

Korkean rakennuksen tuulivärähtelyjen vaimennus

Eurokoodiseminaari 2025

DI Camilla Lipponen, Computational Designer, Sweco Finland Oy

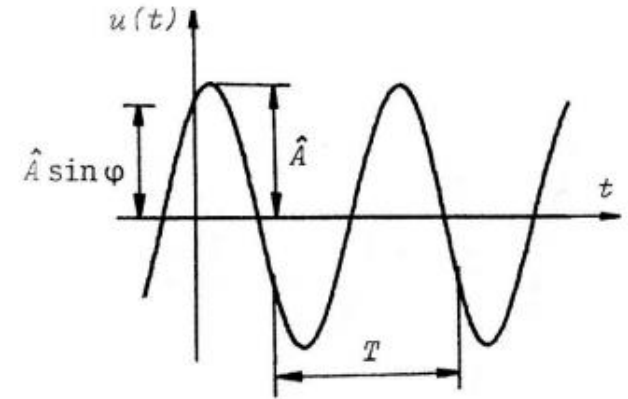
Sisältö

1. Tuulivärähtely rakennuksissa
 1. Värähtelyn perusteet
 2. Värähtelyn vaimennus
 3. Rakennuksen vaste värähtelyyn
 4. Tuulen aiheuttama värähtely
 5. Värähtelyn aistiminen
2. Standardien ohjeistus tuulen aiheuttamaan värähtelyyn
 1. Eurokoodi
 2. ISO
 3. Muita standardeja
3. Tekniset ratkaisut rakennuksen tuulivärähtelyn rajoittamiseen
 1. Ratkaisut ilman lisävaimenninta
 2. Aerodynaaminen optimointi
 3. Massavaimentimet
 4. Nestevaimentimet

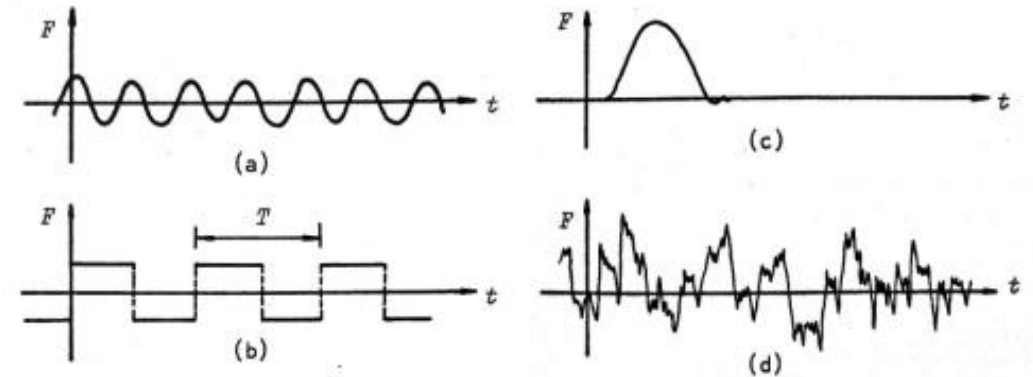
Tuulivärähtely rakennuksissa

Värähtelyn perusteet

- Värähtely on systeemin määrätyn ajan kuluttua toistuvaa liikettä tasapainoasemansa ympärillä
- Värähtelyä kuvataan yleensä **siirtymäaikakuviolla**, ja siitä voidaan ratkaista esimerkiksi systeemin **värähdysaika** ja **taajuus**
- **Herätteet** = systeemiin kohdistuvia pakkovoimia ja herätteet aiheuttavat systeemiin **vasteen**, eli reaktion
- Värähtely voi olla **jaksollista** tai **jaksotonta**, **determinististä** tai **epä-determinististä**
 - Harmoninen värähtely (a)
 - Epäharmonien jaksollinen värähtely (b)
 - Deterministinen jaksollinen värähtely (c)
 - Epädeterministinen jaksoton värähtely (d)
- **Ominaisvärähtely** = systeemin vapaata värähtelyä sille ominaisilla **ominaisvärähtelytaajuuksilla**
- **Resonanssi** = systeemiin kohdistuu ominaistaajuutta lähellä oleva heräte, värähtely voi voimistua



