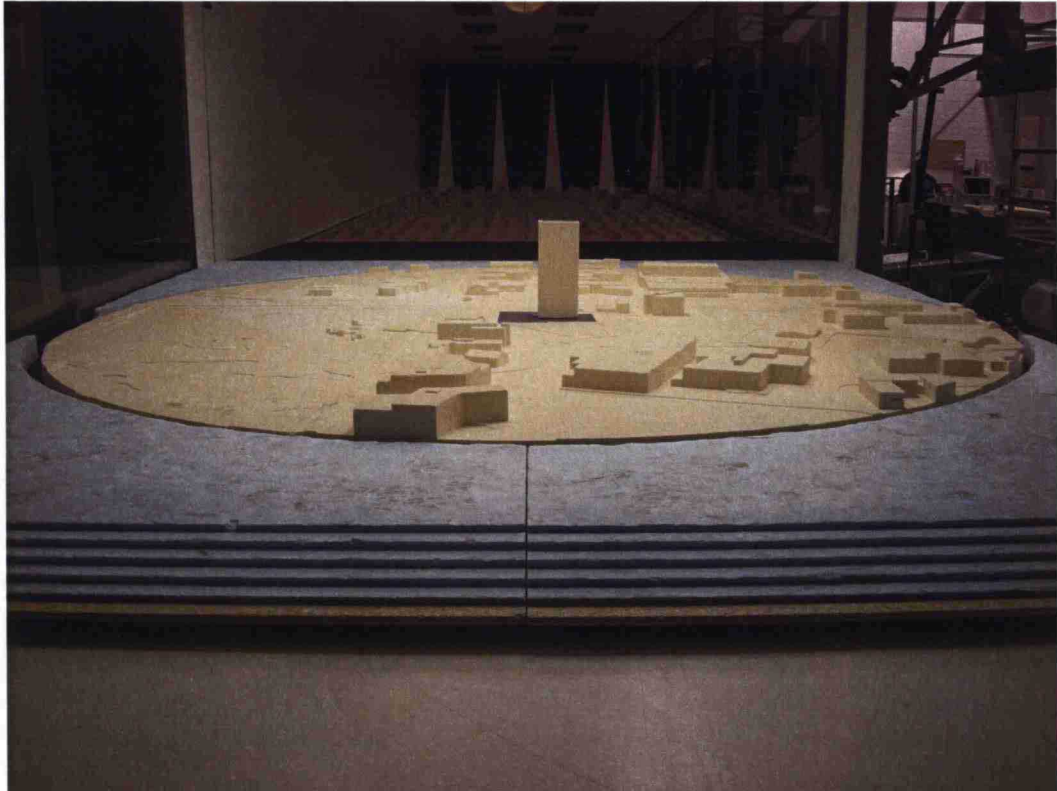
4. Ominaismuoto kuvaa rakennuksen lyhyen sivun suuntaista toista värähtelymuotoa. 4. ominaismuodon ominaisuus on jo 1,385 Hz. 5. ja 6. ominaismuoto ovat hyvin lähellä toisiaan: 5. ominaismuodon ominaistajuus on 1,920 Hz ja 6. ominaismuodon 1,938 Hz. 5. ominaismuodossa on havaittavissa rakennuksen pitkän sivun suuntaista värähtelyä ja vääntövärähtelyä. 6. ominaismuoto kuvaa rakennuksen vääntövärähtelyn toista muotoa.

6.2 Tuulitunnelikokeet

6.2.1 Koejärjestelyt

Tuulitunnepokeet suoritettiin Teknillisen korkeakoulun aerodynamiikan laboratorion tiloissa sijaitsevassa suljetussa rajakerrostuulitunnelissa. Diplomityön ohjaaja kalibrooi tuulitunnelin, mallinsi pienoismallin ja ympäröivät rakenteet, ja järjesti tasapainovaa'an käyttökuntoon. Mittauksessa käytettiin kevyestä materiaalista tehtyä pienoismallia, jonka mittasuhte oli 1/400. Pienoismallin mittasuhte on valittu niin, että tuulitunneliin mahdutaan mallintamaan tarpeeksi laajalta alueelta ympäröiviä rakenteita. Suurempaan mittakaavaan tehty malli peittäisi liian suuren

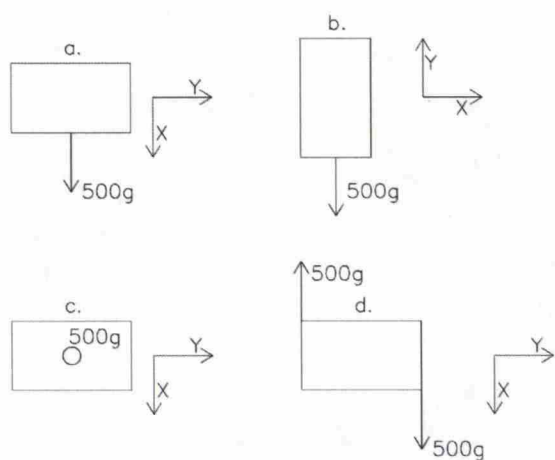
alueen virtausalueesta. Pienoismallin painoi 150 grammaa. Pienoismallin korkeus oli 240 mm, pituus 101 mm ja leveys 59 mm. Pienoismallin ympäröivinä rakenteina käytettiin pienoismallia, jota oli käytetty tunnelissa suoritetuissa edellisissä mittauksissa. Tuulitunneli, pienoismalli ja ympäröivät rakenteet on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. Tuulitunneli, pienoismalli ja ympäröivät rakenteet. Tutkittava rakennus on kuvan keskellä oleva muuta ympäristöä korkeampi rakennus. Myös rakennuksen ympäristö on mallinnettu tarkasti mittasuhteessa 1/400. Sekä tutkittava rakennus että ympäröivät rakenteet on sijoitettu pyörivälle alustalle, joka kuvassa näkyy vaaleankeltaisena. Valokuva on otettu tuulitunnelin perältä. Ilma virtaa kuvassa näkyvien valkoisten piikkien ja puisten karhennuspalojen takaa pienoismallia kohti.

Pienoismalli oli kiinnitetty ruuveilla ohueen teräslevyyn. Tämä teräslevy oli puolestaan kiinnitetty mittausvaakaan, joka kiinnitettiin pyörivään alustaan ruuveilla. Vaaka sisälsi kuusi venymäliuskoista koostuvaa voima-anturia. Voima-anturit mittasivat kuutta voimasuuretta (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y ja M_z). Vaaka yhdistetään vahvistimeen ja tiedot luetaan mittakortin avulla tietokoneelta. Tietokoneella käytettävällä ohjelmalla saadaan tulokseksi voima-anturien jännitearvoja ajan funktiona.

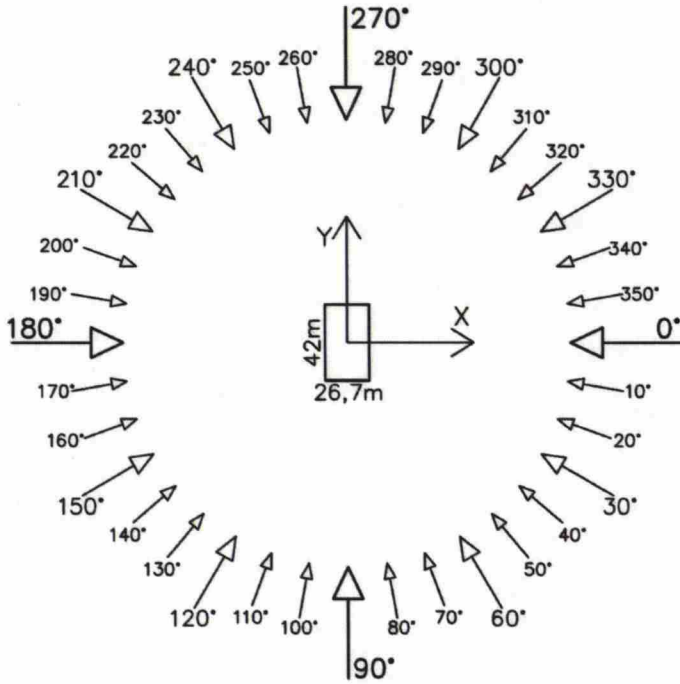
Ennen varsinaisia mittauksia suoritettiin vaa'an kalibrointi, jonka avulla saatiin selvitettyä mitattujen jännitteiden ja voimasuureiden välinen yhteys. Kalibrointisarja koostui kahdeksasta mittauksesta. Tuulitunnelin sähkölaitteet ja mittauslaitteisto aiheutti häiriökohinaa, joten kalibrointi aloitettiin mittaamalla minuutin ajan häiriökohinaa jokaisella kuudella kanavalla. Tämän jälkeen suoritettiin kuusi minuutin kestoista mittausta, joiden avulla saatiin selville jokaista voimasuuretta vastaavat jännitteet. Ensimmäiseksi asetettiin 500 gramman punnus vaikuttamaan positiivisen x-akselin suuntaan 30 millimetrin korkeudelle pienoismallin alareunasta (kuva 27a). Punnus sidottiin langan päähän, ja lanka kierrettiin pienoismallin ympäri. Lanka vedettiin suoraksi ja asetettiin pienen rullan päälle, jolloin punnus pääsi roikkumaan vapaasti ja aiheutti kuormituksen positiivisen x-akselin suuntaan. Seuraavaksi tehtiin vastaava mittausta, mutta punnus vaikutti negatiiviseen y-akselin suuntaan (kuva 27b). Seuraavat kaksi mittausta suoritettiin samalla tavalla kuin edellä, mutta nyt punnus sijaitsee 220 millimetriä pienoismallin alareunasta (kuva 27a ja 27b). Tämän jälkeen punnus sijoitettiin keskelle pienoismallin kattoa eli negatiivisen z-akselin suuntaan (kuva 27c). Viimeiseksi sijoitettiin kaksi punnusta rakennuksen kulmiin 230 millimetriä rakennuksen alareunasta (kuva 27d). Jokaisesta edellä esitetystä mittauksesta saatiin jokaista voimaa (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y ja M_z) vastaavat jännitearvot. Kalibrointisarjan päätteeksi tallennettiin vielä minuutin ajan häiriökohinaa. Lopuksi häiriökohinan aiheuttamat jännitearvot vähennettiin tuloksista, jolloin saatiin pelkkien punnusten aiheuttamat jännitearvot.



Kuva 27. Kalibrointimittaukset.

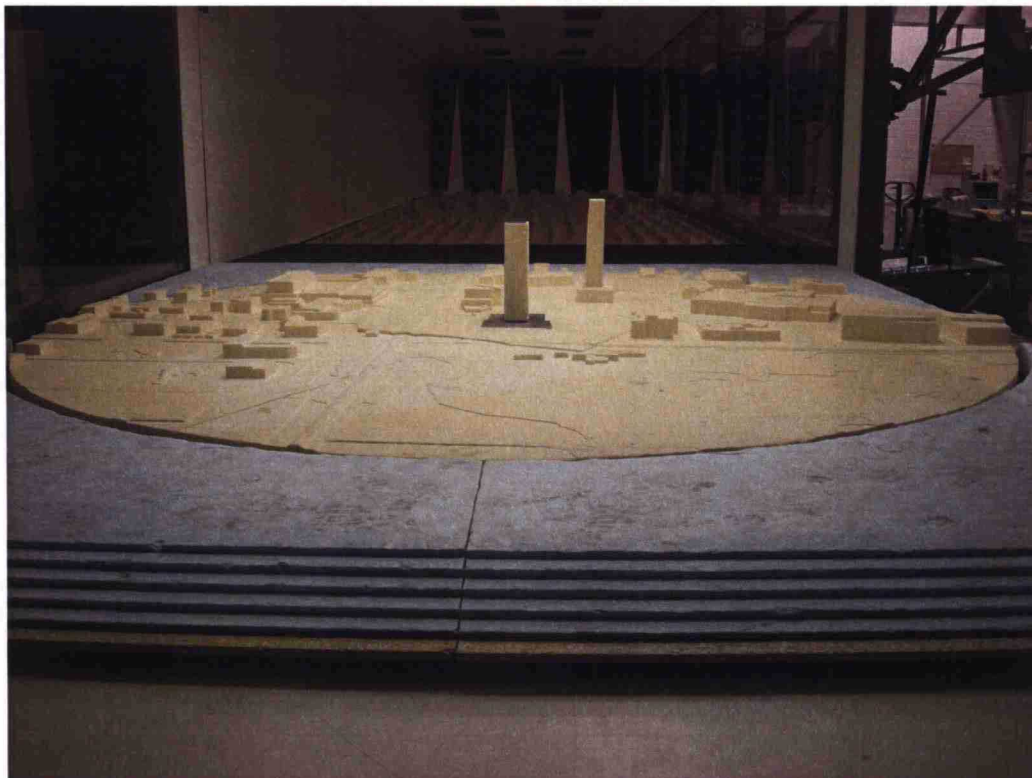
Kalibrointisarjoja suoritettiin useita, joista laskettiin keskiarvo. Kalibrointimittauksista muodostettiin 6x6-kalibrointimatriisi. Kalibrointimatriisin määrittäminen on esitetty tarkemmin liitteessä D. Varsinaisissa mittauksissa saatavat virtauksen aiheuttamat jännitysarvot kerrotaan kalibrointimatriisilla, jolloin saadaan voimasuureiden F_x , F_y , F_z , M_x , M_y ja M_z arvot ajan funktiona. Saatavat voimasuureet ovat pienoismalliin kohdistuvia voimia, joten ne pitää skaalata kaavoilla (54) ja (56) vastaamaan todellisen rakennuksen kuormia.

Varsinaisissa kokeissa tutkittiin kahta eri tapausta. Ensin tutkittiin kuvan 26 mukaista tilannetta. Mittaussarjoja suoritettiin neljä. Ensimmäisessä mittaussarjassa tuulitunnelissa virtausnopeus oli 10 m/s, toisessa 8 m/s ja viimeisessä 12 m/s. Virtausnopeudella 10 m/s suoritettiin vielä toiset mittaukset myöhempänä ajankohtana. Virtausnopeudet valittiin niin, että niillä saadaan järkeviä mittaustuloksia: alle 8 m/s virtausnopeuksilla häiriökohinan merkitys korostuu, jolloin mittaustulosten luotettavuus kärsii, ja virtaukset, jotka ovat yli 12 m/s, voivat liikuttaa tuulitunnelissa olevia levyjä, mikä vääristäisi tuloksia. Mittaussarjojen alussa ja lopussa mitattiin häiriökohinan taso. Pienoismallia käännettiin 10 astetta kerrallaan, joten yksi mittaussarja käsitti häiriökohinamittaukset mukaan lukien yhteensä 38 mittausta. Mitattavat tuulen suunnat on esitetty kuvassa 28. Mittaustaajuus oli 1 kHz eli mittaustietoa kerättiin tuhat kertaa sekunnissa. Jokainen eri kulmasta suoritettu mittausta kesti minuutin kuten myös häiriökohinamittaukset. Tuuli aiheuttaa rakenteisiin satunnaisvärähtelyä, joten mittaustajan tulee olla tarpeeksi pitkä, jotta satunnaisvärähtelyä voidaan tutkia tilastomatematiikan avulla.

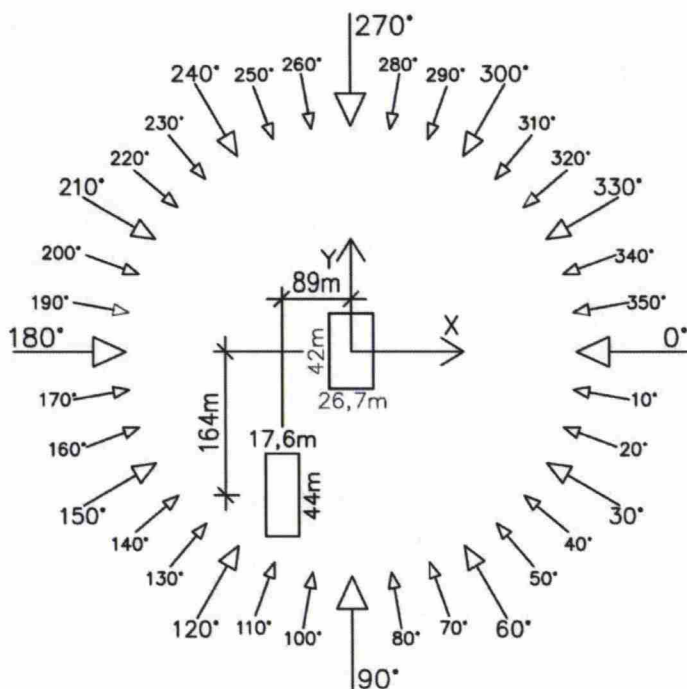


Kuva 28. Mitattavat tuulensuunnat.

Toisena tutkittavana tapauksena oli tilanne, jossa tutkittavan rakennuksen ja tuulen välissä oli toinen korkea rakennus (kuva 29). Mittauksissa voitiin tutkia herätetärinän vaikutusta. Samoin kuin edellä, suoritettiin neljä mittaussarjaa, joissa oli vastaavat virtausnopeudet kuin ensimmäisessä mittaustapauksessa. Kolme ensimmäistä mittaussarjaa suoritettiin virtausnopeuksilla 10 *m/s*, 8 *m/s* ja 12 *m/s*. Näissä mittauksissa mittavat tuulensuunnat olivat 90–150 astetta. Myöhempänä ajankohtana suoritettiin mittaus, jossa tutkittiin kaikki tuulensuunnat (0-360 astetta), kun virtausnopeus oli 10 *m/s*. Edessä oleva rakennus oli 44 metriä pitkä, 17,6 metriä leveä ja 113,6 metriä korkea. Lisärakennuksen etäisyys tutkittavaan rakennukseen oli x-akselin suunnassa noin 89 metriä ja y-akselin suunnassa noin 164 metriä (kuva 30).



Kuva 29. Mittaustapaus 2. Tutkittava rakennus on toisen korkean rakennuksen katveessa.

