

- Antique High-rise
- To Day High-rise
- Basis of Design
- Wind loads
- Dynamics
- Vibration
- Lateral Stiffness
- Tuned mass damp
- Kalasatama

**Aaro Kohonen**  
FMC GROUP

## Korkeitten rakennusten rakennesuunnittelunäkökohtia

Structural Design Points of High-Rise Buildings

- Antiikin High-rise
- High-rise tänään
- Suunnitt.perust.
- Tuulikuormitus
- Dynamiikkaa
- Värähtely
- Jäykistystapoja
- Heilurivaimennus
- Kalasatama



DI Teuvo Meriläinen

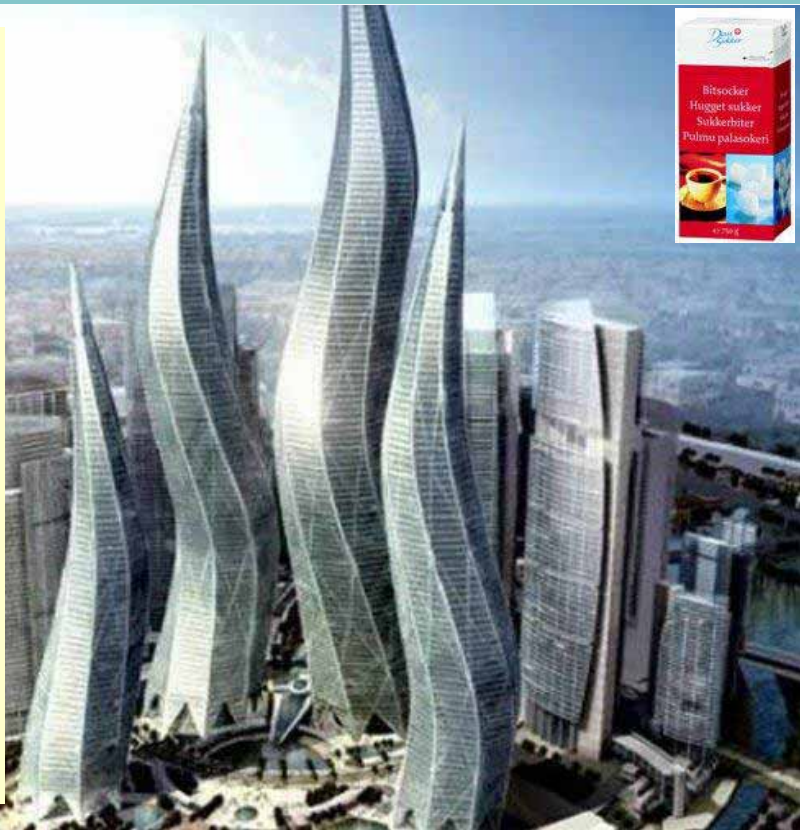
17.11.2011

### Basis of Architectural and Structural Design of High-rise Buildings

Korkeitten rakennusten suunnittelua eivät enää kahlehti "sokeritoppa"-mallit.

Suunnittelu kehittynyt:

- FEM-laskenta
- 3D-suunnittelu
- Tuulitunnelikokeet
- Aerodynaaminen muotoilu tärkeä
- Korkealujuuksiset materiaalit
- "Rajaton" korkeuden tavoittelu
- Maanjäristys- / tai-fuunikestävyys
- Wau-arkkitehtuuri
- Vaativat paljon suunnittelutyötä



## Two of Antique seven Miracles are High-rise Buildings



**Kheopsin pyramidi, Giza 146 m, v 2400 eKr. Käyttöikä n. 4400 v, jatkuu edelleen!**



**Faroksen majakka, Aleksandria 120 m, v 200 eKr. Käyttöikä n 1400 v, tuhoutui maanjäristyksessä v. 1200.**

## Kerros määrän kasvu Amerikan pilvenpiirtäjissä aikana 1850 ... 1930

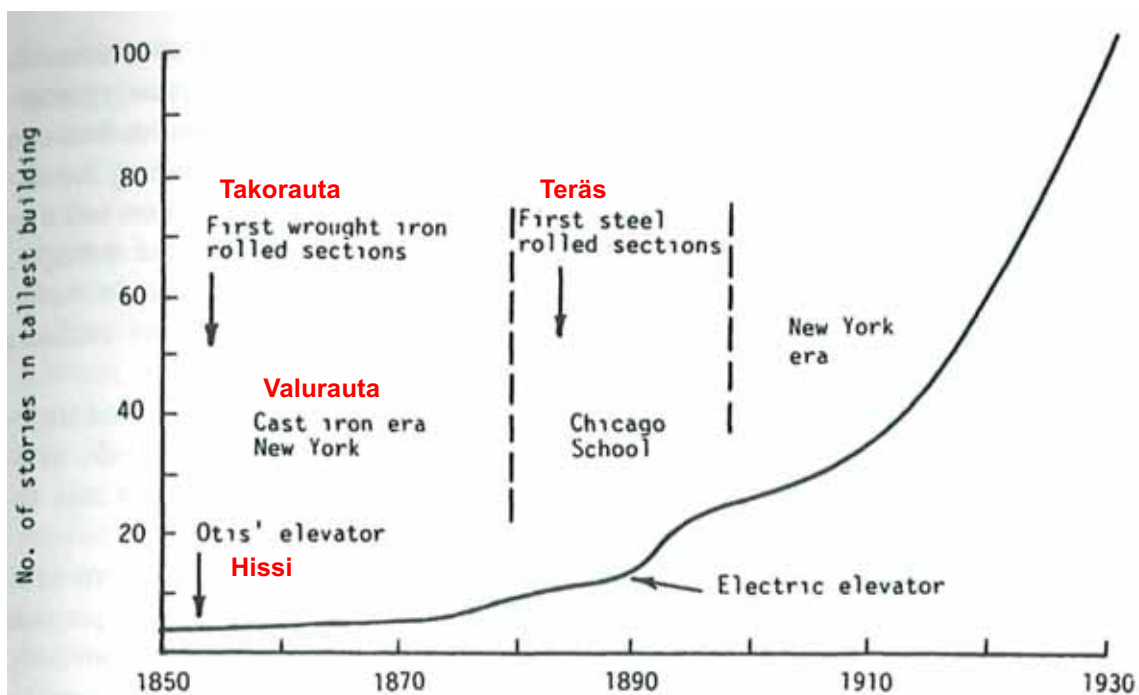


Fig. 1.1 Growth in height of the first great era of American skyscrapers.

# 10 maailman korkeinta rakennusta (vuonna 2016, osa rakenteilla)

**CITIES**

ing but also exceeds its closest competitor ( Taipei 101, completed in 2010) by 200 meters, about the height of New York City's Chrysler Building. The building topped off this year or next will displace the Burj Khalifa, but 2011 will go down as the single greatest year for the construction of tall buildings in history, with more than 100 skyscrapers over 200 meters (including 22 supertalls) slated for completion.

"The taller you have been, more care you'll take," Wills says. "Clearly, clients are asking for lower buildings, and they want them to be built rather than the most efficient way to get a return on their investment."

Most supertalls, in fact, cannot be justified on strictly economic terms. Once a building rises beyond roughly 70 stories (the exact figure varies depending on location), the added costs required to achieve structural stability and the added expense necessary for elevators and other services generally prohibit any direct financial profit.