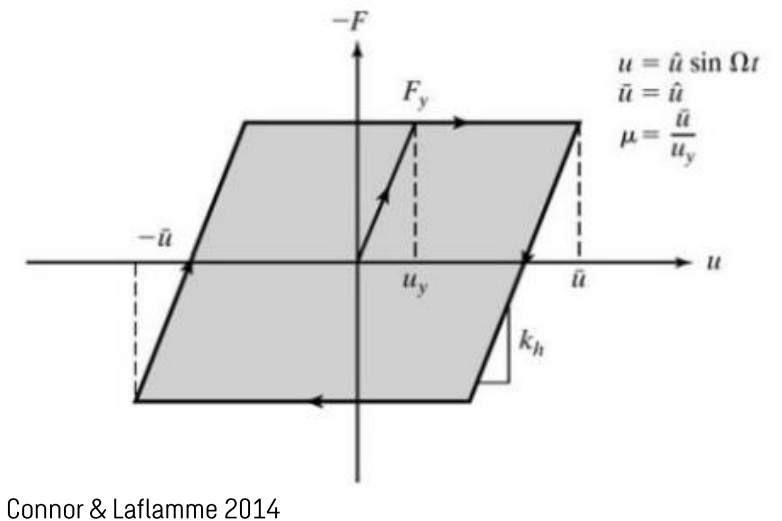
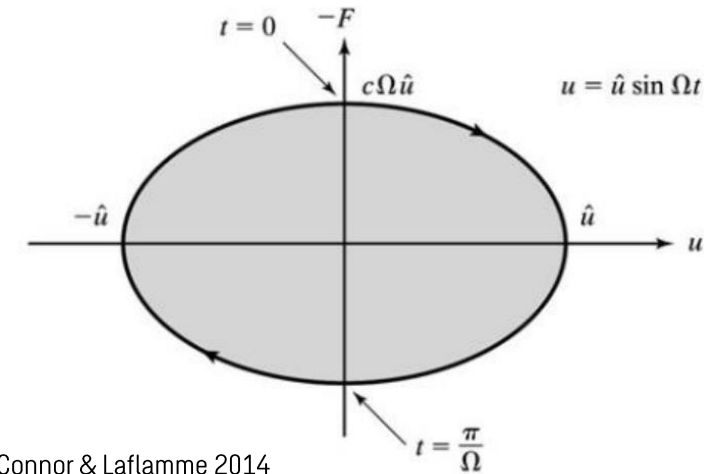
Salmi & Virtanen, 2006



Salmi & Virtanen, 2006

Värähtelyn vaimennus

- Värähtely voi olla **vaimentamatonta** tai **vaimennettua**
- Vaimennus voi olla mm. viskoosista, coulombista, tai viskoelastista vaimennusta, hystereesi- tai Rayleigh'n vaimennusta
- **Viskoosivaimennus** = väliaineen kitkaa
 - Verrannollinen nopeuteen
 - Vastakkaismerkkinen siirtymän suuntaan
 - Helppo käsitellä, ja voidaan käyttää vaikka vaimennus ei tarkalleen olisi viskoosista
- **Hystereesivaimennus** = rakenteen sisäinen vaimennus
 - Materiaalin venymän kasvaessa sen jännitys on suurempi kuin palautuessa
 - Myös kimmoisalla alueella



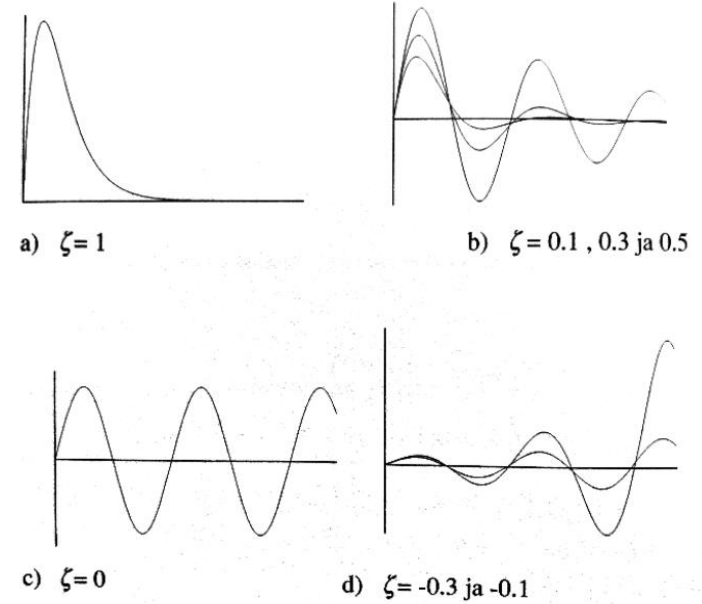
Värähtelyn vaimennus

- **Suhteellinen vaimennus** = vaimennuksen suhde **kriittiseen vaimennukseen**

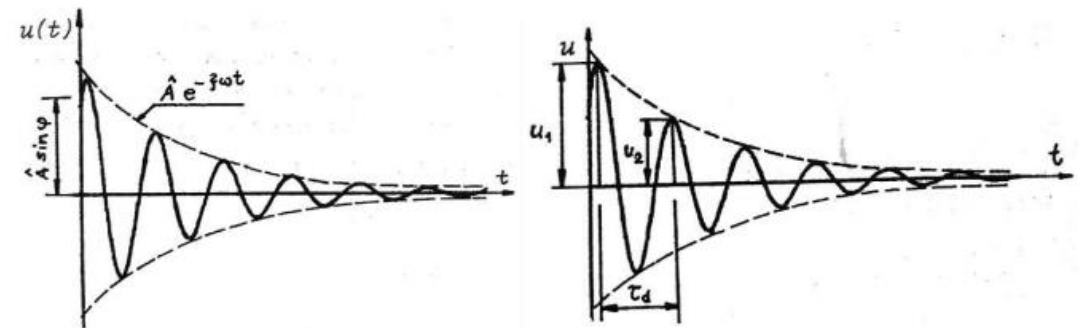
$$\zeta = \frac{c}{c_k} = \frac{c}{2m\omega}$$

- Välillä 0...1, mistä **vaimennussuhde** saadaan muuttamalla prosenteiksi
- Ylikriittinen kun $\zeta > 1$, kriittinen kun $\zeta = 1$ ja alikriittinen kun $\zeta < 1$
- Voi olla myös negatiivinen
- **Logaritminen degrementti** = kahden sivuamis pisteen (siirtymän) suhteen luonnollinen logaritmi
- Vaimennuksen suuruus