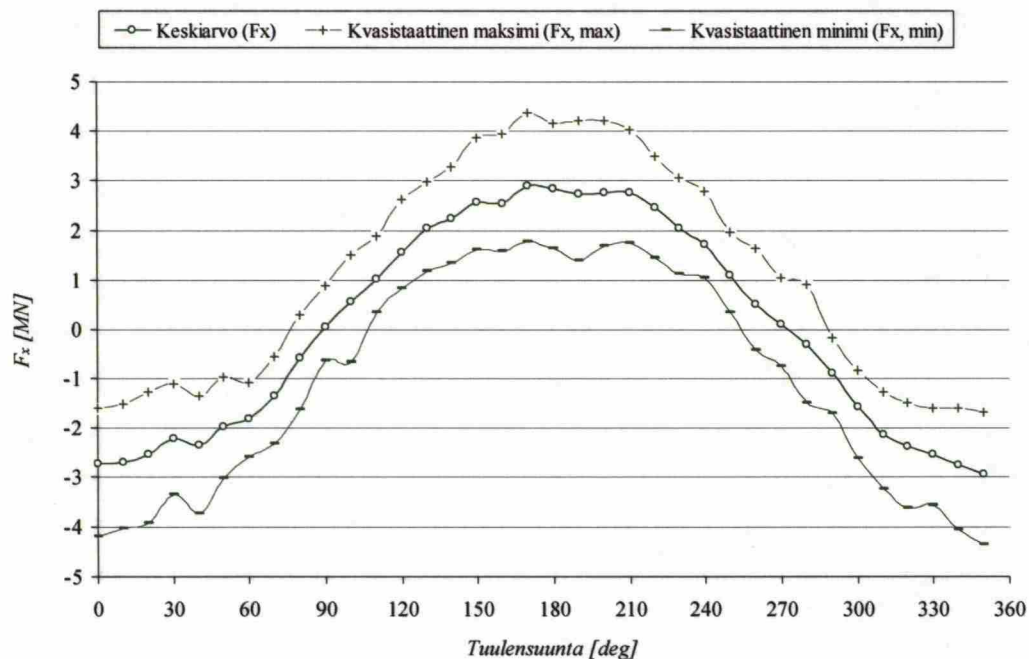


Kuva 30. Kuvassa on esitetty toisen korkean rakennuksen sijainti.

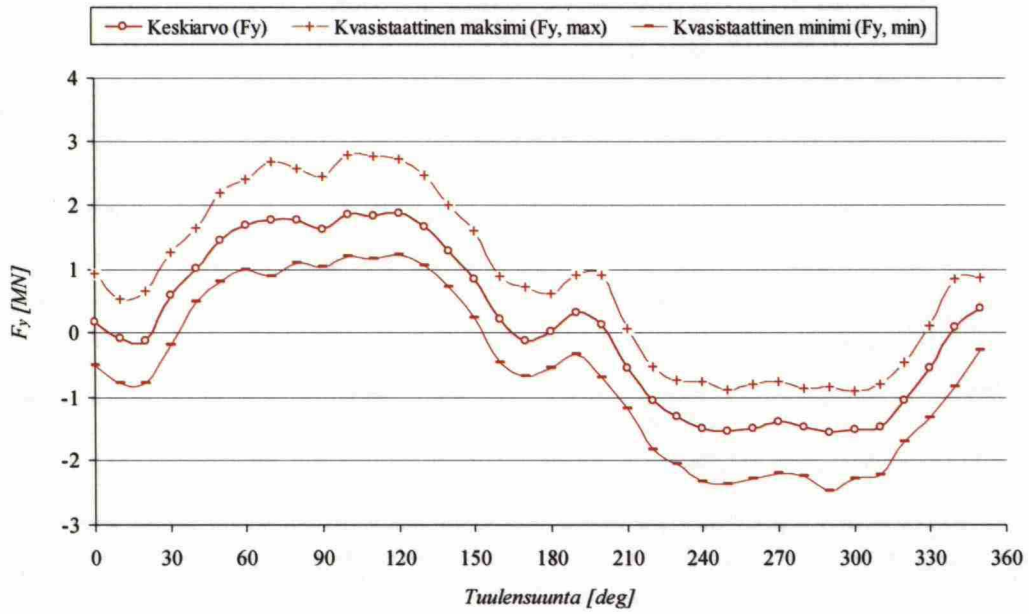
6.2.2 Mittaustulokset

6.2.2.1 Tuulikuormat

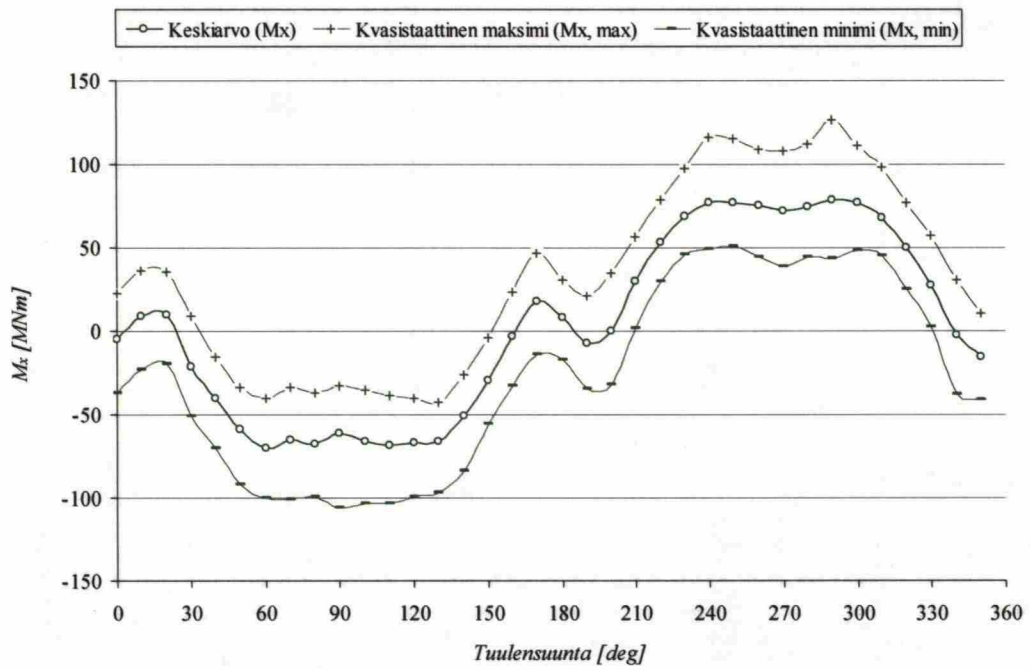
Tuulikuormat on laskettu kappaleen 5.1 mukaisesti. Työssä laskettiin staattiset tuulikuormat ja kvasistaattiset tuulikuormat. Kuvissa 31–35 on esitetty tuulikuormat (F_x , F_y , M_x , M_y ja M_z) 10 asteen välein, kun virtausnopeus tuulitunnelissa oli 10 m/s. Tuulikuormat laskettiin myös virtausnopeuden ollessa 8 m/s ja 12 m/s. Kappaleessa 6.2.3 pohditaan virtausnopeuden vaikutusta tuulikuormiin. Laskelmista saatiin myös voimasuureen F_z arvot, mutta niitä ei esitetä, koska kyseinen kuorma ei ole rakennesuunnittelun kannalta oleellinen.



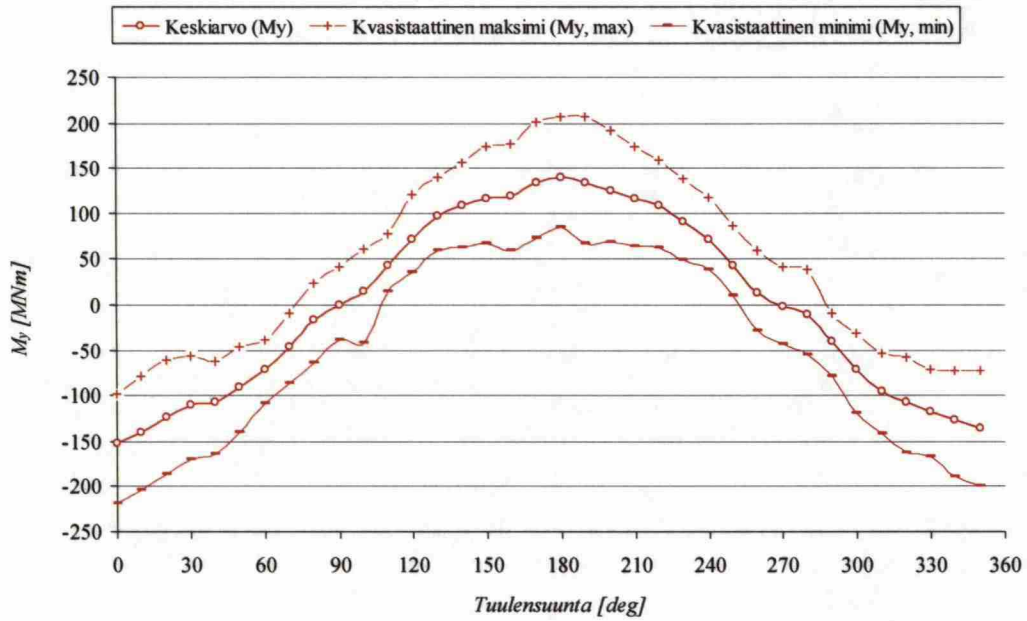
Kuva 31. Staattisen tuulikuorman (keskiarvo) F_x ja kvasistaattisten tuulikuormien F_x arvot 10 asteen välein, kun virtausnopeus tuulitunnelissa oli 10 m/s.



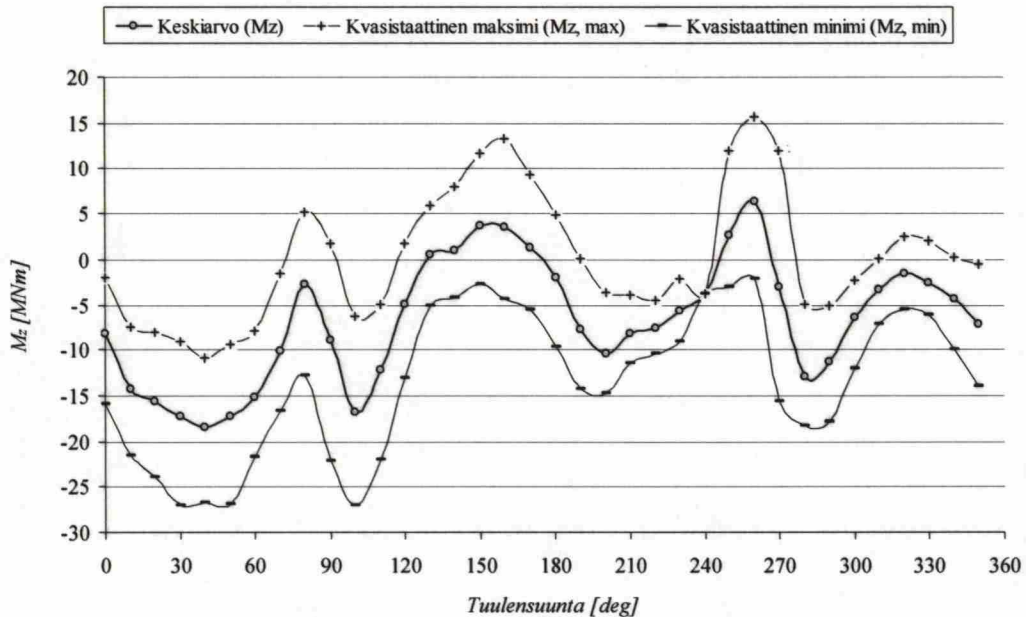
Kuva 32. Staattisen tuulikuorman (keskiarvo) F_y ja kvasistaattisten tuulikuormien F_y arvot 10 asteen välein, kun virtausnopeus tuulitunnelissa oli 10 m/s.



Kuva 33. Staattisen tuulikuorman (keskiarvo) M_x ja kvasistaattisten tuulikuormien M_x arvot 10 asteen välein, kun virtausnopeus tuulitunnelissa oli 10 m/s.



Kuva 34. Staattisen tuulikuorman (keskiarvo) M_y kvasistaattisten tuulikuormien M_y arvot 10 asteen välein, kun virtausnopeus tuulitunnelissa oli 10 m/s.



Kuva 35. Staattisen tuulikuorman (keskiarvo) M_z ja kvasistaattisten tuulikuormien M_z arvot 10 asteen välein, kun virtausnopeus tuulitunnelissa oli 10 m/s.

6.2.2.2 Rakennusrungon värähtelyt

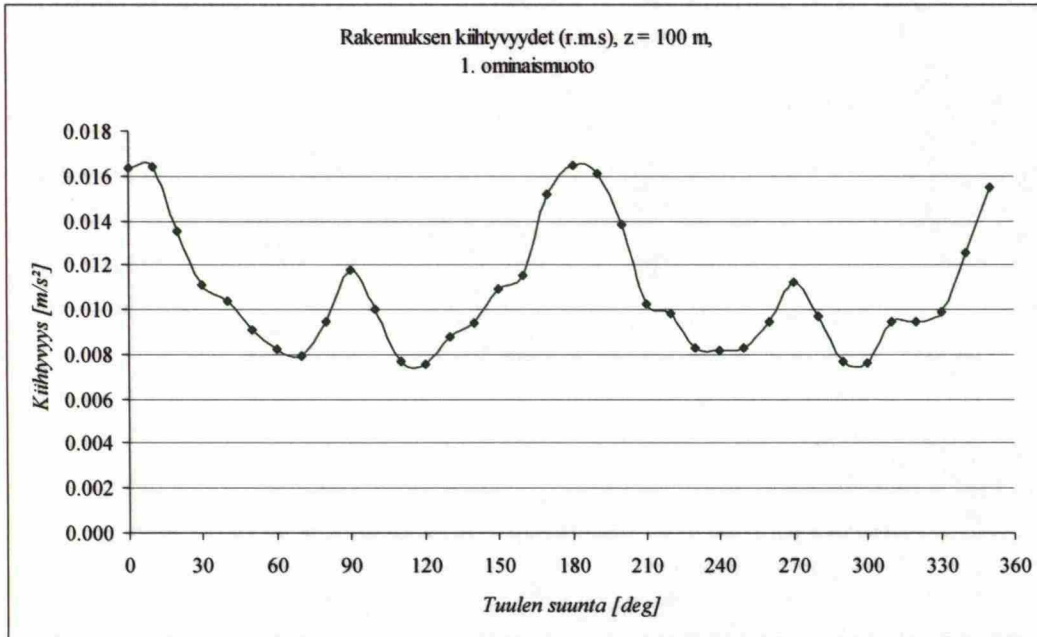
Rakennuksen värähtelyt on laskettu kappaleen 5.2 mukaisesti. Ensimmäisellä mitauskerralla suoritetuista mittauksista ei saatu määritettyä rakennusrungon väräh-

telyjä liian suuren häiriökohinan takia. Häiriökohina aiheutui ilmeisesti vaa'an puutteellisesta maadoituksesta, liian pitkistä johdoista, tuulitunnelin moottorista ja invertteristä. Toisella kerralla tehdyistä mittauksista saatiin määritettyä rakennusrungon värähtelyt, koska mittausjärjestelyjä parannettiin työn ohjaajan toimesta. Toisella mittauskerralla tutkittiin ainoastaan virtausnopeutta 10 m/s.

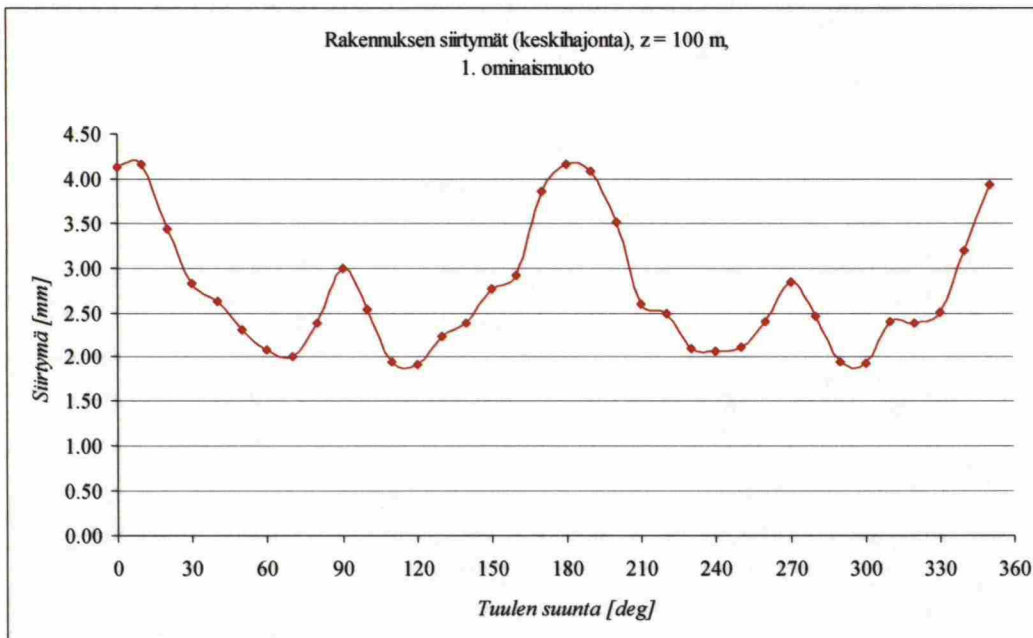
Lasketut kiihtyvyydet ovat kiihtyvyyden resonanssikomponentin rms-arvoja (47). Kiihtyvyyden taustakomponentti voidaan laskea kaavan (46) avulla. Taustakomponentin merkitys on kiihtyvyyksien kannalta pieni, joten se jätetään yleensä laskematta.

Lasketut siirtymät ovat siirtymän resonanssikomponentin keskihajontoja (44), jotka kuvaavat rakennuksen värähtelyamplitudeja resonanssissa. Värähtelyamplitudien huippuarvot saadaan kertomalla resonanssikomponentin keskihajonta huippuarvokertoimella. Siirtymän taustakomponentin keskihajonta saadaan laskettua kaavalla (45). Siirtymän maksimi-arvo saadaan laskettua kaavalla (48). Tarkin arvo siirtymän maksimi-arvolle saadaan laskettua laskemalla staattiset korvauskuormat ja asettamalla tämä vaikuttamaan rakennuksen laskentamalliin.