The overbuilding impetus of these aspirations of supertalls are being outside the borders of the U.S. "China is using dollars to fund themselves," says Anthony Wood, executive director of the CTBUH. "The skyline is seen as an important symbol to proving that a country has arrived on the scene and is a First World country."

Of the 10 tallest buildings completed in 2010, only one, Chicago's Lloyds tower, is an American and (and as noted) it is barely taller than the One World Trade Center, formerly known as the Freedom Tower, its only the fourth tallest building under construction worldwide. It will probably top out at a symbolic 1,776 feet (541 meters).

China is leading the skyscraper boom. According to a 2010 report by the McKinsey Global Institute, China's cities will swell by 220 million people by 2025. By comparison, the transformational migration of 20 million Americans from the Sun Belt states leads to southern American cities between 1950 and 1970 entailed a population shift of just six million.

## The Skyline of 2016

In 2010, 100 new towers' basements laid out for the future of the tallest building in the world. By the middle of the decade they will no longer rank the top 10 buildings currently under construction are expected to take space through seven or the world's tallest for the time being the Burj Khalifa remains in a class of its own, another indicator for the world's appetite for tall buildings despite an absence of sign of slowing. Below, see the 10 that will be added in 2016, along with some interesting notes.

**Why Why 2016**

- Completed
- Under construction
- Other possible

**10 Tallest Buildings in 2016**

1. Burj Khalifa, Dubai, United Arab Emirates, 828 meters, 2010
2. Burj Dubayy, Dubai, United Arab Emirates, 718 meters, 2016
3. Burj Khalifa, Dubai, United Arab Emirates, 718 meters, 2016
4. Burj Khalifa, Dubai, United Arab Emirates, 718 meters, 2016
5. Burj Khalifa, Dubai, United Arab Emirates, 718 meters, 2016
6. Burj Khalifa, Dubai, United Arab Emirates, 718 meters, 2016
7. Burj Khalifa, Dubai, United Arab Emirates, 718 meters, 2016
8. Burj Khalifa, Dubai, United Arab Emirates, 718 meters, 2016
9. Burj Khalifa, Dubai, United Arab Emirates, 718 meters, 2016
10. Burj Khalifa, Dubai, United Arab Emirates, 718 meters, 2016

**The 10 construction boom's completion**

At the turn of the millennium, the world saw fewer than 10 "supertall" buildings more than 200 meters high. The new number will be completed this year.

**Percentage completed per year**

For 200-200 meters tall: 100%  
 For 100-200 meters tall: 100%  
 For 50-100 meters tall: 100%  
 For 20-50 meters tall: 100%

**As Efficient as Possible**

Official building height rankings take into account structural elements such as spires but not antennae or flagpoles. The distinction makes a building such as Taipei 101 stand out from the competition. Despite the tower's higher roof.

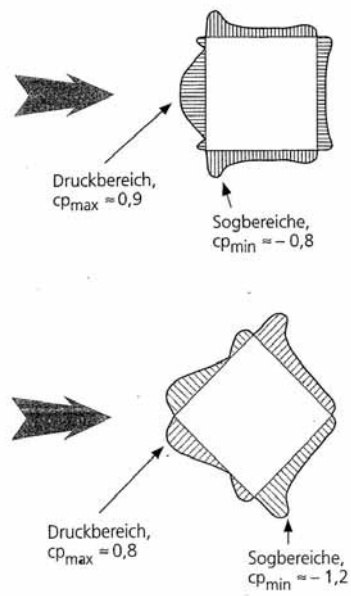
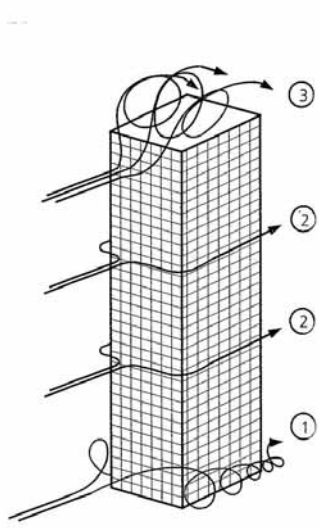
100 Skyscraper, Architecture, September 2010

17.11.2011 TMe

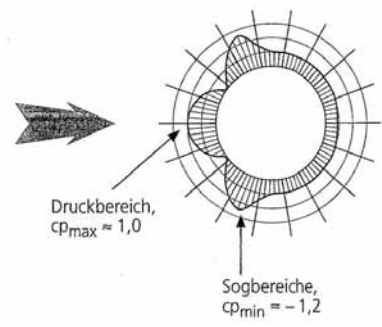
## Basis of Architectural and Structural Design

**Puu:** < 8 krs  
**Tiili:** < 10 krs  
**Teräsbetoni:** < 100 krs  
**Teräs/liitto:** < 200 krs ?

**"Rakennusten tulee olla kestäviä, toimivia ja kauniita"**  
 (De Architectura vuodelta n. 30 eKr)



"Rakennusten tulee säilyttää **luotettavuus** tasonsa suunnitellun **käyttöikänsä** ajan ja **taloudellisesti**" (Eurocode 0 vuodelta 2006)