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x_0}{x_n}$$



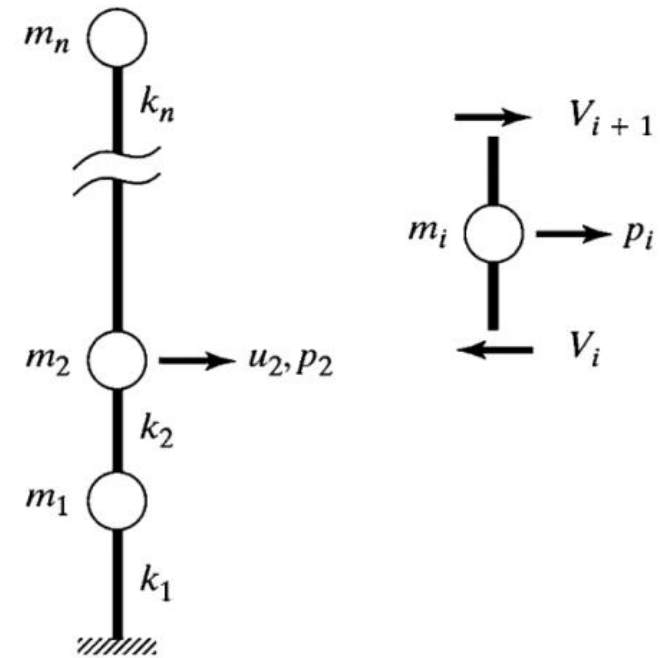
Connor & Laflamme 2014



Salmi & Virtanen 2006

Rakennuksen vaste värähtelyyn

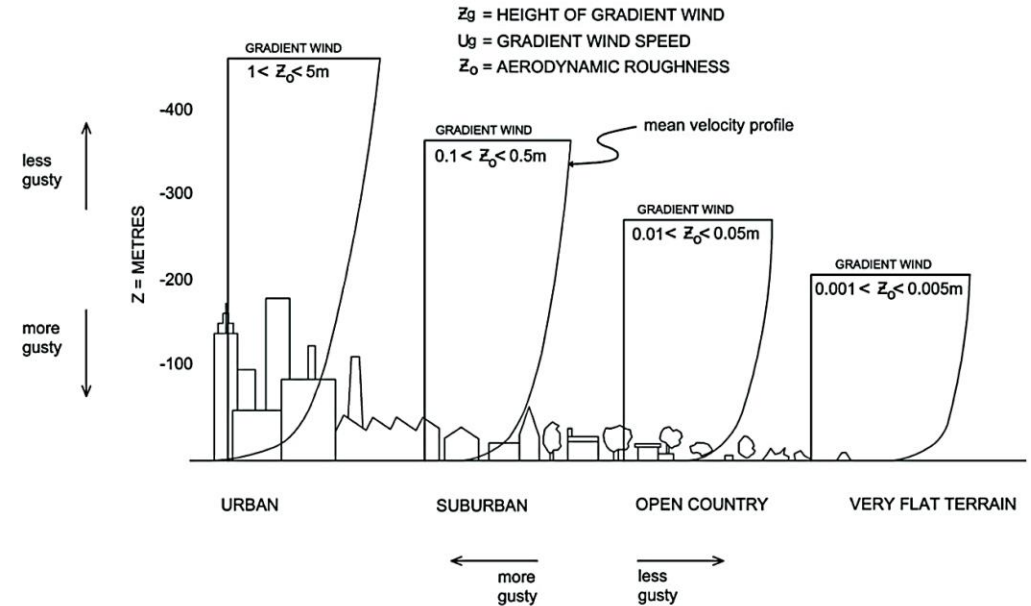
- Koko rakennuksen kannalta merkittävämpiä värähtelyn lähteitä ovat tuuli ja maanjäristykset
- Värähtelystä on haittaa rakenteille ja käyttäjille
- Korkean rakennuksen käyttäytymiseen vaikuttaa mm. rakennuksen ympäristö, muoto, korkeus, hoikkuus, massa, jäykkyys ja vaimennus
- Tuulen aiheuttama liike on jaettavissa kahteen pääsuuntaan ja vääntöön
- **Hoikkuudella** merkittävä vaikutus käyttäytymiseen
$$\text{hoikkuussuhde} = \frac{H}{b}$$
- Rakennuksen korkeus vaikuttaa myös taajuuteen
 - Korkeilla rakennuksilla matalampi taajuus→ Resonanssi mahdollista tuulen taajuuden kanssa
- Rakennuksen käyttäytymistä voidaan mallintaa leikkauspalkkina n-vapausasteen massa-leikkausjousi-systeeminä