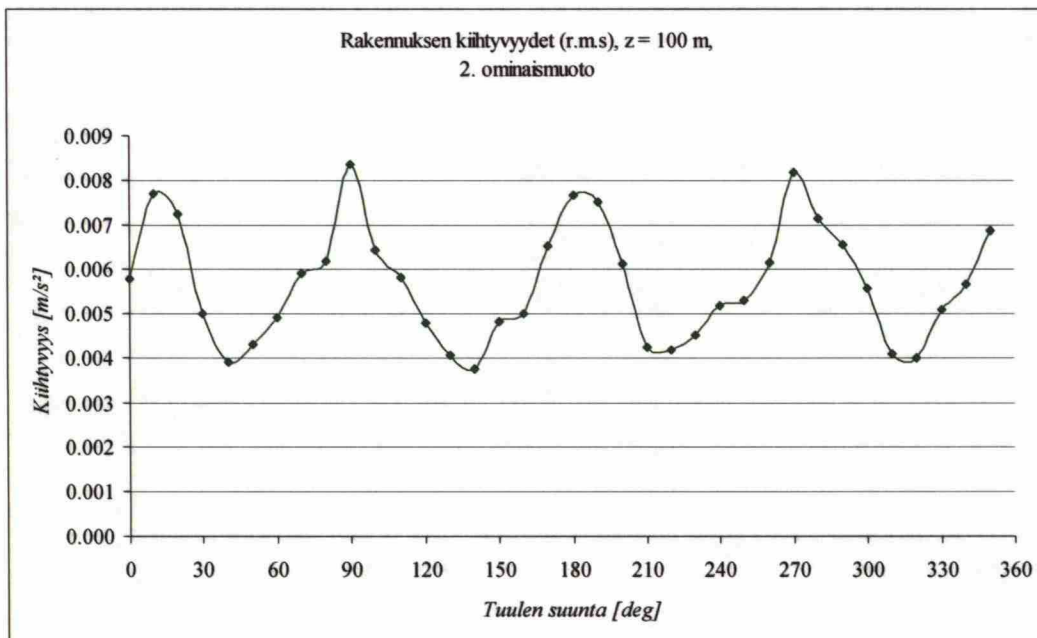
Rakennuksen värähtelyt laskettiin kolmella ensimmäisellä ominaistaajuudella. Suuremmilla ominaistaajuuksilla rakennuksen värähtelyt ovat niin pieniä, että niillä ei ole merkitystä. 1. ominaistaajuudella värähtelyt tapahtuvat y-akselin suuntaan, 2. ominaistaajuudella x-akselin suuntaan ja 3. ominaistaajuudella värähtely on vääntövärähtelyä. Rakennuksen värähtelyjä tutkittiin viiden vuoden tarkasteluajanjaksolla. Tutkittaessa värähtelyä kahdella ensimmäisellä ominaistaajuudella, perustuulennopeus luonnossa maanpinnalla oli 18,8 m/s. Vääntövärähtelyä tutkittaessa perustuulennopeus oli 24,9 m/s, koska vääntövärähtelyn määrittely ei onnistunut pienemmällä tuulennopeudella. Vaimennukseksi oletettiin 2,2 %. Rakennuksen värähtelyt on esitetty kuvissa 36–41.



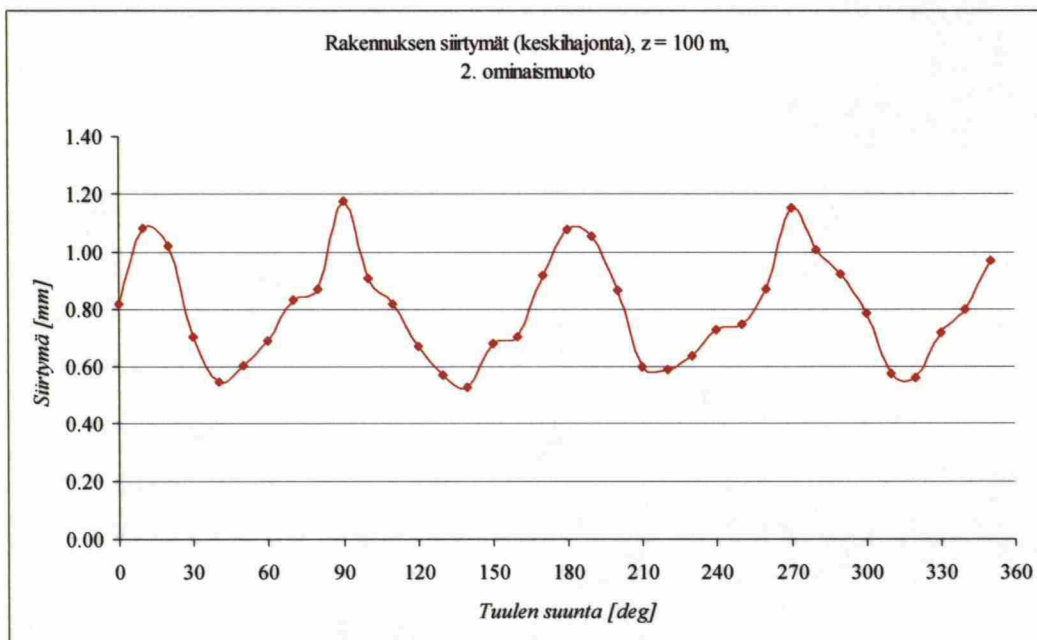
Kuva 36. Rakennuksen kiihtyvyydet 1. ominaismuodossa (y-akselin suuntaan). Ominaistaajuus on 0,316 Hz. Kuvassa esitetyt kiihtyvyydet on laskettu rakennuksen räystäään korkeudella.



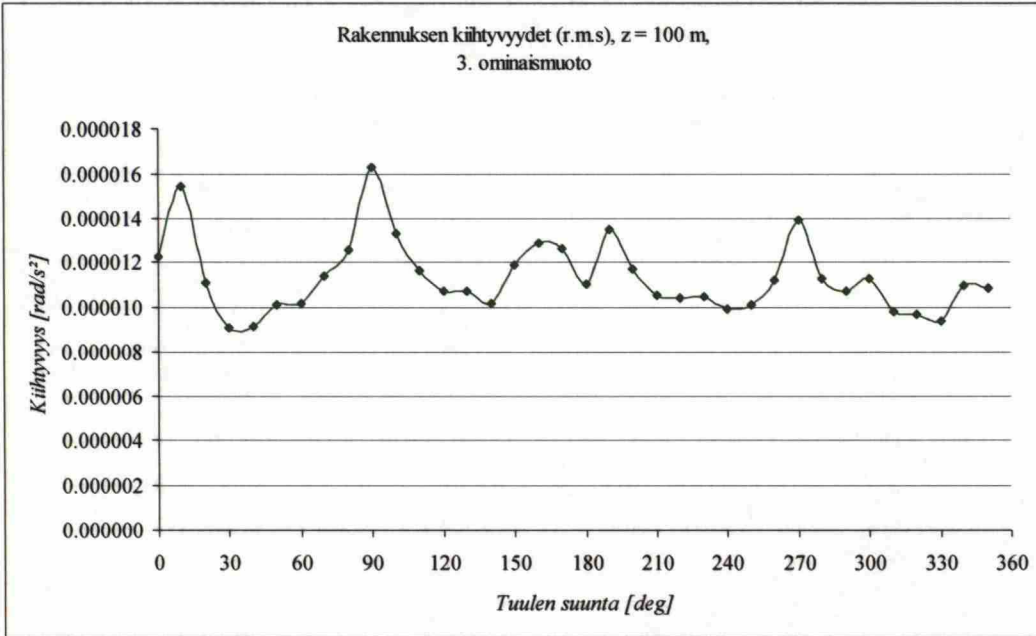
Kuva 37. Rakennuksen siirtymät 1. ominaismuodossa (y-akselin suuntaan). Ominaistaajuus on 0,316 Hz. Kuvassa esitetyt siirtymät on laskettu rakennuksen räystäään korkeudella.



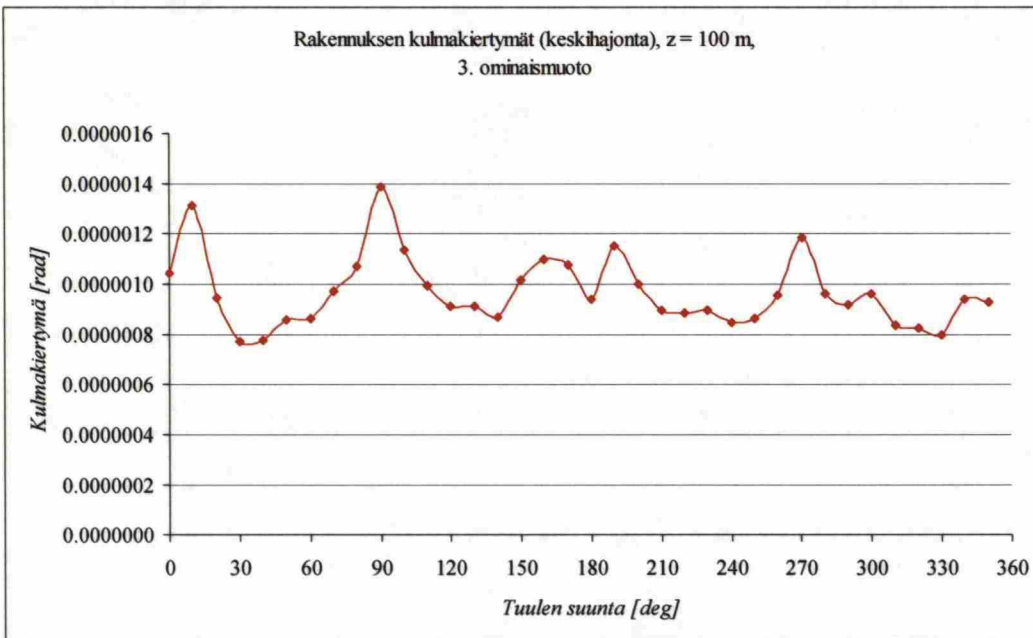
Kuva 38. Rakennuksen kiihtyvyydet 2. ominaismuodossa (x-akselin suuntaan). Ominaistaajuus on 0,424 Hz. Kuvassa esitetyt kiihtyvyydet on laskettu rakennuksen räystäään korkeudella.



Kuva 39. Rakennuksen siirtymät 2. ominaismuodossa (x-akselin suuntaan). Ominaistaajuus on 0,424 Hz. Kuvassa esitetyt siirtymät on laskettu rakennuksen räystäään korkeudella.

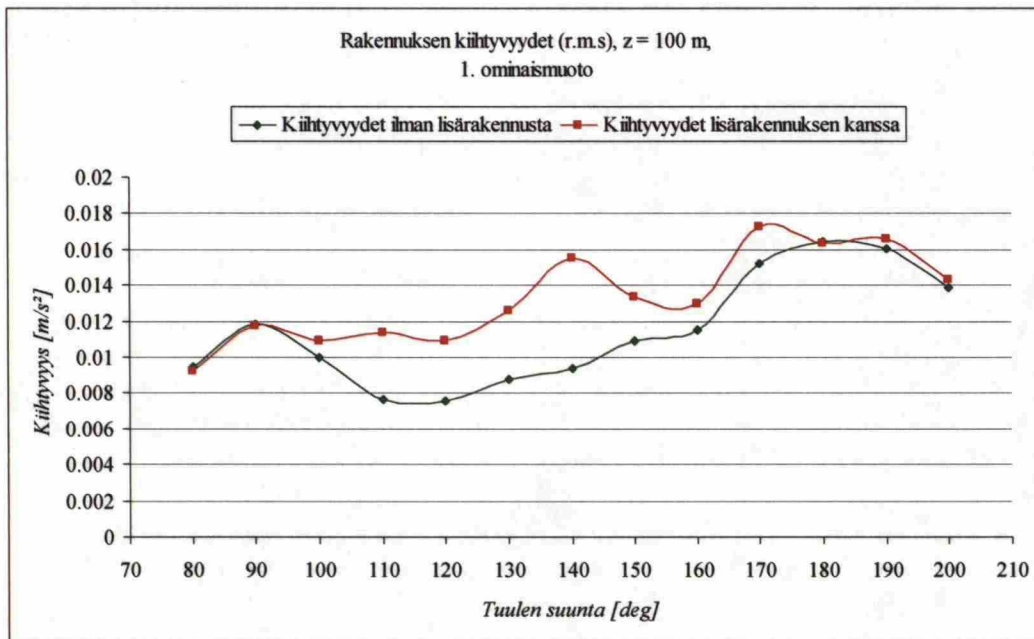


Kuva 40. Rakennuksen kiihtyvyydet 3. ominaismuodossa (vääntöväärähtely). Ominaistaajuus on 0,545 Hz. Kuvassa esitetyt kiihtyvyydet on laskettu rakennuksen räystäään korkeudella.

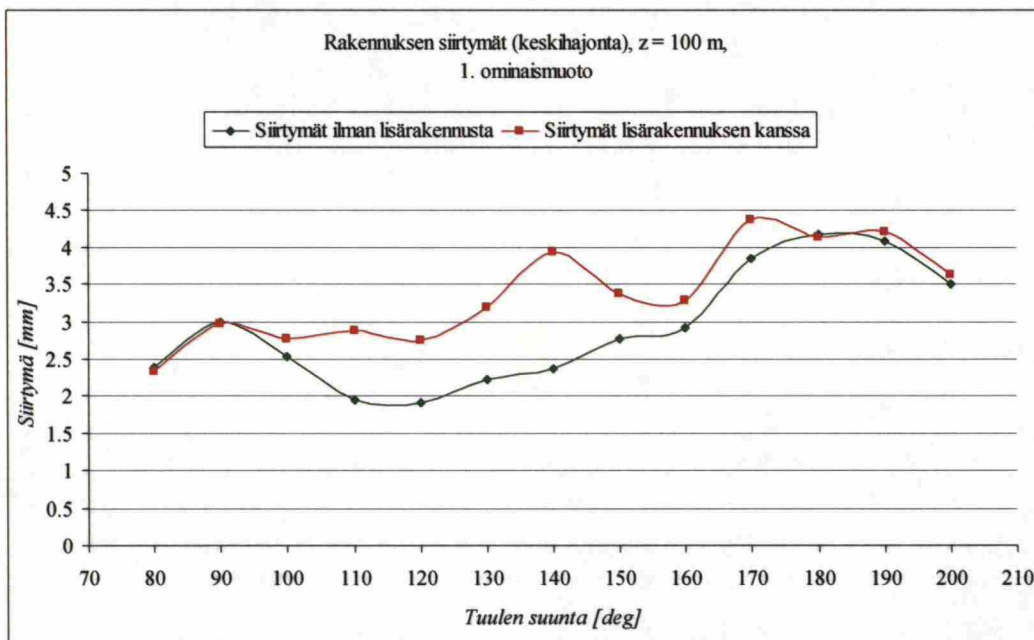


Kuva 41. Rakennuksen kiertymät 3. ominaismuodossa (vääntöväärähtely). Ominaistaajuus on 0,545 Hz. Kuvassa esitetyt kiertymät on laskettu rakennuksen räystäään korkeudella.

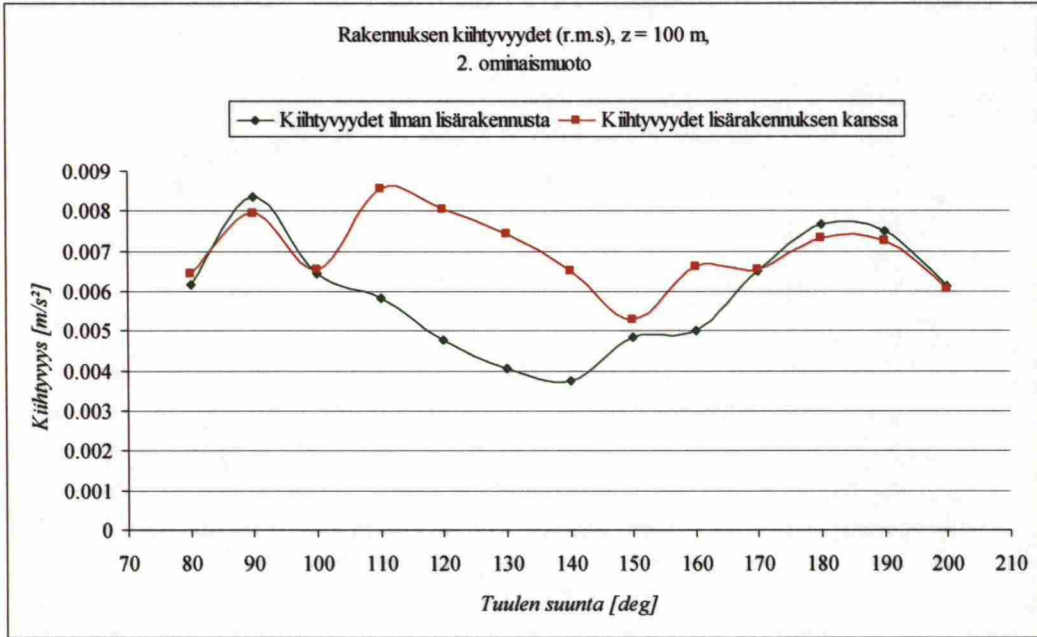
Kuvissa 42–47 on esitetty toisen korkean rakennuksen vaikutus rakennuksen kiihtyvyyksien resonanssikomponenttien rms-arvoihin ja siirtymien resonanssikomponentin keskihajontoihin kolmessa ensimmäisessä ominaismuodossa. Tuulennopeudet ja vaimennuksen arvot ovat samat kuin edellä.