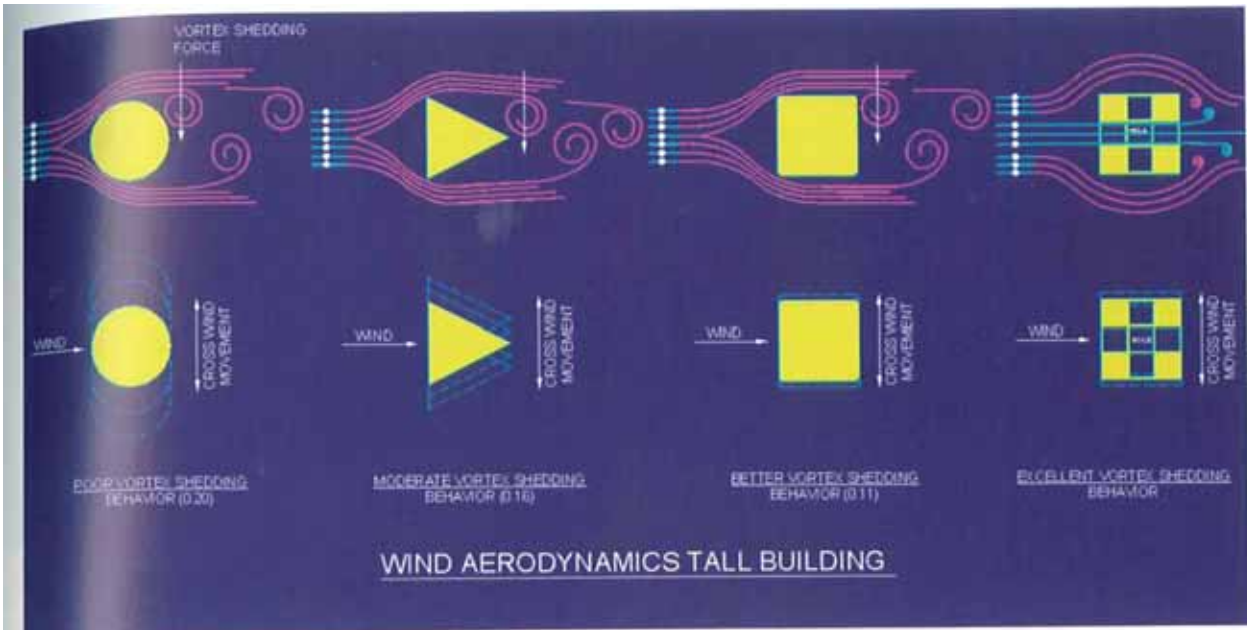


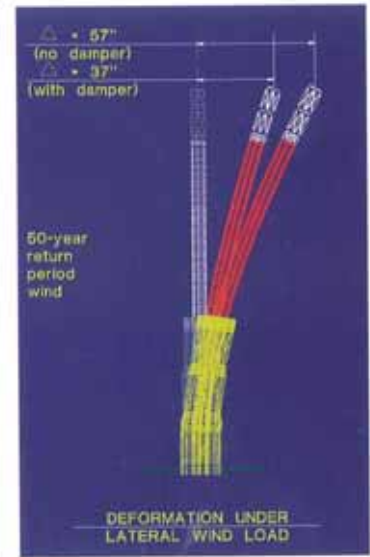
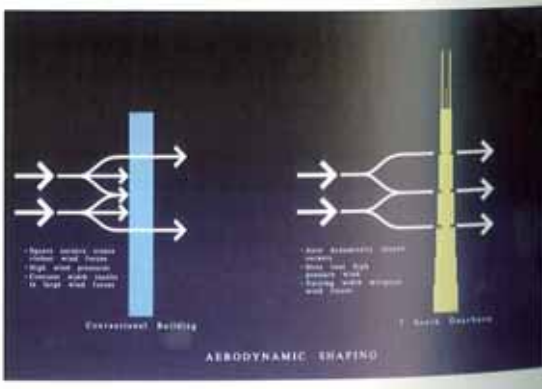
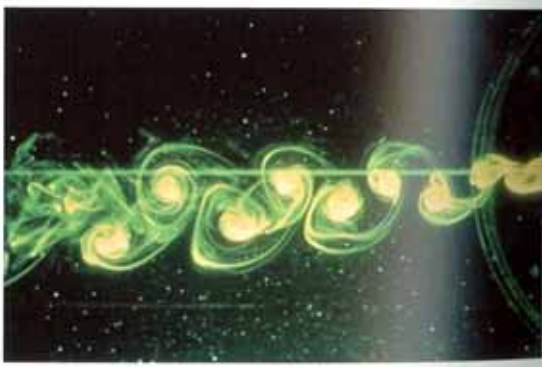
Tuulikuorma aiheuttaa merkittäviä imu- ja painevaikutuksia julkisivupintoihin. Runko on jäykistettävä tuulikuormia ja värähtelyjä vastaan. Ihmisten herkkyyttä värähtelylle.

- Staattinen tasapaino
- Rakenteen kestävyys
- Värähtelyn hallinta
- Geotekninen kantavuus
- Onnettomuustilanne

## Tuulen pyörteitten vaikutus poikittaisvärähtelyyn

Pyöreratailmiö hyvin hoikilla korkeilla rakennuksilla. Pyörteet irtoavat vuorotellen vastakkaisista reunoista säännöllisin aikavälein -> pyörteiden irtoamistaajuus -> resonanssivärähtely





**Taipei 101, Taiwan  
Tuned mass damper  
Completed 2004**

Cost :US\$ 1800 M  
Floor area: 450.000 m<sup>2</sup>  
Cost /m<sup>2</sup> = US\$ 4000

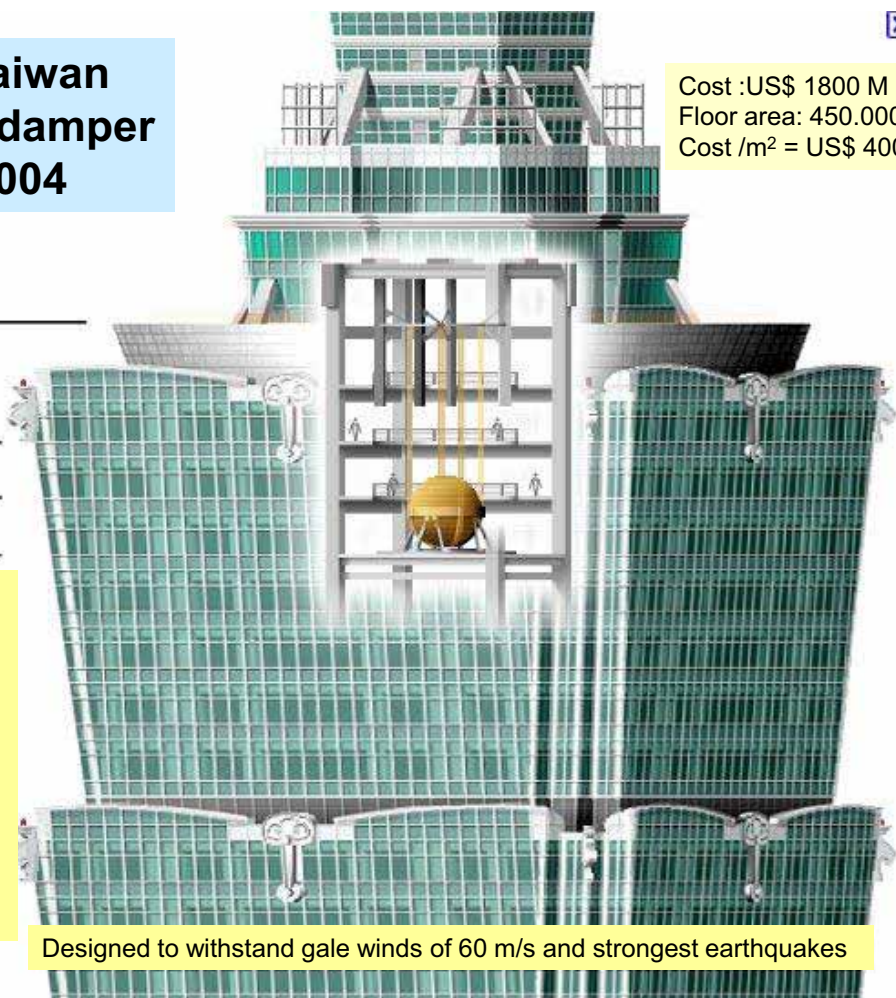
91st Floor (390.60 m)  
(Outdoor Observation Deck)

89th Floor (382.20 m)  
(Indoor Observation Deck)

88th Floor

87th Floor

508 m korkean Pilvenpiirtäjän vaimenninheiluri 390 m korkeudessa. Heilurikuulan paino 660 tonnia. Kuula (φ 5,5m) hitsattu teräsrenkaista. Heiluri vähentää huojuntaa n.40 %.



Designed to withstand gale winds of 60 m/s and strongest earthquakes



### Taipei 101, Taiwan

- Vaimenninheiluri Paino 660 tonnia.
- 2 pienempää (6 t.) heiluria tornin huipulla.