Connor & Laflamme 2014

Tuulen aiheuttama värähtely

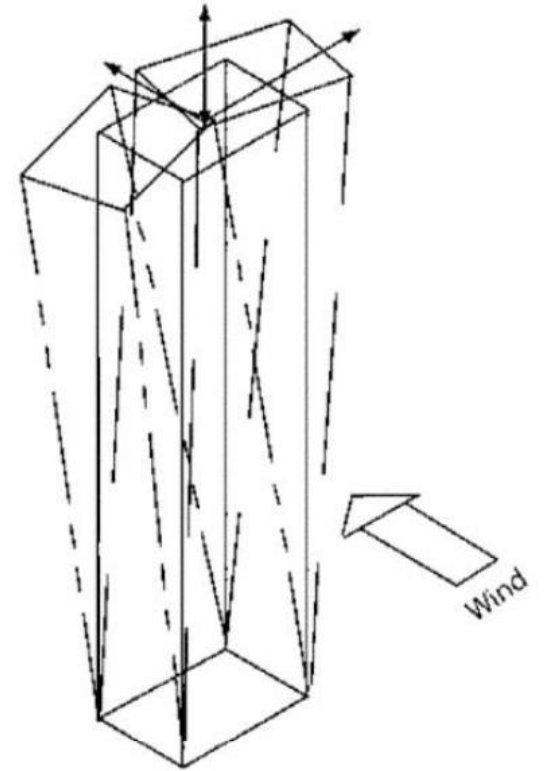
- Rakennusten tuulikuormitukseen vaikuttaa eniten maanpinnan läheisyydessä kitkasta muodostuvat ilman liikkeet
- Maanpinnan epätasaisuus vaikuttaa
 - Hidastaa tuulta lähellä maanpintaa
 - Sekoittaa ilmavirtauksia (puuskia ja turbulenssia)
- Keskimääräinen tuulen nopeus pidemmällä ajanjaksolla yleensä kasvaa korkeuden myötä, kun taas puuskaisuus yleensä vähenee korkeuden kasvaessa
- Tuuli-ilmiöt lisäävät dynaamista käyttäytymistä
 - **Pyörreratailmiö** (vortex shedding)
 - **Ilman väpättäminen** (buffeting)
 - **Laukka** (galloping)
 - **Lukkiutuminen** (lock-in)
 - **Flutteri** (flutter)



Cochran & Derickson 2005

Värähtelyn aistiminen

- Korkean rakennuksen tuulivärähtelyn liikkeet koostuvat huojunnasta pääsuuntaan ja väännöstä
 - Jaettavissa translaatioliikkeiksi joka lattiapinnalla
- Värähtely aistitaan lattiapinnan kiihtyvyydestä tai sen muutoksesta, tai visuaalisista havainnoista
 - Kiihtyvyys on tarkimmin mitattavissa oleva suure
- Värähtely saattaa aiheuttaa
 - Pelkoa ja levottomuutta
 - Epämukavaa oloa, keskittymisvaikeuksia, huimausta, migreeniä ja pahoinvointia (pitkäkestoisena)
- Havaittavuus voi vaihdella yksilöittäin, mutta karkeasti (Kwok. et al. 2015)
 - 5 mg huomattavissa
 - 10 mg mukavuusraja
 - 40 mg turvallisuusraja



ASCE 2012

Standardien ohjeistus tuulen aiheuttamaan värähtelyyn

Eurokoodi

- Kokonaisvaimennuksen logaritminen degrementti määritetään kaavalla

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

- Sisäinen vaimennus teräsrakennuksille 0,05 ja teräsbetonirakennuksille 0,10
- Eurokoodin SFS-EN 1991-1-4 kohdan B.4 mukaan pystyrakenteeseen korkeudella z syntyvän tuulen suuntainen huippukiihtyvyyden ominaisarvo saadaan

$$a_{max} = k_p \sigma_{a,x}$$

$$k_p = \max \left\{ \frac{\sqrt{2 \ln(n_{1,x} T)} + 0,6}{3} \right.$$

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

- Tuulta kohtisuoraan suuntaan olevaa kiihtyvyyttä tai vääntöä ei ole tämän hetken eurokoodissa
- Eurokoodin SFS-EN 1990 kohdan 3.4 ja A.1.4.4 mukaan värähtelyt, jotka aistitaan epämukaviksi, haittaavat rakenteen toimivuutta tai aiheuttavat vauriota, on otettava huomioon käyttörajatilamitoituksessa

→ Tarkkaa rajaa ei anneta

$\delta \approx 2\pi\zeta$, vaimennuksen ollessa pieni

ISO -standardit

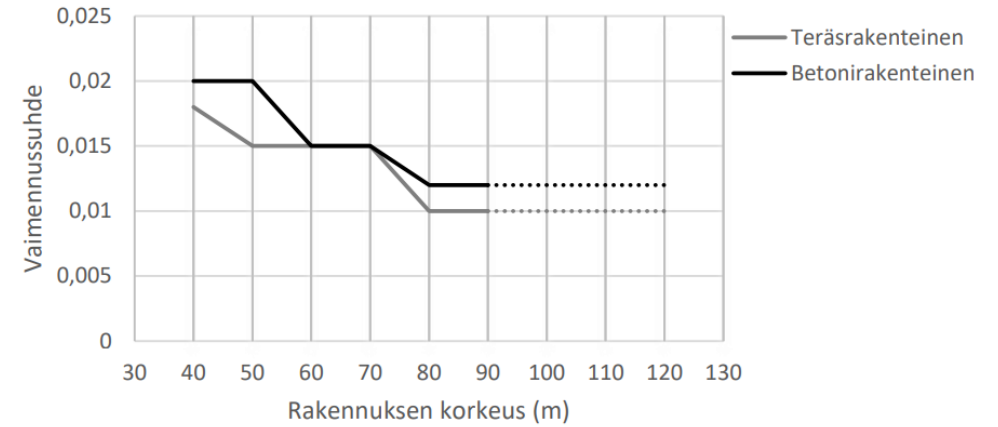
- Standardin ISO 4354:2009 mukaan sisäinen vaimennus on teräsrakennukselle 1 % ja betonirakennukselle 1,2 %, $h > 80$ m
- Standardin ISO 4354:2009 kohdan E.5 mukaan saadaan määriteltyä huippukiihtyvyys tuulen suuntaan x_D , tuulta kohtisuoraan suuntaan x_L ja väännölle θ_T kaavalla