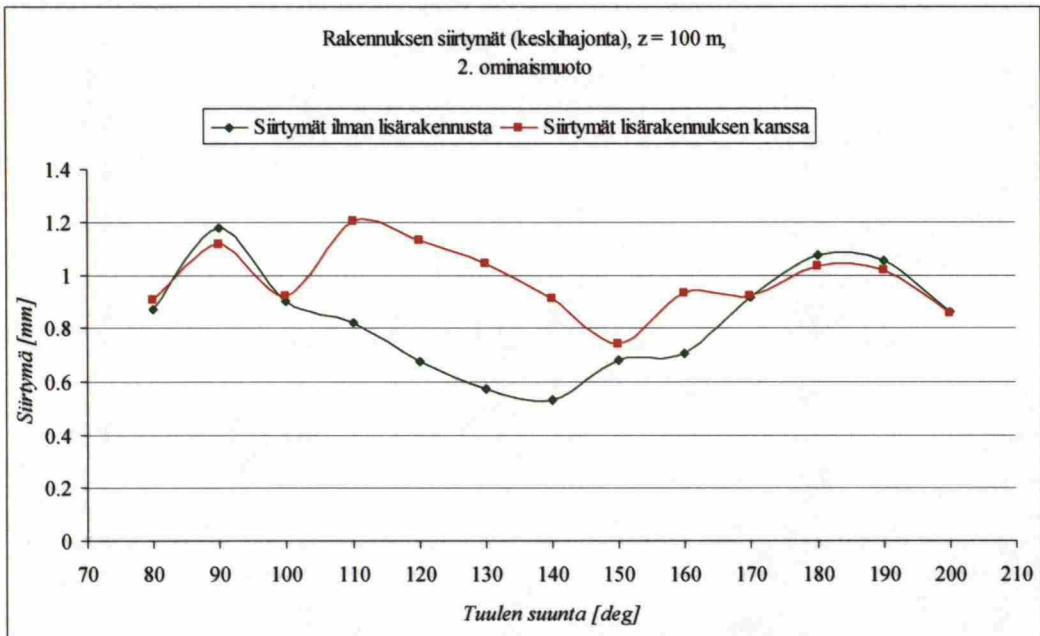
Kuva 42. Rakennuksen kiihtyvyydet 1. ominaismuodossa ilman lisärakennusta ja lisärakennuksen kanssa. Kuvassa esitetyt kiihtyvyydet on laskettu rakennuksen räystäään korkeudella.



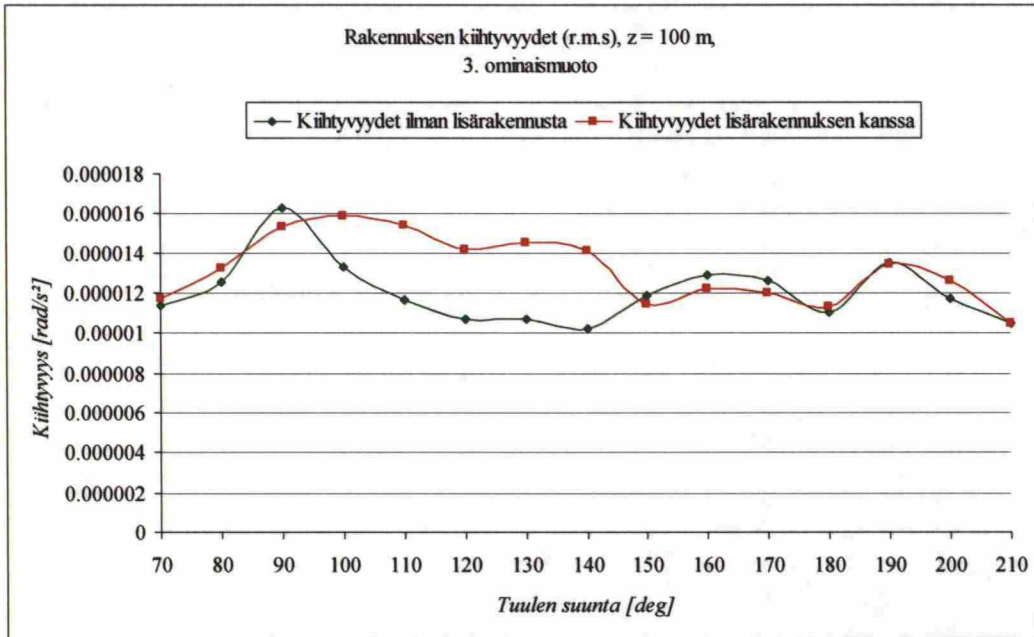
Kuva 43. Rakennuksen siirtymät 1. ominaismuodossa ilman lisärakennusta ja lisärakennuksen kanssa. Kuvassa esitetyt kiihtyvyydet on laskettu rakennuksen räystäään korkeudella.



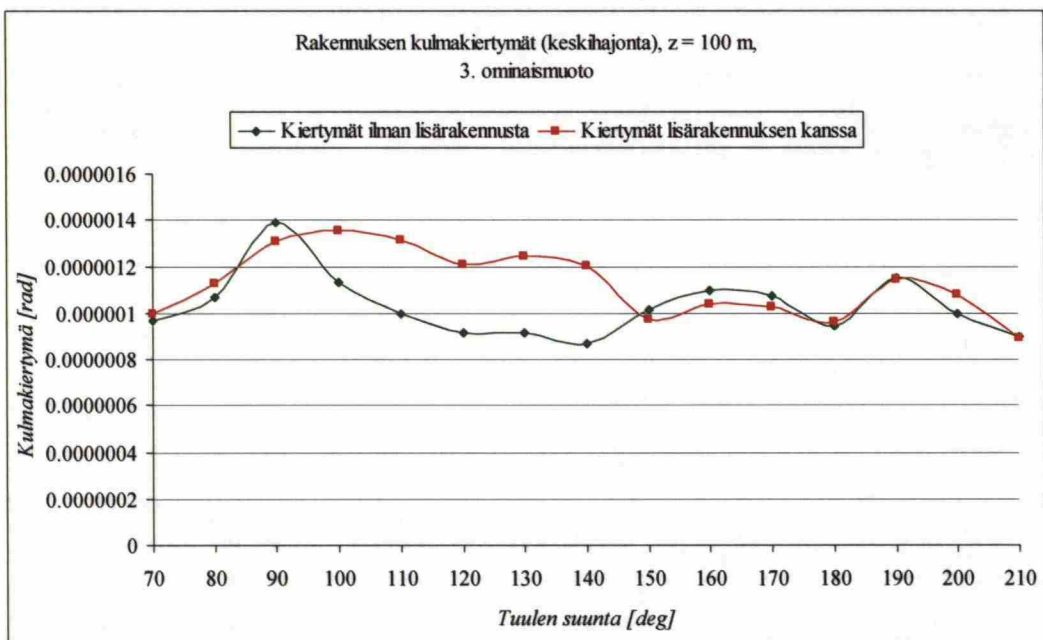
Kuva 44. Rakennuksen kiihtyvyydet 2. ominaismuodossa ilman lisärakennusta ja lisärakennuksen kanssa. Kuvassa esitetyt kiihtyvyydet on laskettu rakennuksen räystäään korkeudella.



Kuva 45. Rakennuksen siirtymät 2. ominaismuodossa ilman lisärakennusta ja lisärakennuksen kanssa. Kuvassa esitetyt kiihtyvyydet on laskettu rakennuksen räystäään korkeudella.



Kuva 46. Rakennuksen kiihtyvyydet 3. ominaismuodossa ilman lisärakennusta ja lisärakennuksen kanssa. Kuvassa esitetyt kiihtyvyydet on laskettu rakennuksen räystäään korkeudella.



Kuva 47. Rakennuksen kiertymät 3. ominaismuodossa ilman lisärakennusta ja lisärakennuksen kanssa. Kuvassa esitetyt kiertymät on laskettu rakennuksen räystäään korkeudella.

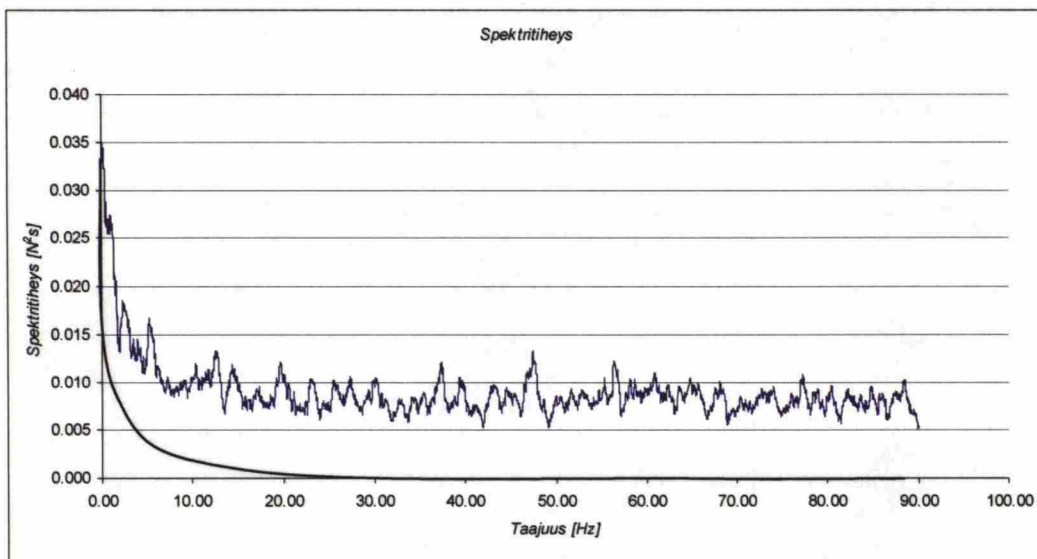
6.2.3 Virhetarkastelu

Tuulikuormat määriteltiin kolmella eri virtausnopeudella. Skaalatut staattisten tuulikuormien arvot olivat jokaisella virtausnopeudella samansuuruisia. Skaalatut

kvasistaattiset tuulikuormat olivat virtausnopeuksilla 10 m/s ja 12 m/s lähes yhtä suuret. Virtausnopeudella 8 m/s skaalatut kvasistaattiset tuulikuormat poikkesivat osittain muilla virtausnopeuksilla saaduista tuloksista eli virtausnopeudella 8 m/s tehdyissä mittauksissa keskihajonta oli hyvin suurta. Muita merkittäviä eroja ei tuloksissa näy. Pieniä eroja tuloksissa on, koska virtaus ei jokaisella mittauksella voi olla aivan samanlainen eikä mitattava tuulen suunta ollut jokaisessa mittauksessa kuitenkaan aivan sama. Tehtyjen mittausten perusteella virtausnopeudella ei näytä olevan vaikutusta skaalattuihin staattisiin tuulikuormiin, mutta virtausnopeuden ollessa pieni, skaalatut kvasistaattiset tuulikuormat alkavat kasvaa epärealistisen suuriksi. Rakennusrungon värähtelyjen osalta vertailua ei voida suorittaa, koska ensimmäisellä mittauskerralla tehdyistä mittauksista ei värähtelyjä pystytty määrittelemään suuren häiriökohinan takia. Värähtelyt laskettiin ainoastaan virtausnopeudella 10 m/s.

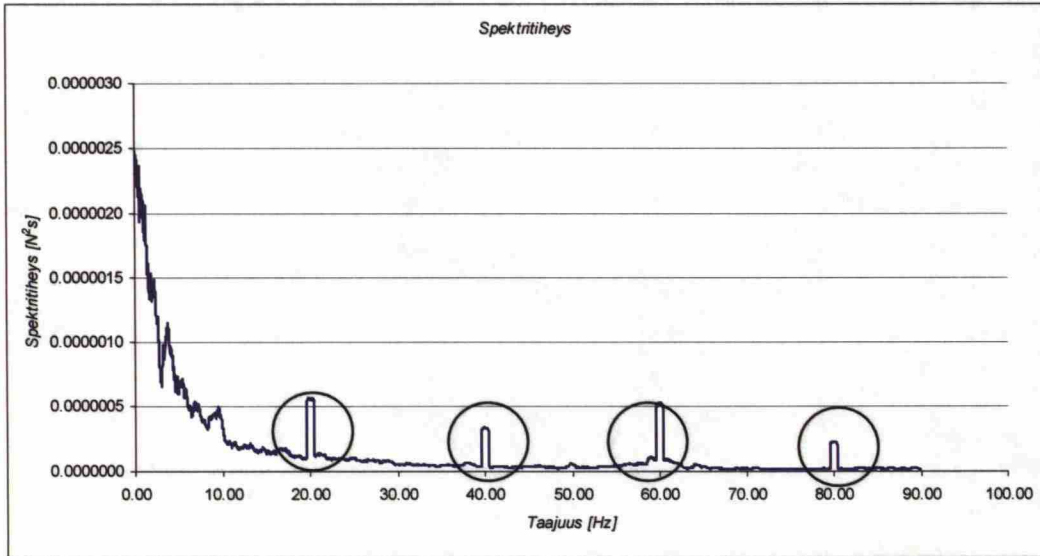
Toiset mittaukset suoritettiin, koska ensimmäisellä mittauskerralla mittauksissa oli niin paljon häiriötä, että mittauksista ei saatu värähtelyjen osalta luotettavia mittauksituloksia. Mittausmenetelmä voi olla herkkä mittauslaitteiden ja ympäröivien sähkölaitteiden aiheuttamille häiriöille. Ensimmäisellä mittauskerralla mittauksiin häiriötä aiheutui todennäköisesti vaa'an teräksisen aluslevyn puuttuvasta maadoituksesta ja mittauslaitteiston turhan pitkistä johdoista. Toiselle mittauskerralle teräslevy maadoitettiin ja johdot lyhennettiin mahdollisimman lyhyeksi. Näiden toimenpiteiden jälkeen häiriökohina pieneni huomattavasti. Tuulikuormiin häiriökohina ei vaikuttanut merkittävästi, mutta värähtelyjen määrittäminen oli mahdollonta suuren häiriökohinan takia. Kuvassa 48 on esitetty esimerkki ensimmäisellä mittauskerralla saaduista spektritiheyksistä. Kuvaan on myös hahmoteltu kuvan 21 mukaista spektriä mustalla viivalla. Tutkittaessa kuvaa 48, huomataan, että ensimmäisellä kerralla mittauksia häiritsi hyvin suuri kohina, jolloin varsinaiset mittaustulokset jäivät suuren häiriökohinan alle. Häiriökohinan merkitys kasvaa taajuuden suurentuessa. Ensimmäistä mittauksista saatu spektri pysyy virheellisesti koko ajan samalla tasolla, mutta kuvaan hahmoteltu kuvan 22 mukainen spektri laskee oikeanlaisesti taajuuden kasvaessa. Värähtelyjä tutkittaessa spektritiheyksien arvoja luetaan korkeimmilta taajuuksilta (noin 40–80 Hz), jolloin ensimmäisel-

lä mittauskerralla saaduista spektreistä ei saada oikeita tuloksia vaan ainoastaan häiriökohinan aiheuttamia tuloksia.



Kuva 48. Esimerkki ensimmäisen mittauskerran spektritiheyksistä. Kuvaan on hahmoteltu kuvan 21 mukaista spektritiheyttä mustalla viivalla.

Spektritiheyskuvaajia tulee tulkita huolellisesti. Spektritiheyksien arvoja määriteltäessä tuloksiin voi tulla helposti virheitä, jos värähtelyihin tarvittava spektritiheyden arvo luetaan suoraan halutun taajuuden kohdalta. Juuri tällä taajuudella saattaa olla häiriöpiikki, joka voi vääristää merkittävästi spektritiheyden arvoa ja siten värähtelytuloksia. Tämän takia spektritiheyden arvoa ei aina voida lukea juuri halutun taajuudella kohdalta. Tällöin spektritiheyden arvo voidaan lukea läheltä haluttua taajuutta, sellaisen taajuuden kohdalta, jossa häiriö ei enää vaikuta. Kuvassa 49 on esitetty spektritiheys, jossa näkyy mittauksissa esiintyviä häiriöpiikkejä, jotka aiheutuivat tuulitunnelin puhaltimen moottorista. Häiriöpiikit on ympyröity kuvasta. Vastaavanlainen piikki näkyy osassa spektritiheyksiä viidenkymmenen hertsin kohdalla, mikä aiheutuu verkkovirrasta. Kuva 49 kertoo hyvin sen, että spektritiheyksiä ei aina voida lukea halutun taajuuden kohdalta: esimerkiksi 20 ja 40 hertsin kohdalta ei spektritiheyksien arvoja voida lukea suurien häiriöiden takia. Jokainen mittauksista saatava spektri tulee siis tutkia tapauskohtaisesti.



Kuva 49. Esimerkki spektritiheyksissä esiintyvistä häiriöistä.

Mittauksissa käytettyyn mittakorttiin oli asennettu alipäästösuodatin, joka suodatti mittauksista yli 60 Hz:n taajuudet pois, joten tätä suuremmilta taajuuksilta ei voitu enää lukea spektritiheyksien arvoja. 3. ominaismuodon tarkastelutaajuus oli noin 75 Hz, joten spektritiheyden arvoja ei tältä taajuudelta voitu lukea. Suurentamalla todellisuudessa vaikuttavaa tuulennopeutta, voidaan spektritiheyden arvot lukea alhaisemmalta taajuudelta (64). Näin 3. ominaismuodon värähtelyt saatiin myös määriteltyä. Myös ylempien ominaismuotojen tarkastelutaajuudet ovat yli 60 Hz, mutta näillä ominaismuodoilla värähtely on niin pientä, että niillä ei ole merkitystä. Tällä tavoin suurentamalla tuulennopeutta saadaan määriteltyä korkeamman ominaismuotojen värähtelyjä, mutta ongelmaksi muodostuu se, että ne eivät enää kuvaa todellisuutta kovinkaan hyvin, koska tällöin tutkittavat tuulennopeudet voivat olla niin suuria, että niitä ei todellisuudessa esiinny. Toinen vaihtoehto on pienentää virtausnopeutta, mutta hyvin pienillä tuulennopeuksilla ei saada enää luotettavia tuloksia, koska mitattavat voimat pienenevät, jolloin häiriökohinan merkitys kasvaa.