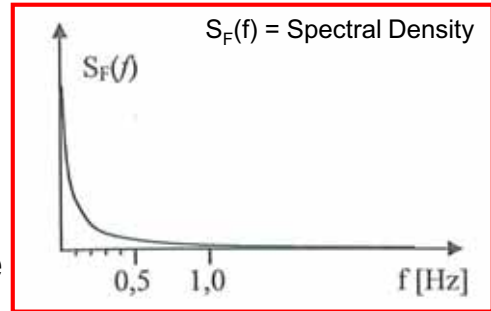


11

### Basis of Structural Design: Wind loads, Vibration, Calculations

- **Tuulikuorma** aiheuttaa korkealle rakennukselle (> 70 m) staattisen rasituksen lisäksi **värähtelyä**, joka tulee hallita, ettei se ole ihmisille ja rakenteille haitallista:
  - ”Eurokoodi-ohjeet EN 1991-1-4, Suomen kansallisilla parametreilla” rajautuvat **alle 100 m** korkeitten rakennusten tuulikuormien tarkasteluun. Ohje rajautuu kohteisiin, joissa tuulen aiheuttamia värähtelyjä ei tarvitse ottaa erikseen huomioon. Dynaamiset vaikutukset on huomioitu kertoimissa. Yli 100 m korkeille rakennuksille on tehtävä **dynaaminen analyysi**.
  - Korkeitten rakennusten Tuulikuormien vaikutukset ja värähtelyt voidaan selvittää luotettavasti **tuulitunnelikokeilla**.
  - Rakennuksen ominaismuodot ja –taajuudet sekä kiihtyvyydet ja amplitudit voidaan laskea dynaamiseen tarkasteluun soveltuvilla FEM-ohjelmilla, kuten: Ansys, Staad.pro, Nisa, Robot
  - Alin ominaistaajuus on likimäärin:  **$n_1 = 46 / h$  (Hz)**, jossa h on rakennuksen korkeus metreinä.

- Tuulikuorman **spektritiheys** kuvaa tuulikuorman jakaantuneisuutta eri taajuuksille.
- Suurin osa tuulikuormasta on keskittynyt pienille taajuuksille (**< 0,2 Hz**), jolloin rakennus voi olla herkkä resonanssille. **Värähtelyn amplitudi pyrkii kasvamaan erittäin suureksi.** Ellei rakenteen vaimennus rajoita värähtelyn amplitudia, voi rakenne vaurioitua.
- Ominaistaajuudet** riippuvat rakennuksen jäykkyydestä, joka vaikuttaa siis rakennuksen **värähtelyherkkyyteen**. Mitoittava tekijä on yleensä ihmisten viihtyvyys, vrt. kiihtyvyydet.



Basis of Dynamics: Vibration, terminology

**RAKENTEIDEN DYNAMIIKAN PERUSKÄSITTEITÄ**

Värähdysliike on kappaleen edestakainen liike tasapainotilan molemmiin puoliin. Hidas värähtely = heilahdusliike

$T = \text{jakson pituus (s)}$   
 $a = \text{amplitudi}$

Värähdysluku  $\lambda$  taajuus:  $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$   
 $\omega = \text{kulmanopeus}$

Jokainen kappale tai rakenne värähtelnee sille ominaisella taajuudella  $\lambda$  ominaisvärähtelyluvulla  $f_n$ .

Jousi-massa systeemille saadaan

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}}$$

$k = \text{jousivakio} = \frac{F}{\Delta} \quad [N/m]$   
 $M = \text{massa} \quad [kg]$

*Harmoninen värähdysliike*

*Perustapaus*

**Värähdysaika**  
**Ominaistaajuudet**  
**Ominaisuudet**

- Amplitudi
- Nopeus
- Kiihtyvyys
- Vaimennus

**Dynaamiset vasteet**

(esim. rakennuksen siirtymä)

- Taustavaste
- Resonanssi-vaste

**Heräte** (= vaikuttava tuulikuorma)

**MÄSTORAKENTEET**

Jonkin massat keskitetään sopivaksi valituksiin pisteisiin.  
 Lasketaan yksikkövoiman H aiheuttama taipumaviiva Δᵢ = siirtymä massapisteen kohdalla.

Ellin ominaisvärähtelyluku:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{H \cdot \Delta_0}{\sum m_i \Delta_i^2}}$$

ominaisvärähtelyaika  $T = \frac{1}{f_n}$

Kun  $T \geq 1s$ , on rakenteella taipumus värähdellä tuulella, ja tuulikuorman dynaaminen vaikutus tulee mitoituksessa ottaa huomioon.

$[m_i] = kg$   
 $[H] = N$   
 $[\Delta_i] = m$   
 $[f_n] = Hz$   
 $[T] = s$

**Staattinen tuulikuorma**

- keskituulennopeus

**Kvasistaattinen tuulikuorma**

- puuskatuulennopeus

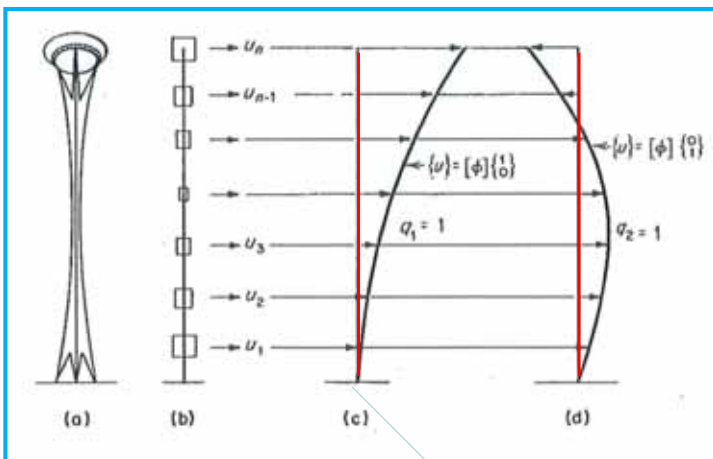
Korkeilla rakennuksilla voi esiintyä pyöreratailmiötä

**Tuulikuorman spektritiheys**

**Yhden vapausasteen värähtely**  
**Usean vapausasteen värähtely**

- värähtely tuulen suuntaan
- värähtely tuulta vastaan kohtisuoraan
- vääntövärähtely
- pyörteiden irtoamistajuus
- resonanssivärähtely

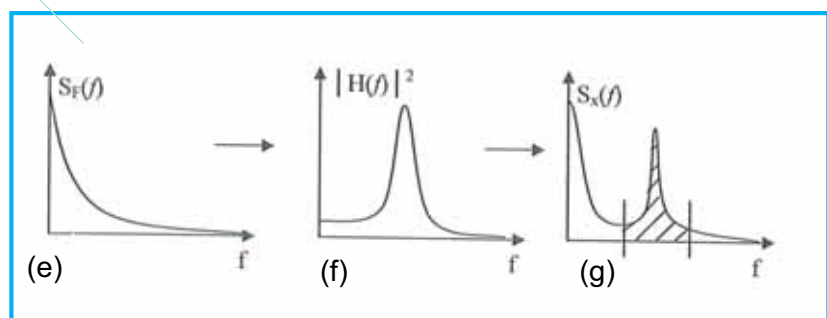
**Dynamics: Mode shapes of Natural frequencies and analyses of wind load**