$$\bar{x}_D = (2\pi f_D)^2 \frac{2g_D I_{vh} R_D}{1 + 2g_D I_{vh} \sqrt{B_D^2 + R_D^2}} x_D$$

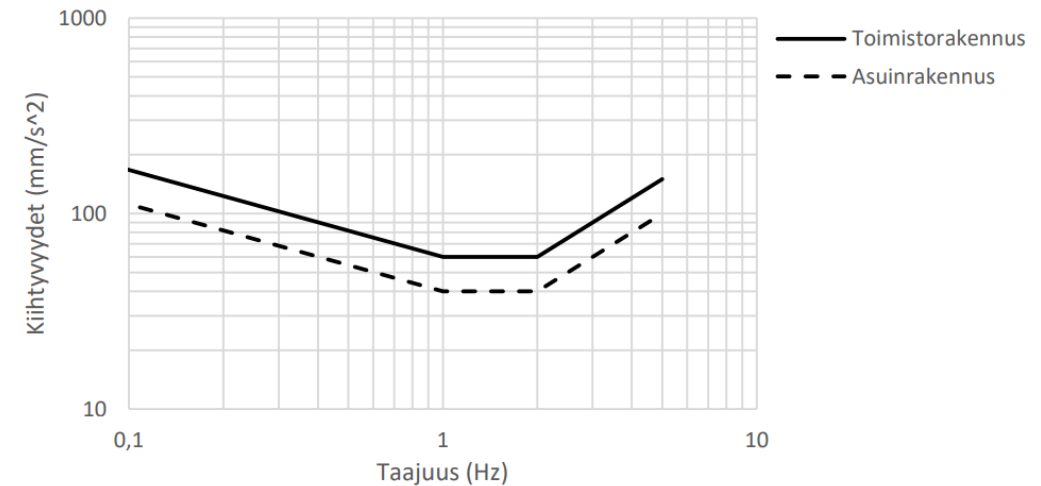
$$\bar{x}_L = (2\pi f_L)^2 \frac{R_L}{\sqrt{1 + R_L^2}} x_L$$

$$\bar{\theta}_T = (2\pi f_T)^2 \frac{R_T}{\sqrt{1 + R_T^2}} \theta_T$$

- Standardin ISO 10137:2007 mukaiset kiihtyvyyksirajat vuoden toistumisjaksolla alemmassa kuvaajassa



Lipponen 2024



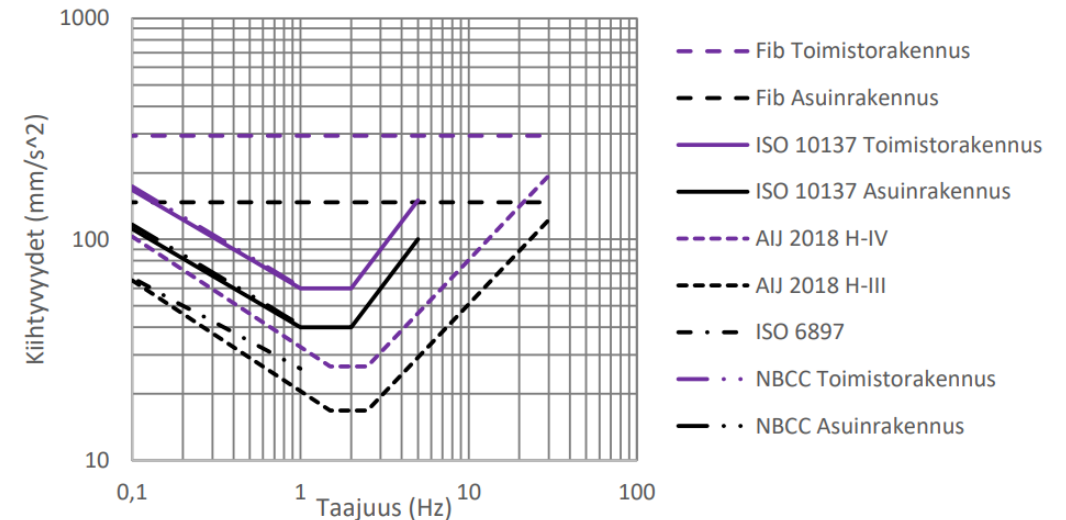
Lipponen 2024

Muita standardeja

- Isoin ero puuskanopeuspaineen määrittämisessä standardien kesken on tuulen nopeuden määrittäminen
- Tuulta mitataan joko 3 sekunnin, 10 minuutin tai 1 tunnin keskiarvona
- 1, 50, 100 tai 300 vuoden toistumisjaksolla
- Tuulensuuntainen kiihtyvyys määritetään useissa standardeissa hyvin samalla tavoin
- Kuitenkin vain ISO-, NBCC- ja AIJ-standardien avulla voi määrittää myös tuulta kohtisuoran ja vääntösuunnan kiihtyvyyden
- Kiihtyvyyden rajat noudattelevat melko samanlaista kulmakerrointa alle 1 Hz taajuuksilla, Fibin suosituksia lukuun ottamatta
- Standardeista AIJ:n suositukset ovat tiukimpia