Myös muut asiat kuten kalibrointi, vaimennus ja virheet mittausjärjestelyissä voivat aiheuttaa häiriökohinan lisäksi virheitä lopullisiin tuloksiin. Ennen varsinaisia mittauksia määritellään kalibrointimatriisi, jota varten tehdyissä mittauksissa syntyy helposti virheitä. Kalibrointimittauksissa lankaan kiinnitettiin punnus, jonka annettiin roikkua vapaasti. Lankojen suoruus arvioitiin silmämääräisesti. Langat

saattoivat olla todellisuudessa vinossa sekä pysty- että vaakasuunnassa oletettuun suuntaan nähden. Vaikka tarkastelu suoritettiin silmämääräistä, voidaan kuitenkin sanoa, että mahdolliset vinoudet eivät olleet suurimmillaan kuin muutamia asteita. Vinoudesta johtuvat virheet ovat pieniä. Esimerkiksi yhdessä kalibrointimittauksessa oleva muutaman asteen vinous punnuslangassa aiheuttaa alle prosentin suuruisen virheen lopullisiin tuulikuormiin. Kalibroinnissa pieniä virheitä voi aiheuttaa myös punnusten pieni heiluminen mittauksia suoritettaessa, mutta tämän merkitys on hyvin pieni. Kun työssä lopullinen kalibrointimatriisi saadaan usean kalibrointimittaussarjan keskiarvona, niin yksittäisen pienen virheen vaikutus vähenee entisestään, koska on epätodennäköistä, että sama virhe toistuu jokaisessa mittaussarjassa. Suorittamalla kalibrointimittaukset huolellisesti, virheet pysyvät pieninä. Kalibrointi voidaan suorittaa myös tarkemmilla laitteilla, mutta niitä käytämällä kalibroinnissa voi kestää kaksi viikkoa, mikä ei ole järkevää käytettäessä korkeataajuisia vaakamittaustekniikkaa, jossa varsinaiset mittaukset voidaan suorittaa alle viikossa. Nyt tehtyihin kalibrointeihin kului aikaa vain muutama tunti.

Mitattavat voimat ovat pieniä, joten mittausjärjestelyt tulee suorittaa huolellisesti. Mittauksissa vaaka asennettiin pieneen koloon ja kolo peitettiin harmaalla teipillä (kuva 26). Ensimmäisissä mittauksissa teipit asennettiin kulkemaan pienoismallin alta, joka saattoi myös hieman väärentää mittauksia vaikeuttamalla pienoismallin liikkumista. Myös mallin kiinnityksessä alla olevaan levyyn tulee olla huolellinen ja varmistaa, että malli on tukevasti kiinni, jotta mittauksiin ei synny virheellistä värähtelyä.

Oikean rakennuksen vaimennusta ei tiedetä tarkasti, joten kiihtyvyyksien arvot voivat todellisuudessa poiketa lasketuista kiihtyvyyksistä myös tämän takia. Tässä työssä vaimennukseksi oletettiin 2,2 %. Jos suunnittelija määrittelee kiihtyvyyksiä todelliseen rakennukseen, on järkevää laskea kiihtyvyydet eri vaimennuksen arvoilla, jotta vaimennuksen vaikutus käy tuloksista selville.

Vertailemalla pelkän kohinan aiheuttamia keskihajontoja tuulikuormien aiheuttamiin keskihajontoihin, voidaan tutkia, kuinka pieniä kiihtyvyyden arvoja voidaan määrittää. Alla on laskettu esimerkki saaduista mittaustuloksista:

Tuulikuorman keskihajonta 0,145 *N*

Kohinan keskihajonta $0,029 N$

Kiihtyvyyden arvo $0,0163 m/s^2$

$$\sigma_{a,\min} = \frac{0,029N}{0,145N} \cdot 0,0163 m/s^2 \approx 0,003 m/s^2$$

Vastaavat raja-arvot voidaan laskea jokaiselle mittaukselle. Häiriökohinan osuus oli kaikissa suunnissa kaikilla voimilla yllä esitettyä suuruusluokkaa. Tulos osoittaa, että nyt tehdyissä mittauksissa häiriökohinan taso oli hyvin alhainen.

6.3 Eurokoodin mukainen analyttinen tarkastelu

6.3.1 Tulokset

Vertailulaskelmat suoritettiin noudattamalla standardia SFS-EN 1991-1-4 [1]. Alla esitetään yhteenveto laskelmista saaduista tuloksista. Tarkemmat tulokset on esitetty liitteessä E. Tutkittava rakennus sijaitsee rannikolla maastoluokan 1 alueella. Alueella oletetaan vaikuttavan merituulen, joka on eurokoodin kansallisen mukaan $22 m/s$. Rakennuksen kokonaistuulikuormia määriteltäessä tarkasteltava ajanjakso on 50 vuotta, mutta kiihtyvyyksiä tutkittaessa ajanjakso on vain 5 vuotta. Laskennassa käytettävät perustuulennopeudet ovat

kokonaistuulikuormia laskettaessa $22 m/s$

ja kiihtyvyyksiä laskettaessa $18,8 m/s$.

Laskettaessa tuulikuormia ja kiihtyvyyksiä eurokoodin mukaan tutkittavia tuulensuuntia ovat 0° , 90° , 180° ja 270° (kuva 28). Tuulikuormat lasketaan käyttäen voimakertoimia ja painekertoimia. Tässä työssä lasketaan eurokoodin mukaiset staattiset tuulikuormat ja kvasistaattiset tuulikuormat. Staattiset tuulikuormat lasketaan käyttäen keskituulennopeutta ja kvasistaattiset tuulikuormat käyttäen puuskatuulennopeutta. Tuulikuormat ja kokonaismomentit on esitetty taulukoissa 3 ja 4.

Taulukko 3. Staattiset tuulikuormat ja kokonaismomentit.

Tuulen suunta Kuorma	Kokonaistuulikuormat				Kokonaismomentit			
	0° F _x [MN]	90° F _y [MN]	180° F _x [MN]	270° F _y [MN]	0° M _y [MNm]	90° M _x [MNm]	180° M _y [MNm]	270° M _x [MNm]
Voimakertoimilla laskettuna	-3,89	1,92	3,89	-1,92	-204	-103	204	103
Painekertoimilla laskettuna	-3,34	1,80	3,34	-1,80	-175	-96	175	96

Taulukko 4. Kvasistaattiset tuulikuormat ja kokonaismomentit.

Tuulen suunta Kuorma	Kokonaistuulikuormat				Kokonaismomentit			
	0° F _x [MN]	90° F _y [MN]	180° F _x [MN]	270° F _y [MN]	0° M _y [MNm]	90° M _x [MNm]	180° M _y [MNm]	270° M _x [MNm]
Voimakertoimilla laskettuna	-7,07	3,49	7,07	-3,49	-364	-184	364	184
Painekertoimilla laskettuna	-6,07	3,26	6,07	-3,26	-313	-172	313	172

Eurokoodissa annetaan ohjeet tuulen suuntaisten kiihtyvyyksien laskemiseen. Kiihtyvyydet lasketaan sekä eurokoodin mukaisilla että Staad-ohjelmalla laske-
tuilla ominaistajuuksilla. Tulokset on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Rakennuksen kiihtyvyydet.

Tuulen suunta Ominaistaajuus [Hz]	laskettu Staad-ohjelmasta saaduilla ominaistaajuuksilla				laskettu eurokoodin mukaisilla ominaistaajuuksilla			
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
Kiihtyvyys $\sigma_{a,x}$ [m/s ²]	0,424	0,316	0,424	0,316	0,46	0,46	0,46	0,46
	0,013	0,011	0,013	0,011	0,012	0,007	0,012	0,007

Toisessa mittaustapauksessa tutkittiin toisen rakennuksen vaikutusta rakennukseen tuulikuormiin ja kiihtyvyyksiin. Eurokoodissa on annettu ehdot, joista toisenkin toteutuessa ei toisen rakennuksen vaikutusta tarvitse huomioida [1, s. 50]. Tässä työssä nämä ehdot eivät kuitenkaan toteudu, joten vaikutus on huomioitava. Eurokoodi ei kuitenkaan anna laskentaohjeita vaan suosittelee tuulitunnelikokeita, joten vertailulaskelmia ei tältä osin voi esittää.

Korkeilla rakennuksilla voi esiintyä pyörreratailmiötä. Eurokoodin liitteen E1 [1, s. 194] avulla voidaan tarkastaa, tarvitaanko pyörreratailmiötä tutkia. Pyörreratailmiötä ei tarvitse tutkia, jos alla olevat ehdot toteutuvat

$$\frac{h}{b} \leq 6. \tag{72}$$

Toisena ehtona on

$$v_{crit,i} > 1,25 \cdot v_m \quad (73)$$

jossa

$v_{crit,i}$ on ominaisuusmuotoa i vastaava kriittinen tuulennopeus.

Tässä työssä rakennukseen geometriaan liittyvä ehto (72) toteutuu kummallakin tuulen suunnalla. Tuulen vaikuttaessa lyhyen sivun suuntaisesti kriittinen tuulennopeus $v_{crit,i} = 111 \text{ m/s}$ ja tuulen vaikuttaessa pitkän sivun suuntaisesti $v_{crit,i} = 133 \text{ m/s}$, joten myös toinen ehto (73) täyttyy eli pyörreratailmiötä ei tarvitse tutkia.

6.3.2 Johtopäätökset eurokoodin mukaisesta analyttisestä tarkastelusta

Rakennuksen kiihtyvyydet laskettiin sekä eurokoodin mukaisilla ominaistajuuksilla että Staadilla lasketuilla ominaistajuuksilla. X-akselin suunnassa eurokoodin ominaistajuus $0,46 \text{ Hz}$ ja Staadilla laskettu ominaistajuus $0,424 \text{ Hz}$ ovat lähellä toisiaan, jolloin kiihtyvyydetkin ovat lähellä toisiaan. Y-akselin suunnassa ominaistajuuksissa on jo huomattavasti suurempi ero ($0,46 \text{ Hz}$ ja $0,316 \text{ Hz}$), mikä näkyy myös kiihtyvyyksien arvoissa. Eurokoodin ominaistajuudella laskettu kiihtyvyys on noin 40 prosenttia pienempi kuin Staadilla lasketulla ominaistajuudella laskettu kiihtyvyys. Kiihtyvyydet olisikin laskettava myös rakennuksen todellisilla ominaistajuuksilla eikä vain eurokoodin mukaisilla ominaistajuuksilla, joilla laskettaessa kiihtyvyydet voivat tulla aliarvioiduksi.

6.4 Tulosten vertailu

Vertailtaessa mittauksista saatuja tuulikuormia eurokoodilla laskettuihin tuulikuormiin, huomataan, että eurokoodin mukaiset laskelmat antoivat suurempia eli varmallalla puolella olevia tuloksia. Staattiset tuulikuormat olivat lähes samansuuruisia sekä tuulitunnelimittauksissa että eurokoodin mukaisissa laskelmissa. Eurokoodin mukaiset kvasistaattiset tuulikuormat olivat kuitenkin huomattavasti suurempia kuin mittauksista saadut tulokset. Suurimmillaan ero oli noin 35 %. Eurokoodin laskelmista huomataan, että tässä työssä painekertoimilla lasketut tuuli-

kuormat antoivat tässä työssä lähempänä mittauksista saatuja tuloksia olevia arvoja kuin voimakertoimilla lasketut tuulikuormat. Vertailussa tulee muistaa, että tuulitunneliin mallinnettu ympäristö, maastoluokka ja parametrit eivät kuitenkaan vastaa aivan täysin eurokoodien vastaavia parametrien arvoja, mistä tuloksiin syntyy pieniä eroja.

Rakennuksen kiihtyvyydet ja siirtymät laskettiin mittausten perusteella kolmella ensimmäisellä ominaistajuudella. Korkeammilla ominaistajuuksilla kiihtyvyydet ja siirtymät ovat niin pieniä, että niillä ei ole enää merkitystä. Tässä työssä kiihtyvyydet ja siirtymät ovat suurimmillaan tuulta vastaan kohtisuorassa suunnassa. Tulokseksi saadut kiihtyvyyden arvot ovat kuitenkin pieniä. Verrattaessa saatuja kiihtyvyyksien arvoja kuvassa 7 esitettyihin tavanomaisten rakennusten kiihtyvyyden raja-arvoihin, huomataan, että kiihtyvyyden arvot ovat niin pieniä kahdella ensimmäisellä ominaistajuudella, että ihmiset eivät tunne rakennuksen värähtelyjä. Kuvassa 8 esitetään raja-arvot erikoistarkoituksiin käytettäville rakennuksille. Tässä tapauksessa saadut kiihtyvyyden arvot ylittäisivät herkille ihmisille tarkoitetun raja-arvon, mutta eivät kuitenkaan tässäkään tapauksessa keskimääräistä raja-arvoa. Työssä tutkitun rakennuksen tuulen aiheuttamat värähtelyt eivät siis ole ongelma. Rakenteita voisi vielä hieman keventää ilman, että värähtelyt muodostuivat ongelmaksi. Esimerkiksi rakennuksen jäykistävät seinät ja välipohjat ovat paksuja, ja näitä rakenneosia voisi pienentää värähtelytarkastelun perusteella.

Työssä tutkittiin myös toisen korkean rakennuksen vaikutusta rakennuksen kiihtyvyyksiin ja siirtymiin. Toinen rakennus kasvatti merkittävästi tutkittavan rakennuksen kiihtyvyyksiä ja siirtymiä niillä tuulen kulmilla, joilla tutkittava rakennus oli toisen rakennuksen katveessa. Suurimmillaan toinen rakennus tuplasi tutkittavan rakennuksen kiihtyvyyksien ja siirtymien arvot. Tuulen kulmilla, joilla tutkittava rakennus ei ole toisen rakennuksen katveessa ovat kiihtyvyyksien ja siirtymien arvot lähes samat kuin ilman lisärakennusta. Pienet erot näissä arvoissa johtuvat mittausmenetelmän epätarkkuuksista ja siitä, että toinen rakennus hieman muuttaa virtausta tuulitunnelissa, vaikka rakennus ei olisikaan tutkittavan rakennuksen edessä.

Vertailtaessa mittaustuloksista saatuja kiihtyvyyden arvoja eurokoodin mukaisiin kiihtyvyyden arvoihin, nähdään, että ensimmäisessä ominaisuudessa eurokoodin avulla lasketut kiihtyvyydet ovat lähellä mittauksista saatuja kiihtyvyyksien arvoja. Eurokoodin kaavojen avulla saadaan laskettua vain tuulensuuntaiset kiihtyvyydet. Staadilla lasketulla ominaistajuudella määritetyksi kiihtyvyydeksi saatiin $0,11 \text{ m/s}^2$. Vastaavaa mittaustuloksista laskettu tuulensuuntainen kiihtyvyyden arvo oli noin $0,12 \text{ m/s}^2$. Määriteltäessä kiihtyvyydet käyttäen eurokoodin mukaista ominaistajuutta, saadaan kiihtyvyydeksi $0,07 \text{ m/s}^2$, joka on pienempi kuin mittausten perusteella lasketut kiihtyvyydet millään tuulen kulmalla. Jos kiihtyvyydet lasketaan eurokoodin likimääräisellä ominaistajuudella, kiihtyvyydet voivat siistulla aliarvioiduiksi. Vertailtaessa kiihtyvyyksiä toisessa ominaisuudessa ovat erot suurempia. Nyt eurokoodin likimääräinen ominaistajuus on lähellä Staadilla laskettua ominaistajuutta, joten suurta virhettä ei synny, jos käytetään eurokoodin likimääräistä ominaistajuutta. Eurokoodin avulla laskettu kiihtyvyys toisessa ominaisuudessa on suurempi kuin mittausten avulla määritetty kiihtyvyyden arvo millään tuulen kulmalla. Eurokoodin laskentaohjeet antamat kiihtyvyyden arvot ovat suuruusluokaltaan samoja kuin mittauksista saadut tulokset. Eroja mittaustuloksiin kuitenkin oli: osa eurokoodin antamista kiihtyvyyden arvoista oli pienempiä kuin mittauksista saadut kiihtyvyyden arvot ja osa puolestaan suurempia, joten tässä työssä laskettuja eurokoodin mukaisia kiihtyvyyden arvoja voidaan pitää vain suuntaa antavina.

Merkittävä puute eurokoodissa on tuulta vastaan kohtisuoran kiihtyvyyden laskentaohjeiden puuttuminen. Tässä työssä huomattiin, että kyseinen kiihtyvyys voi olla merkittävin kiihtyvyyden muoto. Eurokoodissa ei myöskään ole ohjeita korkeammilla ominaistajuuksilla tapahtuvan värähtelyn määrittämiseen, mutta näillä taajuuksilla tuulen aiheuttama värähtely ei yleensä ole merkittävää, kuten tässä työssä tutkitun rakennuksen kohdalla huomattiin.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Työssä tutkittu korkeataajuinen vaakamittaustekniikka on käyttökelpoinen menetelmä rakennuksen tuulikuormien ja kiihtyvyyksien määrittämiseen, mutta menetelmään sisältyy myös huonoja puolia, jotka voivat vaikeuttaa luotettavien tulosten saamista.

Mittaustekniikan suurin hyöty on siinä, että mittaukset saadaan suoritettua nopeasti. Tässä työssä tuulitunnelimittaukset saatiin suoritettua viikossa, huolimatta siitä, että osa mittauksista jouduttiin tekemään kahteen kertaan mittausjärjestelyjä välillä parantaen. Tuulikuormien ja värähtelyiden nopea määrittäminen edellyttää kuitenkin, että käytössä on tietokoneohjelma, jonka avulla työläimmät laskelmat saadaan suoritettua. Mittauksen hyötynä on myös, että yleensä yhdet huolellisesti suoritettut mittaukset riittävät. Vaikka rakennuksen rakenteet muuttuisivat, ei mittauksia tarvitse tehdä uudelleen, kunhan rakennuksen geometria pysyy samana. Rakenteiden muuttaminen vaikuttaa rakennuksen ominaistuuksiin. Tämä huomioidaan laskelmissa, mutta tällä ei ole vaikutusta tuulitunnelissa tehtäviin mittauksiin. Jos käytössä on valmiita laskentapohjia, on myös rakenteissa tapahtuvien muutosten vaikutus nopeasti selvitettävissä. Lisäksi värähtelytarkastelun suorittaja voi vertailla eri asioiden kuten tuulennopeuden ja vaimennuksen vaikutusta värähtelyihin ilman, että mittauksia joudutaan suorittamaan uudelleen, koska nämä asiat huomioidaan vasta tuulitunnelikokeiden jälkeen tehtävissä laskelmissa.