**Kuvien selitykset:**

- (e) = Herätteen spektritiheys
- (f) = Vasteen (= siirtymän) spektritiheys, "piikki" resonanssi-taajuuden kohdalla
- (g) = Heräte (= tuulikuorma) ja värähtelysystemi ovat resonanssissa

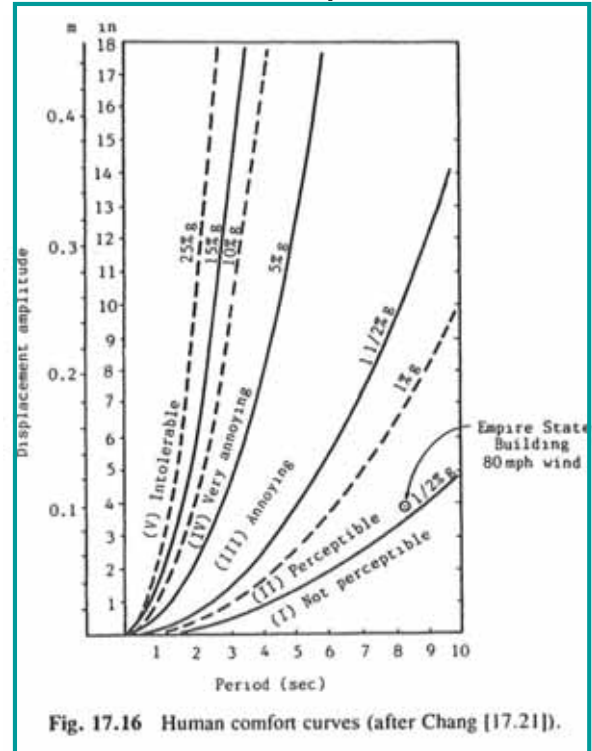
- (a) = Todellinen rakenne
- (b) = Idealisoitu rakenne
- (c) = 1. värähtelymuoto
- (d) = 2. värähtelymuoto



## Värähtelyn mukavuusvaikutus: värähtelyn kriteerit

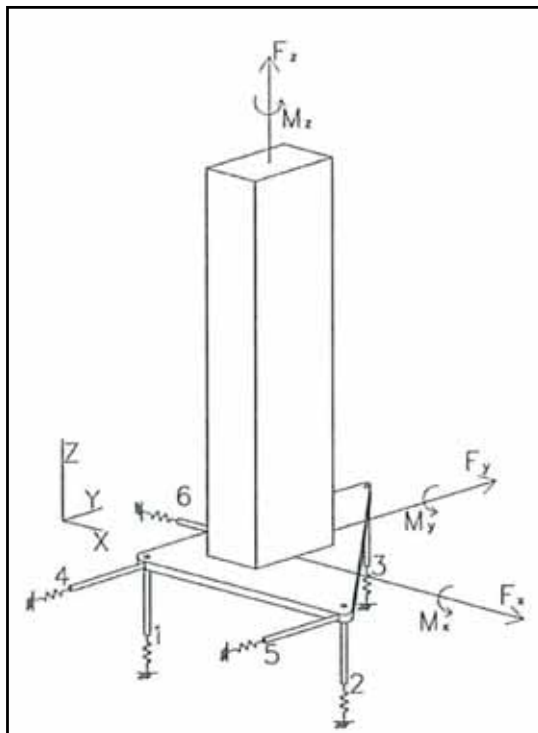
Taso	Kiihtyvyys [ $m/s^2$ ]	Vaikutukset
1	<0,05	Ihmiset eivät tunne liikettä
2	0,05–0,1	a) Herkät ihmiset tuntevat liikkeen b) Riippuvat esineet voivat liikkua kevyesti
3	0,1–0,25	a) Suurin osa ihmisistä tuntee liikkeen b) Liike voi vaikuttaa toimistotyöskentelyyn c) Pitkäaikainen vaikutus voi aiheuttaa 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 liikkeen hyvin voimakkaasti b) Luonnollinen kävely on vaikeaa c) Seisoivat 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

## Heilahdusaika / amplitudi



## Values of accelerations and these effects. Wind-tunnel test system.

### Tuulitunneli-koejärjestely

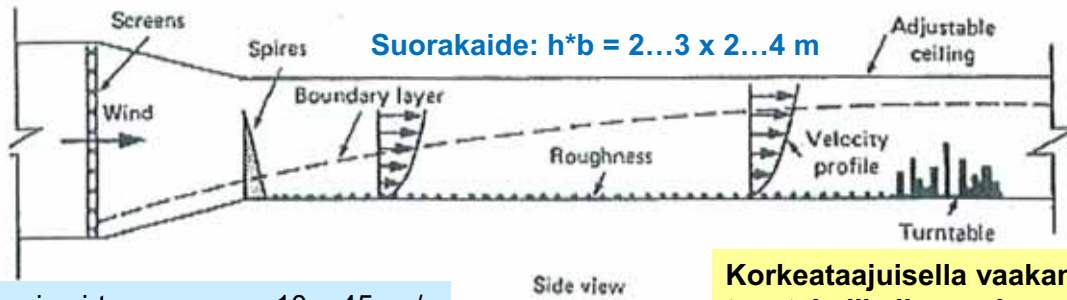


Korkeataajuinen vaakamittaustekniikka

6 vapausasteen korkeataajuinen vaaka, johon hyvin kevyt pienoismalli kiinnitetty jäykästi. Voima-anturit mittaavat voimasuureita.

## Wind-tunnel test by the high frequency force balance method

Mittaustekniikka on herkkä sähköisille häiriöille !

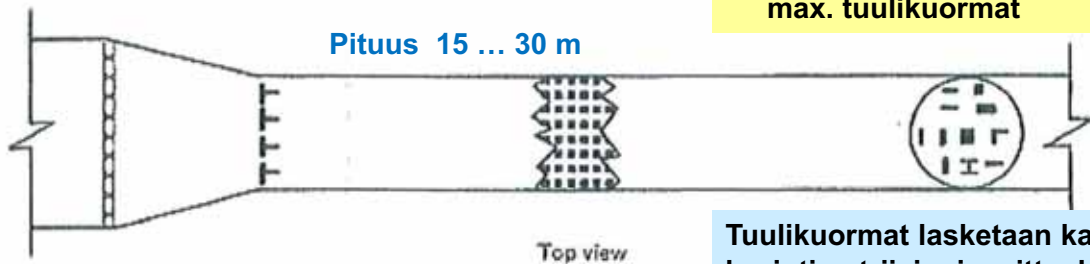


Suurin virtausnopeus 10 – 45 m/s

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

Korkeataajuisella vaakamittaustekniikalla saadaan:

- Staattiset tuulikuormat
- Kvasistaattiset min. ja max. tuulikuormat



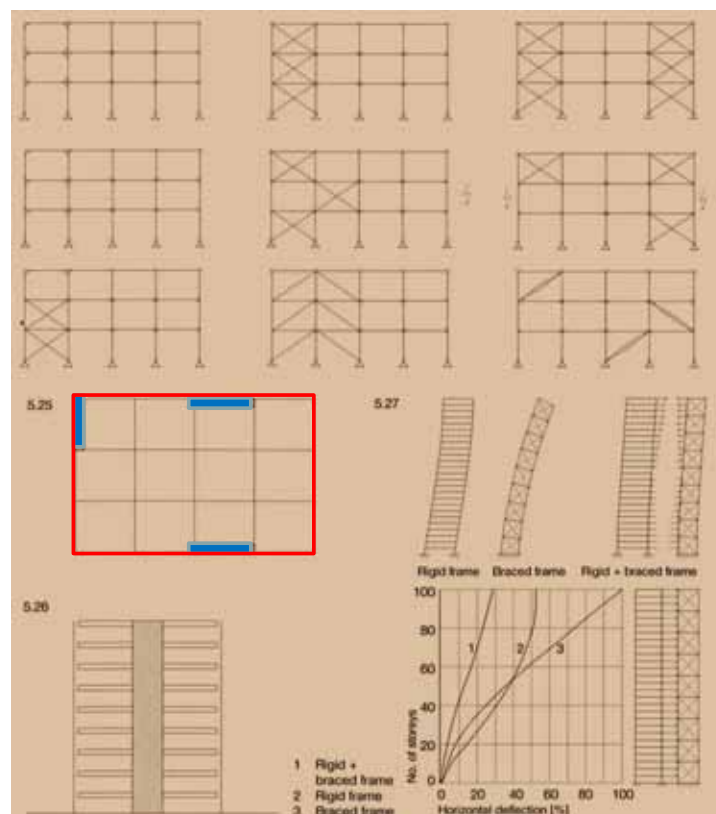
Kuva 14. Rajakerrostuulitunneli ylhäältä. [11, s. 161]

Tuulikuormat lasketaan kalibrointimatriisin ja mittauksista saatavien jännite-arvojen avulla. Tuloksena voima-suureiden aikahistoriat, joista saadaan tilastolliset suureet.

## Principles of situation of stiffening parts

### Jäykistävien rakenneosien sijoittelu

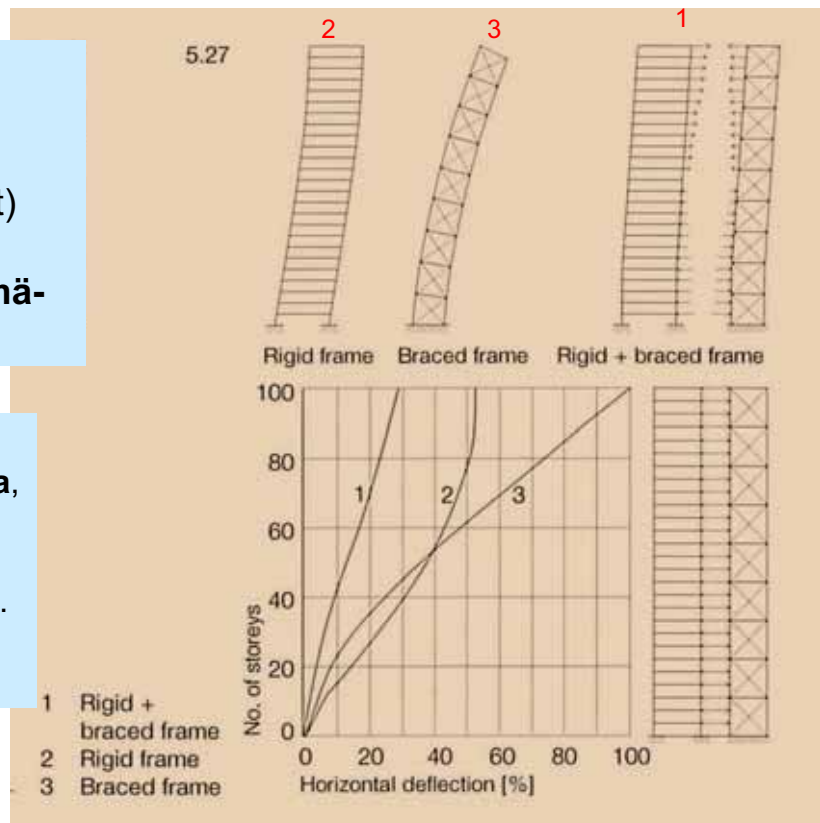
- 1) Yhdistetty kehä- + ristikkojäykistys
- 2) Kehäjäykistys
- 3) Ristikkojäykistys



## Comparison of different stiffening parts as function of displacement

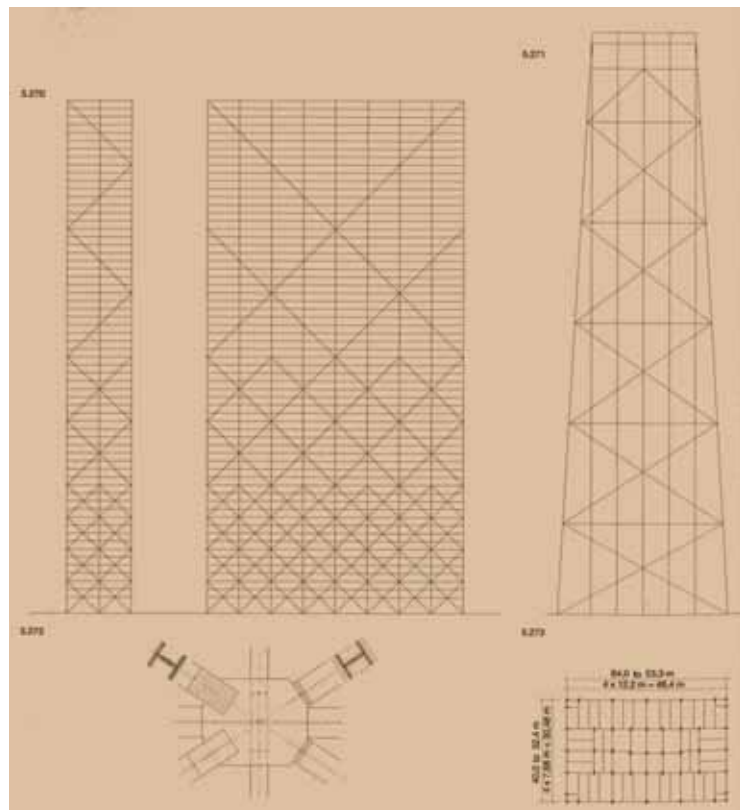
Erialaisten jäykistysrakenteitten vertailua horisontaalsiirtymän funktiona (pilvenpiirtäjät)  
**Paras lopputulos saavutetaan yhdistelmä-rakenteena (1)**

**Suomessa** yleensä liitokset ovat **nivelliitoksia**, jolloin jäykistävinä osina toimivat ristikot, porrastetut ja hissikuulut sekä levyseinät. Kehäjäykistys tehtaissa. Halleissa Mastopilarit.