Standardi	Mittauskeskiarvoaika	Toistumisjakso
Eurokoodi SFS-EN 1991-1-4	10 min	50 a
ISO 4354:2009	3 s	1 a
AIJ	10 min	100 a
ASCE 7-22	3 s	300 a
NBCC 2020	1 h	50 a

Lipponen 2024

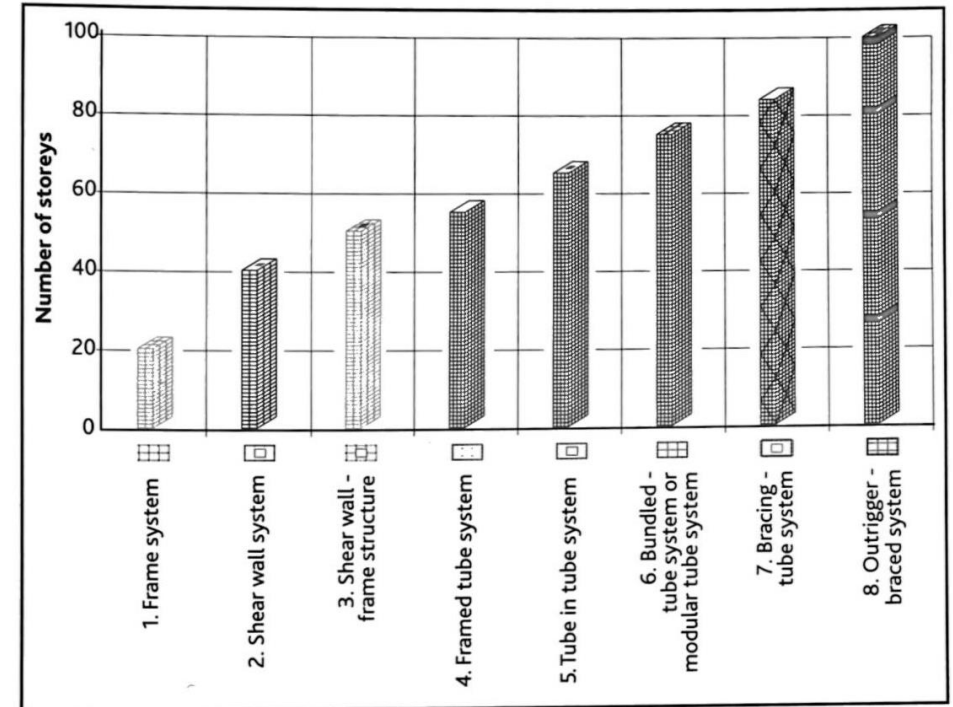


Lipponen 2024

Tekniset ratkaisut rakennuksen tuulivärähtelyn rajoittamiseen

Ratkaisut ilman lisävaimenninta

- Rakennuksen tuulivärähtelyä voidaan rajoittaa useilla teknisillä ratkaisuilla kuten lisäämällä
 - Rakenteellista vaimennusta, joka muodostuu mm.
 - Rungosta
 - Rakenteiden materiaalin sisäisestä vaimennuksesta
 - Kitkasta rajapinnoissa ja liitoksissa
 - Toissijaisista rakenteista, julkisivumateriaaleista
 - Rakennuksen jäykkyyttä
 - Jäykistävien rakenteiden dimensioiden ja massan kasvatus
 - **Kehä- ja ydinkuilujärjestelmät**
 - **Tube-järjestelmät**
 - **Outrigger, belt truss ja buttres core –järjestelmät**



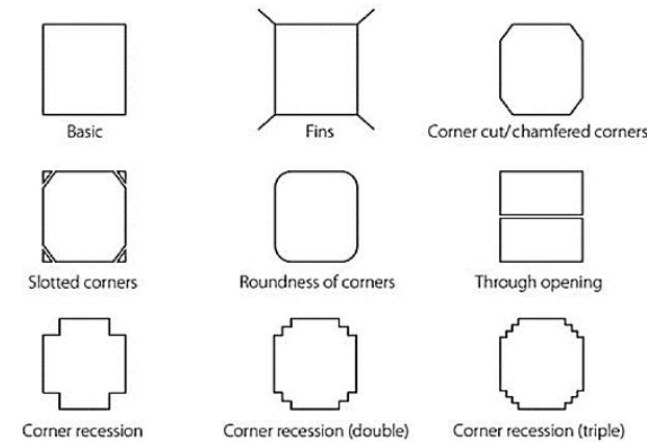
Fib. 2014

Aerodynaaminen optimointi

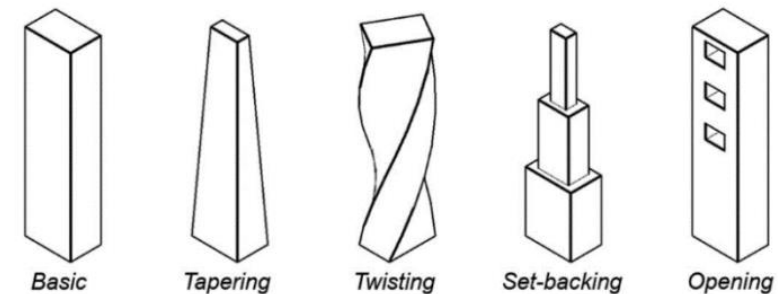
- Pohjageometrian muokkaus
 - Pyöristykset
 - Uritukset
 - Loveukset
 - Ilmanohjaimet