Mittaustekniikka sisältää ominaisuuksia, jotka voivat pahimmillaan estää luotettavien mittaustulosten saamista, kuten tässä työssä tehdyissä ensimmäisissä mittauksissa huomattiin. Työssä käytettävä pienoismalli on hyvin pieni, joten mitattavat voimat ovat myös hyvin pieniä. Tällöin häiriökohina voi haitata luotettavien tulosten saamista. Häiriökohina aiheutunee mittausympäristön yksityiskohdista kuten pitkistä johdoista, huonosta maadoituksesta, moottorista ja sen taajuusmuuttajasta. Tuulikuormat saadaan määritettyä hyvin, vaikka mittauksissa olisi häiriökohinaa, koska ne perustuvat mittausten keskiarvoihin, jolloin häiriön vaikutus saadaan pääosin poistettua. Häiriökohinan merkitys on suurempi, kun tutkitaan rakennuksen värähtelyjä. Häiriökohinan poistaminen on edellytys sille, että mitta-

ustekniikalla saadaan luotettavia tuloksia tuulen aiheuttamista rakennusrungon värähtelyistä. Häiriökohinaa voidaan vähentää pienillä toimenpiteillä, kuten tässä työssä huomattiin: johtoja lyhentämällä ja maadoitusta parantamalla. On myös hyvä varmistaa, että mittauksia tehdessä lähistöllä ei ole turhia sähkölaitteita. Kun vaaka asennetaan paikoilleen, tulisi vaaka sijoittaa niin, että vaa'an teräsosat eivät osu tuulitunnelin teräsosiin, jotka voivat aiheuttaa häiriötä. Kun häiriökohina saadaan poistettua, ja mittausjärjestelyt ja kalibrointi suoritetaan huolellisesti, on korkeataajuinen vaakamittaustekniikka hyvä menetelmä, kun rakennuksen tuulikuormat ja tuulen aiheuttamat värähtelyt halutaan määrittää nopeasti.

Nopeutensa ansiosta korkeataajuinen vaakamittaustekniikka soveltuu hyvin osaksi suunnitteluprosessia. Mittaukset ja laskelmat pystytään suorittamaan niin nopeasti, että niiden takia suunnitteluprosessi ei hidastu. Aikaa mittausten ja laskelmien tekemiseen kuluu noin 2-3 viikkoa, kun koko suunnitteluprosessi puolestaan kestää useita kuukausia. Mittauksista saatavia tuloksia voidaan käyttää hyväksi myös kohteen muussa suunnittelussa kuten julkisivujen ja jäykistyksen suunnittelussa. Muita erillisiä tuulilaskelmia ei tarvitse välttämättä suorittaa. Lisäksi rakenteita pystytään optimoimaan paremmin, koska mittaustekniikalla saatavat tulokset ovat tarkempia kuin laskentaohjeilla saatavat tulokset. Kun rakenteet voidaan optimoida tarkemmin, on mahdollista saavuttaa säästöjä materiaalikustannuksissa. Mittaustekniikalla saadaan selville myös sellaisia tuulen vaikutuksia, joita ei laskentaohjeilla pystytä laskemaan kuten esimerkiksi tuulensuuntaan kohtisuora kiihtyvyys ja herätetärinän vaikutus. Tällaisilla asioilla voi olla suuri merkitys rakennuksen kestävyys- ja ihmisten viihtyvyyden kannalta.

Mittausten suorittaminen itsessään on periaatteessa yksinkertaista, mutta vaatii ammattiosaamista. Ensi kertaa mittauksia tekevä alaan perehtynyt henkilö pystyy suorittamaan tarvittavat mittaukset noin viikossa. Mittaustekniikan taustalla olevan teorian, kuten satunnaisvärähtely, ovat sen sijaan hankalampia ja niiden ymmärtäminen edellyttää syvällistä perehtymistä aiheeseen. Mitä enemmän teoriasta ymmärtää sitä helpompi on ymmärtää mittaustekniikkaa, tuloksia ja erilaisten oletusten vaikutusta työhön. Työssä suoritettavat laskelmat sisältävät paljon todennäköisyyslaskentaa, joten todennäköisyyslaskennan perustiedot on osattava, jotta mittaustuloksia voi luontevasti tulkita. Tässä työssä tehtyjä mittausta nopeutti

se, että diplomityön ohjaaja valmisteli vaa'an ja siihen liittyvät laitteiston. Ilman tätä mittauksiin olisi kulunut huomattavasti enemmän aikaa, koska vaa'an ja mitauslaitteiston laittaminen mittauskuntoon vaatii myös sähkötekniikan ymmärtämistä. Mittaustekniikan kokonaisvaltainen hallitseminen on luonteeltaan poikkeusteollista: rakennustekniikan lisäksi on ymmärrettävä niin matematiikkaa kuin sähkötekniikkaa. Näiden aihealueiden ymmärtäminen on oleellista, jotta mittaukset suoritetaan oikein, saadaan laskettua oikeat tulokset, ja pystytään oikeanlaisiin ja luotettaviin tulosten analysointiin.

Eurokoodin mukaiset laskelmat antoivat tuulikuormien osalta tässä työssä varmalta puolella olevia tuloksia. Kiihtyvyyksien osalta eurokoodista saatavat tulokset olivat vain suuntaa antavia. Eurokoodia käytettäessä onkin hyvä pohtia sen tarkkuutta. Laskemalla tuulikuormat ja tuulen aiheuttamat rakennuksen värähtelyt noudattamalla täydellisesti eurokoodin oletuksia, voivat tulokset olla vääristyneitä todellisuuteen verrattuna.

8 YHTEENVETO

Korkealle rakennukselle tuuli on mitoitukseen merkittävästi vaikuttava kuormitus, joka staattisen rasituksen ohella voi synnyttää rakenteeseen myös värähtelyä. Rakennus voi tuulen vaikutuksesta värähdellä tuulen suuntaan, tuulta vastaan kohtisuoraan tai vääntyä. Korkeiden rakennusten tuulitekniinen suunnittelu suunnitteluohjeilla voi olla epätarkkaa tai mahdotonta johtuen tuulen ja rakennuksen välisen vuorovaikutuksen monimutkaisuudesta sekä rakennuksen ja sen ympäristön yksilöllisyydestä. Tästä syystä tuulen vaikutukset rakennukseen joudutaan selvittämään osittain tuulitunnelikokeilla. Tuulitunnelikokeissa voidaan selvittää luotettavasti ja tarkasti rakennukseen kohdistuvat tuulenpaineet, kokonaistuulivoimat ja tuulen aiheuttamat värähtelyt.

Tässä työssä tutkittiin korkeataajuisia vaakamittaustekniikkaa. Mittaustekniikassa kevyestä materiaalista tehty jäykkä pienoismalli kiinnitetään tuulitunneliin sijoitettavan herkän korkean ominaistaajuuden (2,3-8 kHz) omaavan vaa'an päälle. Tuulikuormien hallitseva taajuusalue on 0-1 Hz. Mittaustekniikalla avulla saadaan määritettyä tarkasti ja luotettavasti tuulikuormat ja rakennuksen värähtelyt. Korkeataajuinen vaakamittaustekniikka on saavuttanut suosiota, koska se on nopea ja yksinkertainen mittaustekniikka. Tässä työssä tutkittiin kuvitteellista suorakaiteen muotoista 100 metriä korkeaa 25-kerroksista rakennusta. Tulevaisuudessa Suomeen on tarkoitus rakentaa tutkittavan esimerkkirakennuksen korkuisia tai korkeampia rakennuksia, joten tuulitunnelikokeita tarvitaan myös Suomeen rakennettavien korkeiden talojen rakennesuunnittelussa.

Tässä työssä määritettiin korkeataajuisen vaakamittaustekniikan avulla rakennukseen kohdistuvat staattiset ja kvasistaattiset tuulikuormat sekä rakennuksen värähtelyt. Työssä selvitettiin myös toisen korkean rakennuksen aiheuttaman häiriön vaikutusta tutkittavan rakennuksen värähtelyihin. Työssä selvitettiin lisäksi korkeataajuisen vaakamittaustekniikan hyvät ja huonot puolet, ja sen soveltuvuus osaksi suunnitteluprosessia. Työssä tehtyjen eurokoodien mukaisten vertailulaskelemien avulla selvitettiin sitä, kuinka hyvin rakennuksen värähtelyt ja tuulikuor-

mat voidaan määritellä eurokoodin avulla ja missä tilanteissa on puolestaan tarpeellista tai välttämätöntä suorittaa tuulitunnelikokeita.

Työssä määritettiin staattiset ja kvasistaattiset tuulikuormat kolmella eri virtausnopeudella: 8 m/s, 10 m/s ja 12 m/s. Staattisen tuulikuormien määrittäminen onnistui hyvin jokaisella virtausnopeudella. Tuloksena saadut skaalatut tuulikuormat olivat jokaisella virtausnopeudella lähes yhtä suuria. Vaakamittaustekniikalla saadaan siis määritettyä luotettavasti ja tarkasti staattiset tuulikuormat eri virtausnopeuksilla. Työssä osoitettiin, että vaakamittaustekniikalla saadaan määritettyä hyvin myös kvasistaattiset tuulikuormat, kunhan sähkölaitteista aiheutuva häiriökohina saadaan pidettyä pienenä, joka osoittautui olevan välttämätöntä myös selvittäessä toisen korkean rakennuksen vaikutusta tutkittavan rakennuksen värähtelyihin. Yleisesti häiriökohinan aiheuttamat ongelmat tulivat selvimmän esille määriteltäessä rakennuksen värähtelyjä.

Esimerkkirakennukselle suoritetuista eurokoodin mukaisista vertailulaskelmista voidaan todeta, että tuulikuormien osalta eurokoodi antoi reilusti varmallalla puolella olevia tuloksia. Staattiset tuulikuormat olivat hieman mittauksista saatuja tuloksia suurempia. Kvasistaattisen tuulikuormien osalta marginaali oli suurempi. Suurimmillaan eurokoodi antoi yli 30 % suurempia tuulikuorman arvoja kuin mittaukset. Värähtelyjä laskettaessa eurokoodi antoi samansuuruisia tuloksia kuin mittaukset, mutta riippuen värähtelysuunnasta eurokoodin mukaiset tulokset olivat joko suurempia tai pienempiä. Esimerkkirakennuksella suoritettujen laskujen perusteella eurokoodi antaa järkeviä tuloksia tuulikuormien osalta, mutta värähtelyjen osalta tulokset ovat vain suuntaa antavia. Eurokoodia käytettäessä onkin hyvä pohtia sen sisältämien oletuksien ja puutteiden merkitystä suunnitteluun.

Korkeataajuisen vaakamittaustekniikan suurin hyöty on, että mittaukset saadaan suoritettua nopeasti. Tässä työssä mittaukset suoritettiin alle viikossa. Kun myös tuulitunnelimittausten jälkeiset laskelmat on mahdollista tehdä noin viikossa, soveltuu korkeataajuinen vaakamittaustekniikka hyvin osaksi suunnitteluprosessia. Mittauksista saadaan myös tarkempia ja laajempia tuloksia kuin eurokoodilla, mikä mahdollistaa rakenteiden tarkemman ja luotettavamman optimoinnin muissa suunnitteluvaiheissa.

Kuten tässä työssä huomattiin voivat suuret häiriöt voivat estää kokonaan luotettavien tulosten saamisen vaakamittaustekniikkaan perustuvassa tuulitunneliko-
keessa. Luotettavien tulosten edellytys on, että häiriöt pysyvät pieninä. Kun häiriöt saadaan pieniksi, mittaukset suoritetaan luotettavasti ja mittaustuloksia tulkitaan järkevästi, on vaakamittaustekniikka hyvä tapa määrittää rakennuksen tuulikuormat ja tuulen aiheuttamat rakennuksen värähtelyt.

LÄHDELUETTELO

- [1] SFS-EN 1991-1-4. Eurocode 1: rakenteiden kuormat. osa 1-4: yleiset kuormat. tuulikuormat. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto, 2005. 253 s.
- [2] Blevins Robert D. Flow-Induced Vibration. New York, Litton Educational Publishing, Inc. ns, Inc. 1977. 363 s. ISBN 0-442-20828-6
- [3] Kiviluoma, Risto. 1993. Vinoköysisillan analyysi tuulikuormalle. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja maanmittaustekniikan osasta. Espoo. 91 s.
- [4] Tedesco W. Joseph, McDougal G. William, Ross Allen C. Structural Dynamics: Theory and Applications. Menlo Park, Addison Wesley Longman, Inc. 1999. 816 s. ISBN 0-673-98052-9
- [5] Cheung, Y.K. and Chau, K.W. Tall Buildings - From Engineering to Sustainability. World Scientific. 2005. 1141 s. ISBN 978-1-60119-277-6 (sähköinen). ISBN 978-981-256-620-1 (painettu)
- [6] Riera J.D, Davenport A.G. Wind Effects on Buildings and Structures. Rotterdam, A.A. Balkema, 1998. 353 s. ISBN 90 5410 959 9
- [7] Mendis P, Ngo T, Haritos N, Hira A, Samali B, Cheung J. Wind Loading on Tall Buildings. Electronic Journal of Structural Engineering. [Verkkodokumentti]. 2007. Special Issue 2007, s. 41-54. [Viitattu 22.9.2008].
- Saatavissa:
www.civenv.unimelb.edu.au/ejse/Archives/Fulltext/2007/Special/200704.pdf
- [8] Sircovich-Saar O. Dynamics in the Practice of Structural Design. Southampton, WIT Press, 2006. 181 s. ISBN 1-84564-161-2
- [9] Kiviluoma, Risto. Siltojen aerodynamiikkaan liittyvien termien suomennoksia ja määritelmiä. Espoo, 1996. 5 s.
- [10] Council on tall buildings & urban habitat. Tall Building Criteria and Loading. New York. American Society of Civil Engineers. 1980. 888 s. ISBN 0-87262-237-1
- [11] Liu, Henry. Wind Engineering, A handbook for structural engineers. New Jersey, Prentice-Hall Inc, 2001. 209 s. ISBN 0-13-960279-8

- [12] ISO 6897. Guidelines for the Evaluation of the Response of Occupants of Fixed Structures, Especially Buildings and Off-shore Structures, to Low-frequency Horizontal Motion (0,063 to 1 Hz). International Organization for Standardization, 1984. 8 s.
- [13] ISO 2631-1:1997. Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 1: General requirements. International Organization for Standardization, 1997. 31 s.
- [14] ISO 2631-2:2003. Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz). International Organization for Standardization, 1997. 11 s.
- [15] De Silva, Clarence W. Vibration and Shock Handbook. Boca Raton, Taylor & Francis Group. 2005. 1872 s. ISBN 0-8493-1580-8
- [16] Thomson, William T. Theory of Vibration with Applications, 3rd edition. New Jersey, Prentice Hall. 1988. 467 s. ISBN 0-13-914532-X
- [17] Clough, Ray W. Penzien, Joseph. Dynamics of Structures, 2nd edition. Singapore, McGraw-Hill, Inc. 1993. 738 s. ISBN 0-07-011394-7
- [18] Clough, Ray W. Penzien, Joseph. Dynamics of Structures. Japan, McGraw-Hill, Inc. 1975. 634 s. ISBN 0-07-085098-4
- [19] Newland, D. E. An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis. 1980. Lontoo, Longman Group. 285 s. ISBN 0-582-46335-1
- [20] Yang C. Y. Random Vibration of Structures. Newark, John Wiley & Sons, Inc. 1986. 295 s. ISBN 0-471-80262-X
- [21] Elishakoff Isaac. Probabilistic Methods in the Theory of Structures. New York, John Wiley & Sons, Inc. 1983. 489 s. ISBN 0-471-87572-4
- [22] Lungu Dan, van Gelder Pieter. Characteristics of Wind Turbulence with Applications to Wind Codes. [Verkkodokumentti]. TU Delft. 7 s. [Viitattu 18.11.2008].

Saatavissa: www.citg.tudelft.nl/

[23] Kolousek Vladimir, Pirner Miros, Fischer Ondrej, Naprstek Jiri. Wind Effects on Civil Engineering Structures. Praha, Czechoslovak Academy of Sciences. 1983. 571 s. ISBN 0-444-99636-2

[24] Huang Guoqing, Chen Xinzhong. Wind Load Effects and Equivalent Static Wind Loads of Tall Buildings Based on Synchronous Pressure Measurements. Engineering Structures. [Verkkodokumentti]. Vol. 29:10. 2007. s. 2641-2653. [Viitattu 02.12.2008].

Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com>

[25] Bungale S. Taranath. Wind and Earthquake Resistant Buildings, Structural Analysis and Design. Boca Raton, Taylor & Francis Group, 2005. 892 s. ISBN 0-8247-5934-6

[26] Kiviluoma, Risto. 1996. Pitkän jännevälin sillan aeroelastinen stabiilius. Lissensiaattityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto. Espoo. 120 s.

[27] Langhaar Henry L. Dimensional Analysis and Theory of Models. 1983. New York, John Wiley & Sons, Inc. 166 s. ISBN 0-88275-682-6

[28] Lawson Tom. Building Aerodynamics. London, Imperial College Press. 2001. 286 s. ISBN 1-86094-187-7

[29] Xie J, Irwin P.A. Application of the force balance technique to a building complex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. [Verkkodokumentti]. 1998. 77&78 s. 579-590. [Viitattu 18.9.2008].

Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com>

[30] Kijewski Tracy, Haan Fred, Kareem Ashan. Wind-Induced Vibrations. Encyclopedia of Vibration, Academic Press. 2000. 30 s. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 18.9.2008].

Saatavissa: [www.nd.edu/~nathaz/journals/\(2000\)Wind-Induced_Vibrations.pdf](http://www.nd.edu/~nathaz/journals/(2000)Wind-Induced_Vibrations.pdf)

[31] Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-1. Eurocode 1: rakenteiden kuormat. osa 1-1: yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakenteen hyöty-

kuormat. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 05.01.2009]. Saatavissa:
<http://www.eurocodes.fi/1991/1991-1-1/NA%20SFS-EN1991-1-1.pdf>

[32] Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-4. Eurocode 1: rakenteiden kuormat. osa 1-4: yleiset kuormat. Tuulikuormat. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 05.01.2009]. Saatavissa:

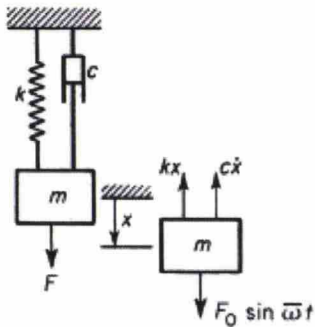
<http://www.eurocodes.fi/1991/1991-1-4/NA%20SFS-EN1991-1-4.pdf>

[33] Weaver, William Jr. Timoshenko, Stephen P. Young, Donovan H. Vibration Problems in Engineering. 1990. New York, John Wiley & Sons, Inc. 610 s. ISBN 0-471-63228-7

LIITE A 1(5)

HARMONISEN HERÄTTEEN KUORMITTAMAN YHDEN VAPAUSASTEEN VÄRÄHTELYSYSTEMIN RATKAISEMINEN

Useaan värähtelysteemin vaikuttaa ulkoinen heräte, jolloin värähtelyä kutsutaan pakkovärähtelyksi. Heräte voi olla jaksollinen tai jaksoton. Jaksollinen vaste voi olla harmoninen tai ei-harmoninen. Tutkitaan seuraavaksi yhden vapausasteen pakotettua viskoosisesti vaimennettua värähtelysteemiä, johon vaikuttaa harmoninen heräte. Tutkittava värähtelysteemi on esitetty kuvassa A.1.