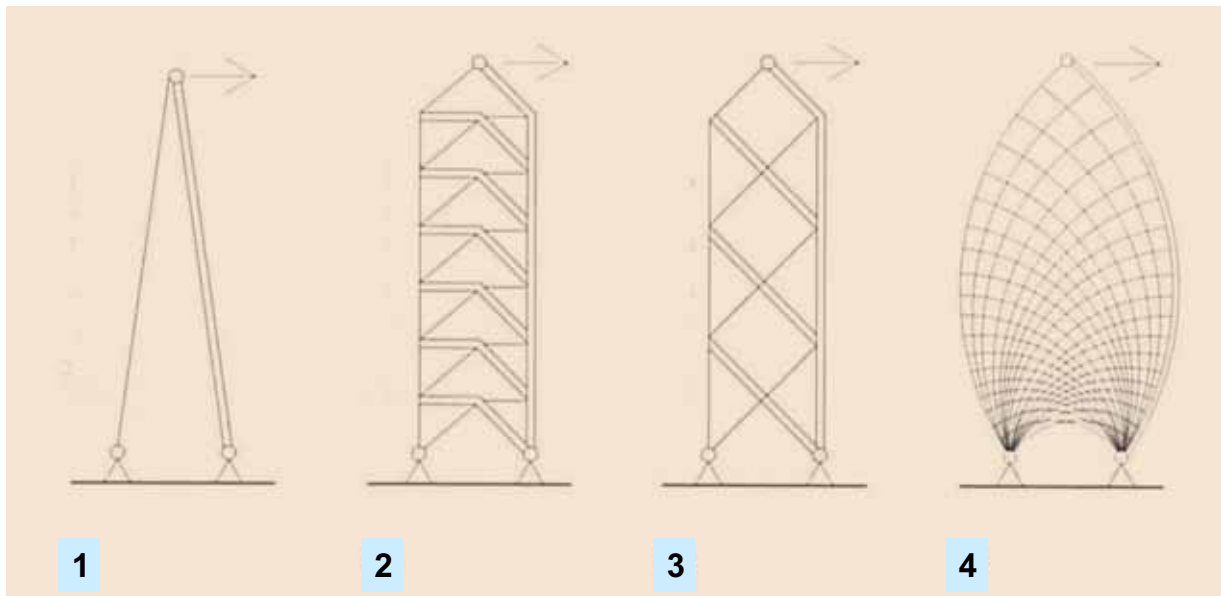


## Basis of Structural Design: Bracing system of Facades

**Julkisivut korkeissa rakennuksissa olennainen rakennusrungon jäykistävä osa, jolloin julkisivut on ristikoitu kauttaaltaan. "Ihannerakenne" mahdollisimman symmetrinen.**



## Basis of Structural Design: Different shapes of Bracing system



Vaihtoehtoisia muotoja jäykistävälle ristikkorakenteelle, vedetty sauva piirretty **ohuella**, puristettu **paksulla**

## Ulokkeiden tuentatapoja ... ristikkojäykistyksiä



## Fcade bracing of CCTV-tower, Peking



Aaro Kohonen

17.11.2011 TMe

25

## Completed CCTV-Tower in Peking



230 m  
High



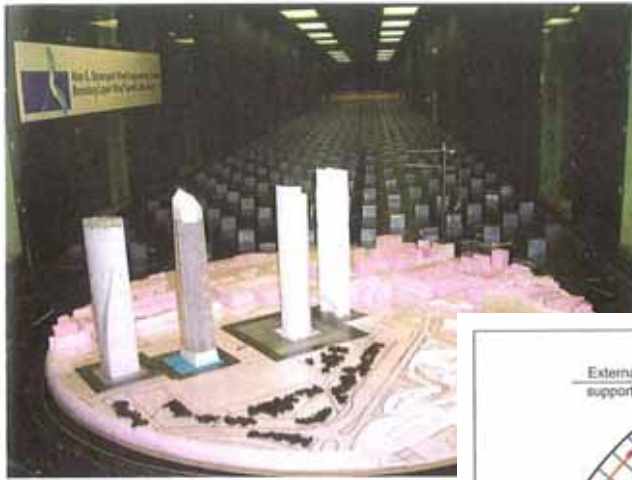
Aaro Kohonen

17.11..2011 TMe

26

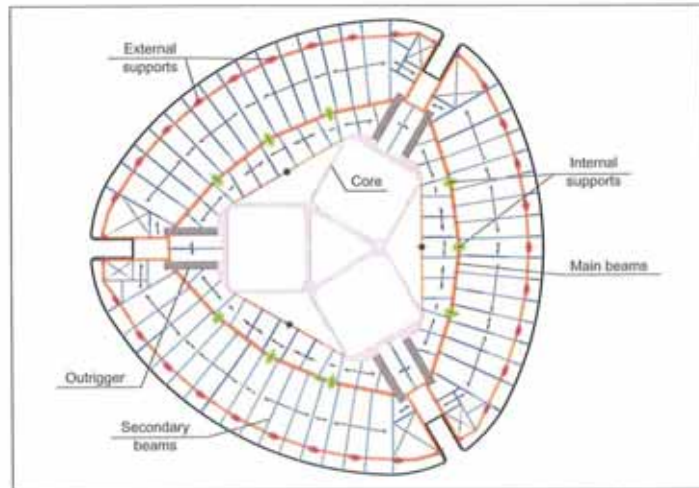


## Concrete in High-rise Buildings in Madrid

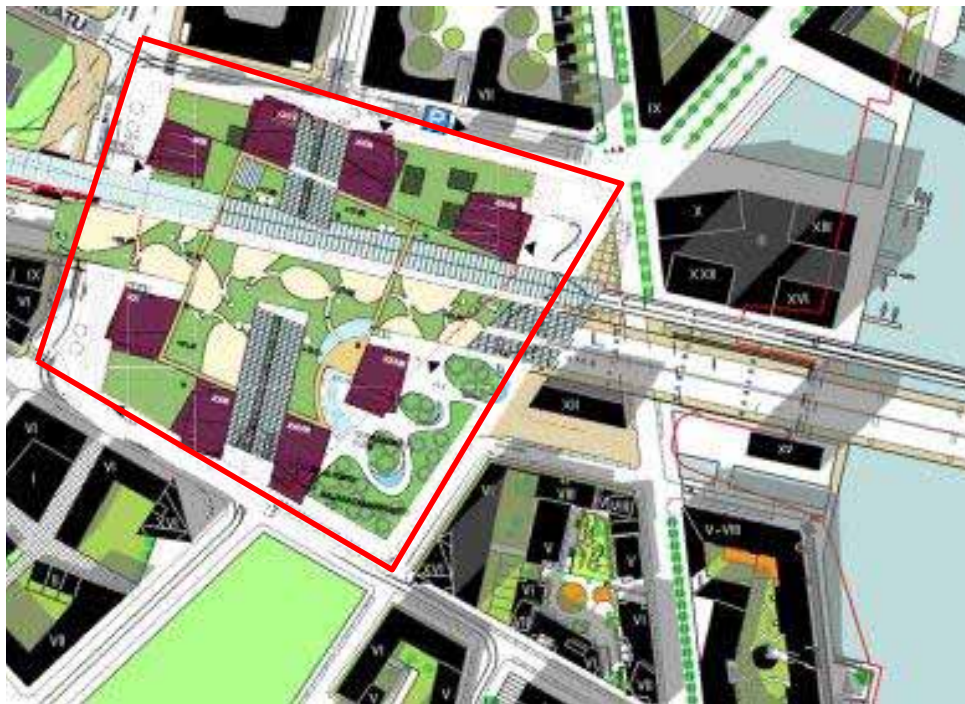


Tuulitunnelikokeet tehty Kanadassa, Länsi-Ontarion yliopistossa

Jäykistävät kuilut keski-osan ytimessä ovat paikalla valettuja. Ylimmässä kerroksessa vakaajat (Outrigger).