→ Vähentää merkittävästi tuulen suuntaisia ja poikittaisia kuormituksia
- Vertikaaligeometria
 - Kiertäminen
 - Kaventaminen huipusta
 - Aukotukset

→ Suurempi vaikutus, vähentää kaatomomenttia tuulen poikittaissuunnassa merkittävästi
- Lisäksi voi muuttaa rakennuksen orientaatiota optimaalisimmaksi suhteessa päätuulensuuntaan



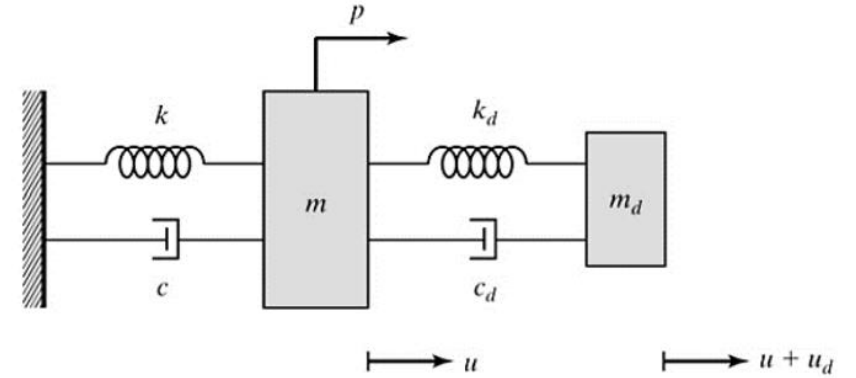
Lago et al. 2019



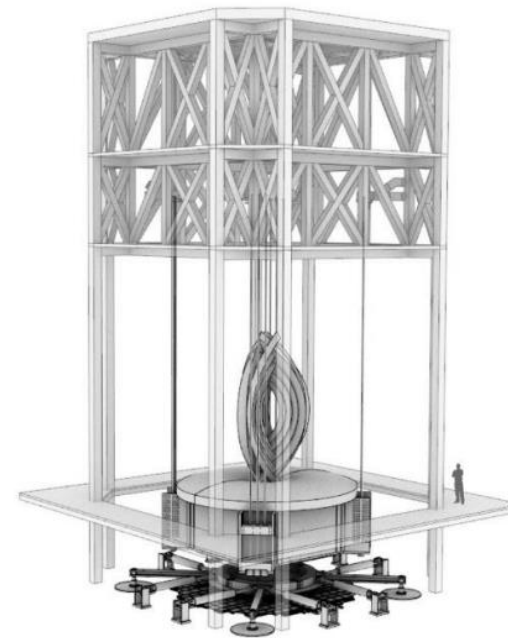
Elshaer & Bitsuamlak 2018

Massavaimentimet (Tuned mass damper)

- Koostuu massasta, jousesta ja tyypillisesti viskoosivaimentimesta
- Sijoitetaan usein rakennuksen ylimpiin kerroksiin
- Viritetty tiettyyn rakenteelliseen ominaistaajuuteen, jotta kun rakennus värähtelee kyseisellä taajuudella, vaimennin resonoi liikkeen kanssa
 - Massan hitauden takia vaimentimen liike tapahtuu kuitenkin eri jaksolla rakenteen kanssa
- Värähtelystä dissipoituu liikeenergiaa vaimentimen inertian, eli hitausvoiman vaikuttaessa rakenteeseen
- Tehokkuus riippuvainen massan suuruudesta
 - Yleensä noin 0,25–1,0 % rakennuksen kokonaispainosta sen ensimmäisessä värähtelymuodossa
- Viritetyistä massavaimentimista on olemassa useita variaatioita mm.
 - Kytkeytyt viritetyt massavaimentimet
 - Heiluri massavaimentimet
 - Rotaatioinertiamassavaimentimet