Kuva A.1. Yhdenvapausasteen pakkovärähtely, johon vaikuttaa harmoninen heräte. [16, s. 51]

Kuvan A.1 mukaisen värähtelysteemin liikeyhtälö on

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \bar{\omega} t \quad (\text{A.1})$$

joka voidaan esittää myös muodossa

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \omega^2 x = \frac{F_0}{m} \sin \bar{\omega} t . \quad (\text{A.2})$$

jossa

- m on massa
- c on vaimennuskerroin
- k on jäykkyyserroin
- $\bar{\omega}$ on herätteen kulmataajuus

LIITE A 2(5)

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{on ominaiskulmataajuus.} \quad (\text{A.3})$$

Vaimennus kuvaa energian katoamista värähtelevästä systeemistä. Rakenteessa vaikuttaa vaimennusvoimia, jotka vastustavat rakenteen liikettä. Näiden voimien seurauksena rakenteen energia häviää eli värähtelyn amplitudi pienenee. Jossain tapauksissa vaimennusvoimat voivat kuitenkin lisätä rakenteen värähtelyn amplitudia. Tätä kutsutaan negatiiviseksi vaimennukseksi. [33, s. 59] Kriittinen vaimennus on vaimennuksen määrä, joka tarvitaan, jotta systeemi ei värähtele. Vaimennusta mitataan prosentteina kriittisestä vaimennuksesta. Systeemin, jonka vaimennus on kriittistä vaimennus pienempi, kutsutaan alivaimennetuksi systeemiksi. Vastaavasti systeemiä, jonka vaimennus on kriittistä vaimennusta suurempi, kutustaan ylivaimennetuksi. [4, s. 80–82] Kriittinen vaimennus lasketaan kaavalla

$$C_c = 2m\omega \quad (\text{A.4})$$

ja vaimennussuhde kaavalla

$$\zeta = \frac{c}{C_c} = \frac{c}{2m\omega}. \quad (\text{A.5})$$

Vaimennus voidaan jakaa viskoosiseen, hystereesiseen ja kitkavaimennukseen. Viskoosinen vaimennus on suoraan verrannollinen massan nopeuteen. Viskoosinen vaimennus voidaan jakaa ulkoiseen ja sisäiseen vaimennukseen. Rakennuksilla ilma aiheuttaa ulkoista viskoosista vaimennusta. Sisäinen viskoosinen vaimennus aiheutuu materiaalien viskositeetista. [25, s. 102–103] Kun rakennetta kuormitetaan sykleissä, sen energia häviää materiaalissa itsessään johtuen sisäisestä kitkasta, joka aiheutuu partikkeleiden luistamisesta ja liukumisesta. Tällaista sisäistä vaimennusta kutsutaan yleisesti hystereesivaimennukseksi. [4, s. 91] Monissa rakenteissa vaimennusta tapahtuu, kun vierekkäiset rakenneosat liikkuvat toistensa suhteen. Tätä vaimennusta kutsutaan kitkavaimennukseksi. [4, s. 96] Logaritminen dekrementti δ on kahden peräkkäisen samansuuntaisen siirtymäamplitudin luonnollinen logaritmi. Logaritminen dekrementti δ kuvaa systeemin

LIITE A 3(5)

vapaan värähtelyn pienenemisastetta. Vaimennussuhde saadaan määritettyä logaritmisin dekrementin avulla kaavalla [4, s. 87]

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}}. \quad (\text{A.6})$$

Eurokoodissa [1, s. 246] annetaan ohjeet logaritmisin dekrementin määrittämiseksi alimmalla ominaistajuudella. Kun usean vapausasteen värähtelysystemiä tutkitaan moodisummausmenetelmän avulla, lasketaan jokaista ominaistajuutta vastaava moodikohtainen vaimennus (21).

Värähtelysystemin liikeyhtälön ratkaisu koostuu kahdesta osasta: homogeenisestä ja yksittäisratkaisusta. Liikeyhtälön (A.1.) kokonaisratkaisu saadaan homogeenisen ja yksittäisratkaisun summana kaavalla

$$x(t) = e^{-\zeta\omega t} (A_1 \sin \omega_d t + A_2 \cos \omega_d t) + \frac{F_0}{k} \frac{1}{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2} [(1-r^2) \sin \bar{\omega} t - 2\zeta r \cos \bar{\omega} t]. \quad (\text{A.7})$$

jossa

A_1 ja A_2 ovat alkuehdoista määriteltäviä vakioita

r on taajuussuhde,

joka lasketaan kaavalla

$$r = \frac{\bar{\omega}}{\omega}. \quad (\text{A.8})$$

ω_d on vapaan vaimennetun värähtelyn kulmataajuus,

joka lasketaan kaavalla

$$\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2} \omega. \quad (\text{A.9})$$

LIITE A 4(5)

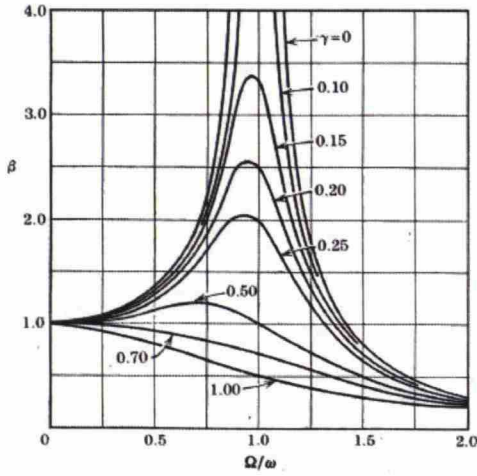
Ratkaisu (A.7) voidaan esittää myös muodossa

$$x(t) = e^{-\zeta\omega t} (A_1 \sin \omega_d t + A_2 \cos \omega_d t) + \frac{F_0}{k} \beta^2 [(1-r^2) \sin \bar{\omega} t - 2\zeta r \cos \bar{\omega} t] \quad (\text{A.10})$$

jossa

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (\text{A.11})$$

on dynaaminen suurennustekijä. [17, s. 36–38, 4 s. 116–119] Kuvassa A.2 on esitetty dynaamisen suurennustekijän riippuvuutta taajuus- ja vaimennussuhteesta. Kuvasta A.2 nähdään, että herätteen kulmataajuuden $\bar{\omega}$ ollessa pieni suhteessa värähtelysteemin kulmataajuuteen ω , on dynaaminen suurennustekijä lähellä 1 riippumatta vaimennussuhteesta. Vastaavasti, kun herätteen kulmataajuus $\bar{\omega}$ on suuri suhteessa värähtelysteemin kulmataajuuteen ω , lähestyy dynaaminen suurennustekijä nollaa huolimatta vaimennussuhteesta eli korkeataajuinen heräte ei juuri aiheuta pakkovärähtelyä matalataajuiseen systeemiin. Resonanssissa ($\bar{\omega}/\omega=1,0$) tai lähellä resonanssia dynaaminen suurennustekijä on riippuvainen vaimennussuhteesta. Vaimennussuhteen ollessa suuri, ei dynaaminen suurennustekijä kasva suureksi. Vaimennussuhteen pienentyessä, dynaaminen suurennustekijä kasvaa merkittävästi. Jos systeemissä ei ole lainkaan vaimennusta, kasvaa dynaaminen suurennustekijä äärettömän suureksi, jonka seurauksena kaavasta (A.10) saatava siirtymän arvo kasvaa myös äärettömän suureksi. Systeemin vaimennuksella on siis merkittävä vaikutus systeemin ollessa resonanssissa tai lähellä resonanssia. [33, s. 64–65]



Kuva A.2. Taajuus- ja vaimennussuhteen vaikutus dynaamiseen suurennustekijään. γ on vaimennussuhde, Ω/ω on taajuussuhde ja β on vaimennustekijä. [33, s. 64]

Yleisesti jaksollisia herätteitä voidaan tutkia Fourier-sarjojen avulla [4, s. 140]. Fourier-sarjat ovat käyttökelpoisia, kun tutkitaan jaksollisia herätteitä, mutta käytettäessä Fourier-sarjoja jaksottomien herätteiden tutkimiseen, tulokset voivat olla epätarkkoja. Satunnaisvärähtely on yleensä jaksotonta ja sen jatkuvan taajuus-spektrin määrittelyyn tarvitaan Fourier-integraaleja. [16, s. 373]]

LIITE B 1(2)

FOURIER-MUUNNOKSET

Liiketyhtälöitä voidaan tutkia myös taajuustasossa. Tällöin aikatason liiketyhtälölle tulee tehdä Fourier-muunnos. Fourier-integraalit saadaan laskettua kaavoilla [16, s. 376]

$$F(\bar{\omega}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\bar{\omega}t} dt. \quad (\text{B.1})$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\bar{\omega})e^{i\bar{\omega}t} d\bar{\omega} \quad (\text{B.2})$$

Ensimmäistä (B.1) kutsutaan Fourier-muunnokseksi ja jälkimmäistä (B.2) Fourier-käänteismuunnokseksi. Yhden vapausasteen liiketyhtälön (A.1) Fourier-muunnokseksi saadaan [15, s. 5-10]

$$(-m\bar{\omega}^2 + i\bar{\omega}c + k) \cdot X(\bar{\omega}) = F(\bar{\omega}) \quad (\text{B.3})$$

jossa

$X(\bar{\omega})$ on vasteen Fourier-muunnos

$F(\bar{\omega})$ on herätteen Fourier-muunnos.

Yhtälö (B.3) voidaan esittää myös muodossa

$$X(\bar{\omega}) = F(\bar{\omega})H(\bar{\omega}) \quad (\text{B.4})$$

jossa

$$H(\bar{\omega}) = \frac{1}{-m\bar{\omega}^2 + i\bar{\omega}c + k} = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{(1-r^2) + i(2\zeta r)} \quad (\text{B.5})$$

on kompleksinen taajuusvastefunktio. Yhtälön (B.4) ratkaisua kutsutaan taajuustason ratkaisuksi.

LIITE B 2(2)

Myös usean vapausasteen värähtelysteemejä voidaan tutkia taajuustasossa. Kun liikeyhtälölle (7) suoritetaan Fourier-muunnos, saadaan [15, s. 5-12]

$$(-\bar{\omega}^2[m] + i\bar{\omega}[c] + [k])\{X(\bar{\omega})\} = \{F(\bar{\omega})\} \quad (\text{B.6})$$

jossa

$\{X(\bar{\omega})\}$ on vasteen $\{x(t)\}$ Fourier-muunnos

$\{F(\bar{\omega})\}$ on herätteen $\{F(t)\}$ Fourier-muunnos.

Yhtälö (B.6) voidaan esittää myös muodossa

$$[Z(\bar{\omega})]\{X(\bar{\omega})\} = \{F(\bar{\omega})\} \quad (\text{B.7})$$

jossa

$$[Z(\bar{\omega})] = -\bar{\omega}^2[m] + i\bar{\omega}[c] + [k]. \quad (\text{B.8})$$

Kun yhtälö (B.7) kerrotaan käänteismatriisilla $[Z(\bar{\omega})]^{-1}$, saadaan

$$\{X(\bar{\omega})\} = [Z(\bar{\omega})]^{-1}\{F(\bar{\omega})\}. \quad (\text{B.9})$$

$[Z(\bar{\omega})]^{-1} = [H(\bar{\omega})]$, jota kutsutaan kompleksiseksi taajuusvastematriisiksi. Tällöin usean vapausasteen värähtelysteemin vaste taajuustasossa saadaan kaavalla

$$\{X(\bar{\omega})\} = [H(\bar{\omega})]\{F(\bar{\omega})\}. \quad [\text{15, s. 5-12-14}] \quad (\text{B.10})$$

LIITE C 1(3)

SKAALAUKERTOIMIEN MUODOSTAMINEN

Työssä käytetään skaalauskerroimia, joiden avulla pienoismallin voimat ja spektritiheydet skaalataan vastaamaan todellista rakennusta. Skaalauskerroimet perustuvat dimensiottomiin tuloihin. Muodostetaan ensin voimien skaalauskerroin, joka on esitetty kaavassa (54). Muodostetaan ensin dimensioton yhtälö

$$\frac{F_m}{\rho_m v_m^2 d_m^2} = \frac{F_p}{\rho_p v_p^2 d_p^2} \quad (\text{C.1})$$

jossa

F_m on kuorma tuulitunnelissa [N]

ρ_m on ilmantiheys tuulitunnelissa [kg/m^3]

v_m on virtausnopeus tuulitunnelissa [m/s]

d_m on pienoismallin tuulensuuntaisen sivun pituus [m]

F_p on tuulikuorma luonnossa [N]

ρ_p on ilmantiheys luonnossa [kg/m^3]

v_p on virtausnopeus luonnossa [m/s]

d_p on oikean rakennuksen tuulensuuntaisen sivun pituus [m].

Yhtälö C.1 on dimensioton, koska kaikki siinä olevat yksiköt häviävät. Kun oletetaan, että ilmantiheys tuulitunnelissa on yhtä suuri kuin luonnossa $\rho_m = \rho_p$, ja käyttämällä hyväksi kaavaa (53), voidaan muodostaa voimien välille yhteys

$$F_p = F_m \frac{v_p^2 d_p^2}{v_m^2 d_m^2} = F_m \left(\frac{v_p}{v_m} \right)^2 \left(\frac{1}{\eta} \right)^2 \quad (\text{C.2})$$

jossa

LIITE C 2(3)

$\left(\frac{v_p}{v_m}\right)^2 \left(\frac{1}{\eta}\right)^2$ on voimien skaalauskerroin.

Vastaavasti voidaan muodostaa momenttien skaalauskerroin (56). Nyt dimensioton yhtälö on muotoa

$$\frac{M_m}{\rho_m v_m^2 d_m^3} = \frac{M_p}{\rho_p v_p^2 d_p^3} \quad (\text{C.3})$$

jossa

M_m on momentti tuulitunnelissa [Nm]

M_p on momentti luonnossa [Nm].

Nyt saadaan vastaavasti momenttien välille yhteys

$$M_p = M_m \frac{v_p^2 d_p^3}{v_m^2 d_m^3} = M_m \left(\frac{v_p}{v_m}\right)^2 \left(\frac{1}{\eta}\right)^3 \quad (\text{C.4})$$

jossa

$\left(\frac{v_p}{v_m}\right)^2 \left(\frac{1}{\eta}\right)^3$ on momenttien skaalauskerroin.

Samalla tavalla muodostetaan spektritiheyksien skaalaukertoimet. Muodostetaan kaavassa (65) esitettyä voimien spektritiheyksiä varten yhtälö

$$\frac{S_m}{\rho_m v_m^3 d_m^5} = \frac{S_p}{\rho_p v_p^3 d_p^5} \quad (\text{C.5})$$

jossa

S_m on tuulikuorman spektritiheys tuulitunnelissa [N^2s]

S_p on tuulikuorman spektritiheys luonnossa [N^2s].

LIITE C 3(3)

Voimien spektritiheyksien välille saadaan yhteys

$$S_p = S_m \frac{v_p^3 d_p^5}{v_m^3 d_m^5} = S_m \left(\frac{v_p}{v_m} \right)^3 \left(\frac{1}{\eta} \right)^5 \quad (\text{C.6})$$

jossa

$$\left(\frac{v_p}{v_m} \right)^3 \left(\frac{1}{\eta} \right)^5 \text{ on voimien spektritiheyksien skaalauskerroin.}$$

Vastaavasti muodostetaan momenttien spektritiheyksien skaalauskerroin (66).

Muodostetaan yhtälö

$$\frac{S_m}{\rho_m v_m^3 d_m^6} = \frac{S_p}{\rho_p v_p^3 d_p^6} \quad (\text{C.7})$$

jossa

S_m on momentin spektritiheys tuulitunnelissa [$N^2 ms$]

S_p on momentin spektritiheys luonnossa [$N^2 ms$].

Voimien spektritiheyksien välille saadaan yhteys

$$S_p = S_m \frac{v_p^3 d_p^6}{v_m^3 d_m^6} = S_m \left(\frac{v_p}{v_m} \right)^3 \left(\frac{1}{\eta} \right)^6 \quad (\text{C.8})$$

jossa

$$\left(\frac{v_p}{v_m} \right)^3 \left(\frac{1}{\eta} \right)^6 \text{ on momenttien spektritiheyksien skaalauskerroin.}$$

LIITE D 1(4)

TUULITUNNELIKOKEEN KALIBROINTIMATRIISIN MÄÄRITTÄMINEN

Kalibrointimatriisia varten tuulitunnelissa suoritettiin kahdeksan mittausta. Ensimmäisestä ja viimeisestä mittauksesta saatiin sähkölaitteiden aiheuttamasta häiriökohinasta aiheutuvat jännitearvot jokaisella kuudella kanavalla. Näiden kahden häiriökohinamittauksen välillä suoritettiin kuusi kuormitusmittausta. Suoritettavat mittaukset olivat:

1. 500 gramman punnus asetettiin positiivisen x-akselin suuntaan 30 millimetrin korkeudelle rakennuksen ja vaa'an kiinnityskohdasta
2. 500 gramman punnus asetettiin negatiivisen y-akselin suuntaan 30 millimetrin korkeudelle rakennuksen ja vaa'an kiinnityskohdasta
3. 500 gramman punnus asetettiin negatiivisen z-akselin suuntaan
4. 500 gramman punnus asetettiin positiivisen x-akselin suuntaan 220 millimetrin korkeudelle rakennuksen ja vaa'an kiinnityskohdasta
5. 500 gramman punnus asetettiin negatiivisen y-akselin suuntaan 220 millimetrin korkeudelle rakennuksen ja vaa'an kiinnityskohdasta
6. kaksi 500 gramman punnus asetettiin rakennuksen vastakkaisista nurkista 230 millimetrin korkeudelle rakennuksen ja vaa'an kiinnityskohdasta.