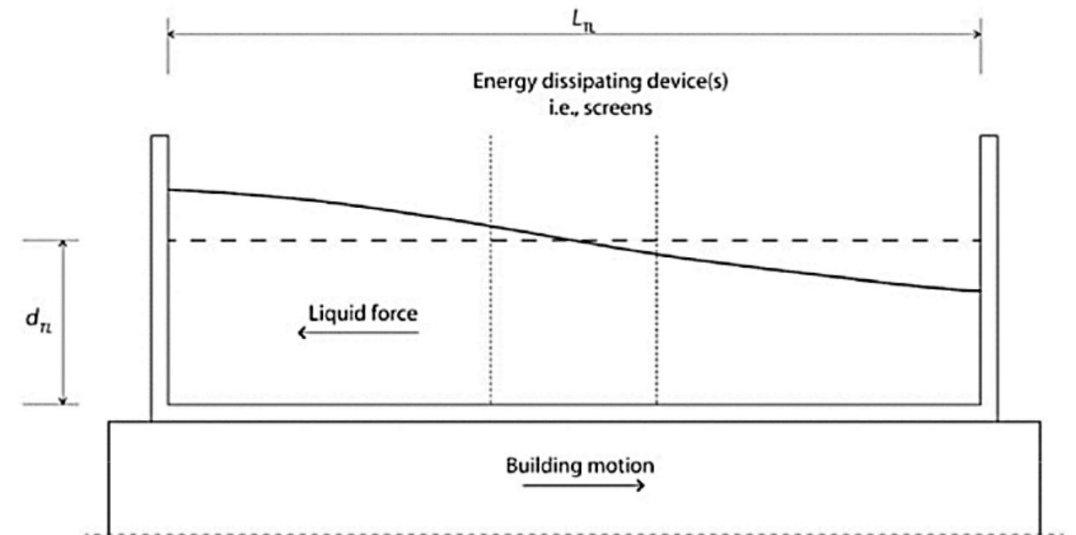
Connor & Laflamme 2014



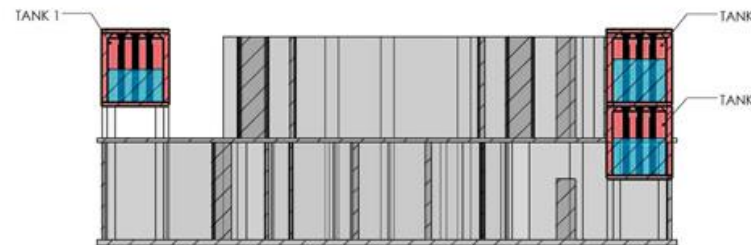
Haskett & Smith 2017

Nestevaimentimet (Tuned liquid damper)

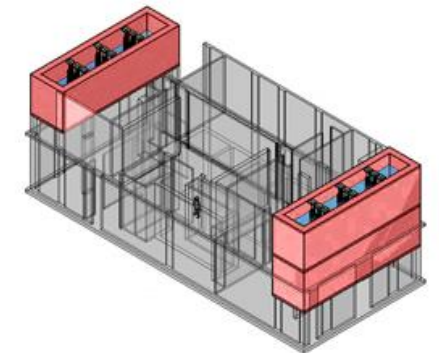
- Koostuu säiliöstä joka on osittain täytetty nesteellä, usein vedellä
 - Neste toimii massana ja painovoima palauttavana jousivoimana
 - Toimivat TMD kaltaisesti
- Tyypillisesti sijoitetaan myös rakennuksen yläkerrokseen, mutta mahdollista myös muualle
- Viritetään myös rakennuksen ominaistajuuteen
- Liike-energian dissipaatio tapahtuu nesteen aaltoilun myötä
 - Lisätään ritilöillä ja karhennetulla pinnalla
- Voidaan asentaa yksi suuri tai useita pieniä
- Edut verrattuna massavaimentimeen
 - Edullisuus
 - Lyhyempi aikataulu
 - Vähäinen huoltotarve
 - Helppo viritettävyyys
 - Mahdollisuus suunnitella vesisäiliönä palotilanteita varten



Lago et al. 2019



Motioneering 2023



Kuvalähteet

ASCE. (2012). Wind Issues in the Design of Buildings. Structural Wind Engineering Committee. Technical Council on Wind Engineering. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Cochran, L., & Derickson, R. (2005). Low-rise Buildings and Architectural Aerodynamics. Architectural Science Review, 48(3), 265–276.
<https://doi.org/10.3763/asre.2005.4833>

Connor, J., & Laflamme, S. (2014). Structural Motion Engineering. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06281-5>

Elshaer, A., & Bitsuamlak, G. (2018). Multiobjective Aerodynamic Optimization of Tall Building Openings for Wind-Induced Load Reduction. Saatavissa: <https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0002199>

Fib. (2014). Tall Buildings—Structural design of concrete buildings up to 300 m tall. International Federation of Structural Concrete.

Haskett, T., & Smith, A. (2017). Feeling at Home in the Clouds. Structure Magazine, National Council of Structural Engineers Associations NCSEA, 2017(12). Saatavissa: https://www.structuremag.org/?page_id=17222

Kwok, K. C. S., Burton, M. D., & Abdelrazaq, A. K. (2015). Wind-Induced Motion of Tall Buildings: Designing for Habitability. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784413852>

Lago, A., Trabucco, D., & Wood, A. (2019). Damping Technologies for Tall Buildings—Theory, Design Guidance and Case Studies. Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier. Saatavissa: https://app-knovel-com.libproxy.tuni.fi/web/view/pdf/show.v/rcid:kpDTTBTdG1/cid:kt011PVKX2/viewerType:pdf//root_slug:title-page/url_slug:front-matter?cid=kt011PVKX2

Lipponen, C. (2024) Värähtelyn vaimentaminen korkeissa rakennuksissa. Tampereen yliopisto. Diplomityö. Saatavilla: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/158964>

Motioneering. (2023). How Multiple Tuned Sloshing Dampers Work & Why You Should Care. Saatavissa: <https://www.motioneering.ca/post/how-multiple-tuned-sloshing-dampers-work-and-why-you-should-care>

Salmi, T., & Virtanen, S. (2006). Dynamiikka. Pressus Oy