Jokaisesta kuormitusmittauksesta saatiin tuloksena jännitearvot jokaisella kuudella kanavalla.

Kalibrointimatriisi voidaan ratkaista kaavasta

$$[F] = [K] \cdot [u] \quad (D.1)$$

jossa

$[F]$ on kuormitusmatriisi

$[K]$ on kalibrointimatriisi

$[u]$ on jännitematriisi.

LIITE D 2(4)

Yhtälö (D.1) voidaan esittää muodossa

$$[\{F_1\}, \{F_2\}, \{F_3\}, \{F_4\}, \{F_5\}, \{F_6\}] = [K] \cdot [\{u_1\}, \{u_2\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}] \quad (D.2)$$

jossa

$\{F_i\}$ on kuormitusvektori

$\{u_i\}$ on jännitevektori

$$i = 1, 2, \dots, 6 \quad i \in \mathbb{N}.$$

Kuormitusvektori ovat muotoa

$$\begin{bmatrix} F_{ix} \\ F_{iy} \\ F_{iz} \\ M_{ix} \\ M_{iy} \\ M_{iz} \end{bmatrix} \quad (D.3)$$

ja jännitevektori muotoa

$$\begin{bmatrix} u_{ji} \\ u_{ji} \\ u_{ji} \\ u_{ji} \\ u_{ji} \\ u_{ji} \end{bmatrix} \quad (D.4)$$

jossa

$$i = 1, 2, \dots, 6 \quad i \in \mathbb{N}$$

$$j = 1, 2, \dots, 6 \quad j \in \mathbb{N} \text{ on kanavan numero.}$$

LIITE D 3(4)

Edellä esitetyistä kuormitusmittauksista saadaan muodostettua kuormitusvektorit ja –matriisi. Kuormitusmatriisiksi saadaan

$$\begin{bmatrix} 5N & 0 & 0 & 5N & 0 & 0 \\ 0 & -5N & 0 & 0 & -5N & 0 \\ 0 & 0 & 5N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,015Nm & 0 & 0 & 1,1Nm & 0 \\ 0,015Nm & 0 & 0 & 1,1Nm & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5Nm \end{bmatrix}. \quad (D.5)$$

Jokaista kuormitusvektoria vastaa jännitevektori, jotka saadaan muodostettua kalibroinnista saatavista jännitearvoista. Jännitematriisi voidaan esittää muodossa

$$\begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & u_{14} & u_{15} & u_{16} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & u_{24} & u_{25} & u_{26} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & u_{34} & u_{35} & u_{36} \\ u_{41} & u_{42} & u_{43} & u_{44} & u_{45} & u_{46} \\ u_{51} & u_{52} & u_{53} & u_{55} & u_{55} & u_{56} \\ u_{61} & u_{62} & u_{63} & u_{64} & u_{65} & u_{66} \end{bmatrix}. \quad (D.6)$$

Alkion u_{11} arvo on kanavan 1 jännitearvo mittauksesta 1, alkion u_{21} arvo on kanavan 2 jännitearvo mittauksesta 1, alkion u_{12} arvo on kanavan 1 jännitearvo mittauksesta 2 jne. Kyseisistä jännitearvoista on ennen matriisin muodostamista vähennetty häiriökohinan aiheuttama jännite. Jokaisen kanavan häiriökohinan aiheuttaman jännitearvon oletettiin muuttavan ajan suhteen lineaarisesti ennen kuormitusmittauksia mitatusta jännitearvosta kuormitusmittauksien jälkeen mitattuun jännitearvoon. Näin saatiin määritettyä jokaisen kuormitusmittauksen aikana vaikuttanut häiriökohinan aiheuttama jännitearvo.

LIITE D 4(4)

Kalibrointimatriisi on muotoa

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{55} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix}. \quad (\text{D.7})$$

Kun kuormitus- ja jäykkyysmatriisi tunnetaan, saadaan kalibrointimatriisi määritettyä kaavalla

$$[K] = [F] \cdot [u^{-1}]. \quad (\text{D.8})$$

Varsinaisista mittauksista kalibrointimatriisi kerrotaan kanavista saatavilla jännitearvoilla, jolloin tulokseksi saadaan halutut kuusi voimasuuretta. Voimasuureet lasketaan kaavalla

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{55} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix}. \quad (\text{D.9})$$

LIITE E 1(6)

EUROKOODIN MUKAISET VERTAILULASKELMAT

Alla esitetyissä taulukoissa on esitetty eurokoodin mukaisissa laskelmissa tarvittavien parametrien arvot ja laskelmien tulokset. Taulukoissa E.1 ja E.2 on esitetty rosoisuuskerroin, tuulennopeuden modifioitu perusarvo, tuulenpuuskien intensiteetti ja nopeuspaineet.

Taulukko E.1. Taulukossa on esitetty rosoisuuskerroin, tuulennopeuden modifioitu perusarvo, tuulenpuuskien intensiteetti, nopeuspaine ja puuskanopeuspaine eri korkeuksilla, kun tuulee rakennuksen pitkän sivun suuntaisesti (y-akselin suuntaisesti). Taulukossa on esitetty kaksi nopeuspaineen arvoa: q_{pm} on nopeuspaine, jota käytetään staattisten tuulikuormien määrittämiseen, ja q_p on puuskanopeuspaine, jota käytetään kvasistaattisten kuormien laskemiseen.

		z[m]	c_r	v_m [m/s]	I_v [m/s]	q_p [kN/m ²]*	q_{pm} [kN/m ²]*
Maastoluokka III	I	0	0.78	17.20	0.22	1.024	0.543
z_0 [m]	0.01	5	1.05	23.21	0.16	1.024	0.543
z_{min} [m]	1	10	1.17	25.80	0.14	1.024	0.543
v_b [m/s]	22	20	1.29	28.39	0.13	1.024	0.543
ρ [kg/m ³]	1.25	26.7	1.34	29.47	0.13	1.024	0.543
$z_{0,II}$ [m]	0.05	30	1.36	29.90	0.12	1.047	0.559
k_r	0.1698	40	1.41	30.98	0.12	1.106	0.600
k_I	1	50	1.45	31.81	0.12	1.152	0.632
c_0	1	60	1.48	32.49	0.11	1.191	0.660
ρ [kg/m ³]	1.25	70	1.50	33.07	0.11	1.224	0.683
σ_v [m/s]	3.735	73.3	1.51	33.24	0.11	1.302	0.739
b [m]	26.7	80	1.53	33.56	0.11	1.302	0.739
d [m]	42	90	1.55	34.00	0.11	1.302	0.739
h [m]	100	100	1.56	34.40	0.11	1.302	0.739

*=Puuskanopeuspaineet on laskettu eurokoodin kuvan 7.4 mukaisilla nopeuspaine korkeuksilla

LIITE E 2(6)

Taulukko E.2. Taulukossa on esitetty rosoisuuskerroin, tuulennopeuden modifioitu perusarvo, tuulenpuuskien intensiteetti, nopeuspaine ja puuskanopeuspaine eri korkeuksilla, kun tuulee rakennuksen lyhyen sivun suuntaisesti (x-akselin suuntaisesti). Taulukossa on esitetty kaksi nopeuspaineen arvoa: q_{pm} on nopeuspaine, jota käytetään staattisten tuulikuormien määrittämiseen, ja q_p on puuskanopeuspaine, jota käytetään kvasistaattisten kuormien laskemiseen.

		z[m]	c_r	v_m [m/s]	I_v [m/s]	q_p [kN/m ²]*	q_{pm} [kN/m ²]*
Maastoluokka III	I	0	0.78	17.20	0.22	1.116	0.607
z_0 [m]	0.01	5	1.05	23.21	0.16	1.116	0.607
z_{min} [m]	1	10	1.17	25.80	0.14	1.116	0.607
v_b [m/s]	22	20	1.29	28.39	0.13	1.116	0.607
ρ [kg/m ³]	1.25	30	1.36	29.90	0.12	1.116	0.607
$z_{0,II}$ [m]	0.05	40	1.41	30.98	0.12	1.116	0.607
k_r	0.1698	42	1.42	31.16	0.12	1.116	0.607
k_l	1	50	1.45	31.81	0.12	1.152	0.632
c_0	1	58	1.47	32.36	0.12	1.302	0.739
ρ [kg/m ³]	1.25	60	1.48	32.49	0.11	1.302	0.739
σ_v [m/s]	3.735	70	1.50	33.07	0.11	1.302	0.739
d [m]	26.7	80	1.53	33.56	0.11	1.302	0.739
b [m]	42	90	1.55	34.00	0.11	1.302	0.739
h [m]	100	100	1.56	34.40	0.11	1.302	0.739

*=Puuskanopeuspaineet on laskettu eurokoodin kuvan 7.4 mukaisilla nopeuspainekorkeuksilla

Taulukoissa E.4 ja E.5 on esitetty rakennukseen kohdistuvat staattiset tuulikuormat ja staattisten tuulikuormien aiheuttamat kokonaismomentit. Tuulikuormat on laskettu käyttäen taulukon E.3 parametreja.

LIITE E 3(6)

Taulukko E.3. Rakennuksen staattisten ja kvasistaattisten tuulikuormien määrittämiseen tarvittavien parametrien arvot.

	Tuulee y-akselin suuntaisesti	Tuulee x-akselin suuntaisesti
c_{f0}	1,85	2,40
ψ_r	1,00	1,00
λ	5,24	3,33
ψ_λ	0,68	0,65
c_f	1,26	1,56
z_s [m]	60	60
$v_m(z_s)$ [m]	27,76	27,76
$I_v(z_s)$	0,115	0,115
$L(z_s)$ [m]	176,7	176,7
B^2	0,58	0,56
c_s	0,893	0,88
c_d	1,00	1,00
$c_s c_d$	0,893	0,88
c_{pe}	1,304	1,406
γ_e	0,902	0,953

Taulukko E.4. Rakennukseen kohdistuvat staattiset tuulikuormat, kun tuulee pitkän sivun suuntaisesti. Staattiset tuulikuormat on laskettu taulukkoon sekä voima- että painekertoimien avulla.

Tuulee pitkän sivun suuntaisesti (y-akselin suuntaisesti)			
Tarkasteluväli[m]	q_{pm} [kN/m ²]	tuulikuorma [kN] (voimakertoimilla laskettuna), $F_w = q_{pm} c_f c_s c_d A$	tuulikuorma [kN] (painekertoimilla laskettuna), $F_w = \varphi_e (q_{pm} \gamma_e c_s c_d A) + F_{w,i} + F_{fr}$
0-26,7 (b)	0,543	435	406
26,7 (b)-30	0,559	55	52
30-40	0,600	180	168
40-50	0,632	190	177
50-60	0,660	198	185
60-70	0,683	205	192
70-73,3 (h-b)	0,689	68	64
73,3 (h-b)-100 (h)	0,739	592	553
Yhteensä		1923	1797
Kuormaresultantin sijaintikorkeus [m]		53,369	53,369
Kokonaismomentti [MNm]		103	96

LIITE E 4(6)

Taulukko E.5. Rakennukseen kohdistuvat staattiset tuulikuormat, kun tuulee lyhyen sivun suuntaisesti. Staattiset tuulikuormat on laskettu taulukkoon sekä voima- että painekertoimien avulla.

Tuulee lyhyen sivun suuntaisesti (x-akselin suuntaisesti)			
Tarkasteluväli[m]	q_{pm} [kN/m ²]	tuulikuorma [kN] (voimakertoimilla laskettuna), $F_w = q_{pm}c_f c_s c_d A$	tuulikuorma [kN] (painekertoimilla laskettuna), $F_w = \varphi_e (q_{pm}\gamma_e c_s c_d A) + F_{w,i} + F_{fr}$
0-42 (d)	0,607	1483	1273
42 (d)-50	0,632	294	253
50-58 (h-d)	0,656	305	262
58 (h-d)-100 (h)	0,739	1807	1552
Yhteensä		3888	3339
Kuormaresultantin sijaintikorkeus [m]		52,43	52,43
Kokonaismomentti [MNm]		204	175

Taulukoissa E.6 ja E.7 on esitetty kvasistaattiset tuulikuormat ja niiden aiheuttamat kokonaismomentit, jotka on laskettu tuulenpaineiden avulla. Tuulikuormat on laskettu käyttäen taulukon E.3 parametreja.

Taulukko E.6. Rakennukseen kohdistuvat kvasistaattiset tuulikuormat ja niiden aiheuttamat momentit, kun tuulee pitkän sivun suuntaisesti. Kvasistaattiset tuulikuormat on laskettu taulukkoon sekä voima- että painekertoimien avulla.

Tuulee pitkän sivun suuntaisesti (y-akselin suuntaisesti)			
Tarkasteluväli[m]	q_p [kN/m ²]	tuulikuorma [kN] (voimakertoimilla laskettuna), $F_w = q_p c_f c_s c_d A$	tuulikuorma [kN] (painekertoimilla laskettuna), $F_w = \varphi_e (q_p \gamma_e c_s c_d A) + F_{w,i} + F_{fr}$
0-26,7 (b)	1,024	820	766
26,7 (b)-30	1,047	104	97
30-40	1,106	332	310
40-50	1,152	346	323
50-60	1,191	347	334
60-70	1,224	367	343
70-73,3 (h-b)	1,233	122	114
73,3 (h-b)-100 (h)	1,302	1042	974
Yhteensä		3490	3261
Kuormaresultantin sijaintikorkeus [m]		52,616	52,616
Kokonaismomentti [MNm]		184	172

LIITE E 5(6)

Taulukko E.7. Rakennukseen kohdistuvat kvasistaattiset tuulikuormat ja niiden aiheuttamat momentit, kun tuulee lyhyen sivun suuntaisesti. Kvasistaattiset tuulikuormat on laskettu taulukkoon sekä voima- että painekertoimien avulla.

Tuulee lyhyen sivun suuntaisesti (x-akselin suuntaisesti)			
Tarkasteluväli[m]	q_{pm} [kN/m ²]	tuulikuorma [kN] (voimakertoimilla laskettuna), $F_w = q_p c_f c_s c_d A$	tuulikuorma [kN] (painekertoimilla laskettuna), $F_w = \varphi_e (q_p \gamma_e c_s c_d A) + F_{w,i} + F_{fr}$
0-42 (d)	1,116	2798	2403
42 (d)-50	1,152	536	460
50-58 (h-d)	1,183	551	473
58 (h-d)-100 (h)	1,302	3180	2731
Yhteensä		7065	6067
Kuormaresultantin sijaintikorkeus [m]		51,577	51,577
Kokonaismomentti [MNm]		364	313

Eurokoodissa on annettu myös ohjeet, joiden avulla rakennuksen tuulensuuntaiset kiihtyvyydet σ_a voidaan laskea. Eurokoodin ohjeet pätevät vain ensimmäiselle tuulensuuntaiselle ominaismuodolle, joten eurokoodin tuloksia voidaan vertailla tuulutunnelista saataviin tuloksiin ainoastaan rakennuksen 1. ja 2. ominaismuodon suhteen. Eurokoodin mukaiset kiihtyvyyksien määrittämiseen tarvittavien parametrien arvot sekä rakennuksen kiihtyvyydet on esitetty taulukossa E.8. Taulukossa on esitetty kahdet eri kiihtyvyyden arvot kumpaankin suuntaan. Ensimmäiset kiihtyvyydet on laskettu käyttäen eurokoodin antamaa ominaistajuutta (0,46 Hz ja 0,46 Hz) ja toiset kiihtyvyydet on laskettu laskentaohjelmasta saatujen taajuuksien (0,316 Hz ja 0,424 Hz) avulla.

LIITE E 6(6)

Taulukko E.8. Rakennuksen kiihtyvyyksien määrittämiseen tarvittavien parametrien arvot sekä rakennuksen kiihtyvyydet laskettuna eurokoodin mukaan. Taulukossa on esitetty kahdet eri tulokset: eurokoodin ominaistaajuudella laskettuna ja Staad-ohjelmalla saaduilla ominaistaajuuksilla laskettuna.

	Tuulee y- akselin suuntaisesti (taajuudet eurokoodista)	Tuulee y-akselin suuntaisesti (taajuudet laskettu Staadilla)	Tuulee x- akselin suuntaisesti (taajuudet eurokoodista)	Tuulee x-akselin suuntaisesti (taajuudet laskettu Staadilla)
b [m]	26,7	26,7	42,0	42,0
d [m]	42,0	42,0	26,7	26,7
h [m]	100	100	100	100
v_{b0} [m/s]	22	22	22	22
v_b [m/s]	18,80	18,80	18,799	18,80
c_{f0}	1,85	1,85	2,40	2,40
ψ_r	1,00	1,00	1,00	1,00
λ	5,24	5,24	3,33	3,33
ψ_λ	0,68	0,68	0,65	0,65
c_f	1,26	1,26	1,56	1,56
z_s [m]	60	60	60	60
$c_r(z_s)$	1,48	1,48	1,48	1,48
c_{prob}	0,855	0,855	0,855	0,855
$v_m(z_s)$ [m]	27,76	27,76	27,76	27,76
$I_v(z_s)$	0,115	0,115	0,115	0,115
$L(z_s)$ [m]	176,7	176,7	176,7	176,7
n_1 [Hz]	0,460	0,316	0,460	0,424
f_L	2,927	2,011	2,927	2,698
S_L	0,066	0,082	0,066	0,069
m_e [kg/m]	286800	286800	286800	286800
η_h	7,622	5,236	7,622	7,025
η_b	2,035	1,398	3,201	2,951
R_h	0,123	0,173	0,123	0,132
R_b	0,373	0,475	0,264	0,282
δ_s	0,100	0,100	0,100	0,100
δ_d	0,000	0,000	0,000	0,000
δ_a	0,004	0,006	0,005	0,006
δ	0,104	0,106	0,105	0,106
R^2	0,142	0,313	0,099	0,120
K_x	1,51	1,51	1,51	1,51
σ_a [m/s ²]	0,0074	0,011	0,012	0,013