## Kalasadama 2011: Design and Build-Competition, SRV Victorious Team



### Rak.alueen halkaisevat:

- Metro
- Itäväylä = Junatie, viherkatetaan
- Sisäinen katu (=Kalasadaman katu), kadun keskellä raitiovaunu

### Kulosaaren silta

### 8 tornitaloa:

- 23, 27, 29, 28 kerrosta pohj.-puolella
- 20, 23, 28, 33 kerrosta etelä-puolella

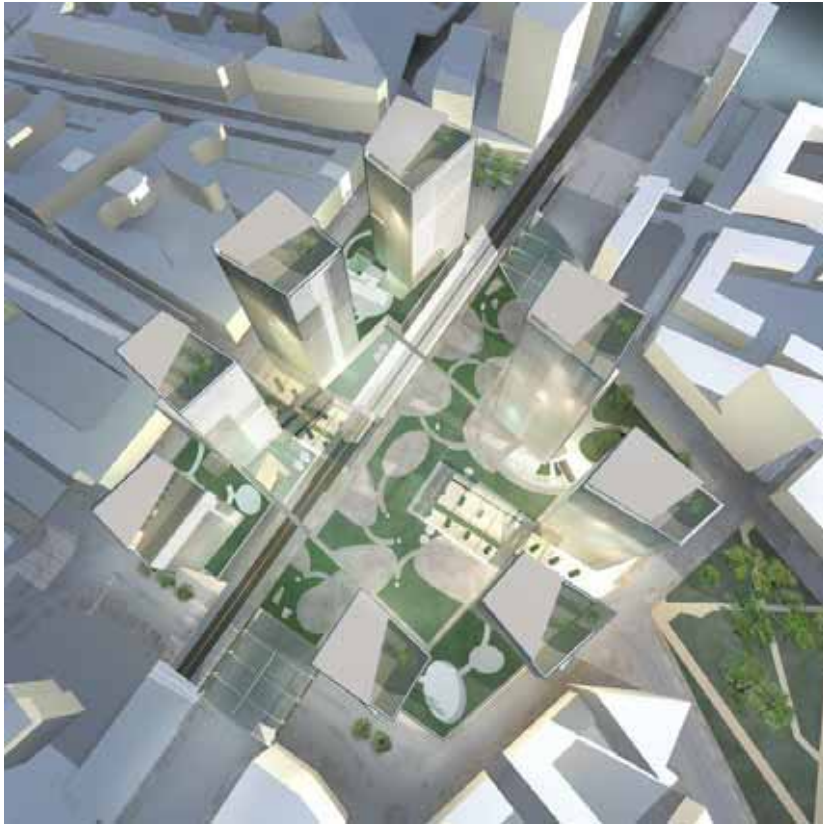
**Kalasadama 2011: Design and Build-Competition, SRV Team**



**Kalasadama 2011: Design and Build-Competition, SRV Team**



## Kalasadama 2011: Design and Build-Competition, SRV Team



### SRV Team:

- SRV Yhtiöt Oyj, Timo Nieminen, Reijo Harmaajärvi
- Arkkitehtitoimisto Helin&Co Oy, Pekka Helin
- RAK: Aaro Kohonen Oy, TMe
- SITO Oy: Geo, liikenne, silta-suunnittelu, Infra
- LVIS: Projectus Team Oy, HM, RL
- Destia Oy: siltatyöt

Aaro Kohonen

17.11.2011 TMe

33

## Kalasadama 6 / 2011: Englantilaiskallio



Aaro Kohonen

17.11.2011 TMe

34

## Kalasadama 10 / 2011: Englantilaiskallion louhinta käynnissä



## Kalasadama 10 / 2011: Jäteaseman louhinta käynnissä



## Kalasadama 2011: Design and Build-Competition, SRV Team



### Itäväylä = Junatie katetaan viherkannella:

- vähentää liikenteen meluvaikutuksia
- vähentää hiukkaspäästöjä
- toimii asuntotornien pihana
- porrastukset myös vesiaiheina, ”espanjalaiset portaat”
- kannelle paloautoreitti
- viherkansi raskaasti kuormitettu
- Junatien alapuolella liike-/ pysäköintitiloja

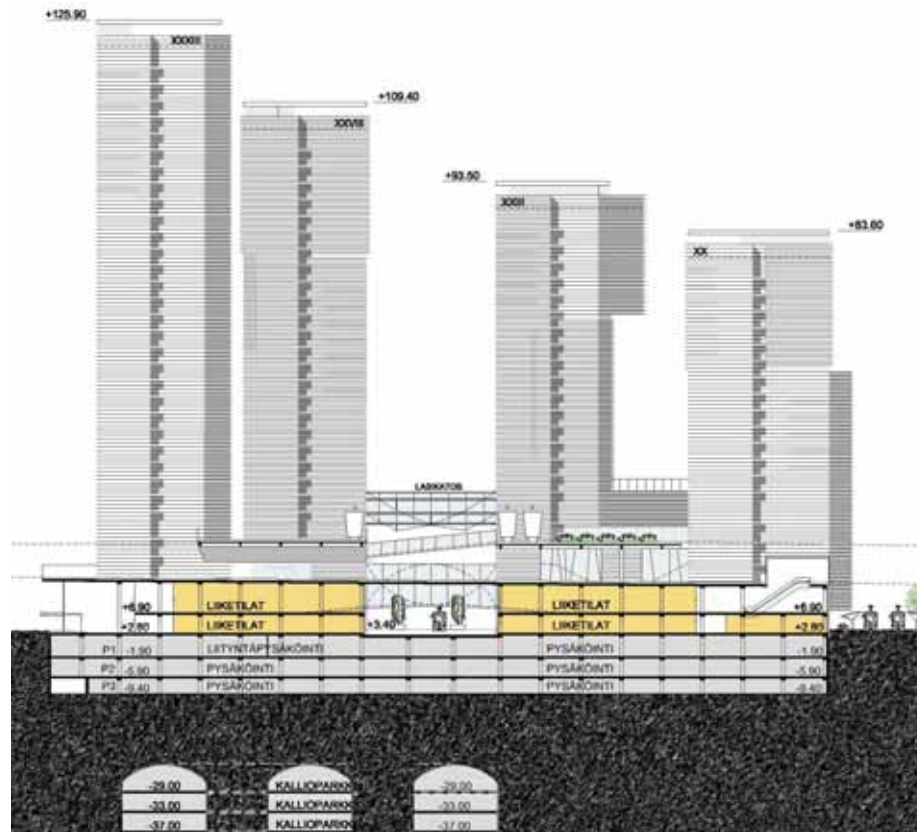
## Kalasadama 2011: Design and Build-Competition, SRV Team



### Kohteen laajuus:

- Terveys- ja sosiaali-keskus
- Kauppakeskus (mini)
- Liiketilaja
- Toimisto-, hotelli- ja asuintiloja
- Pysäköintitilat kellari-kerroksissa
- Kulosaaren sillan jatkaminen n. 300 m. Silta katetaan viherkannella
- Metron tukemistavan muutos ”englantilaiskallion” kohdalla, kallio louhitaan pois
- Katujen muutokset
- Jäteasema
- Yht. n. 300.000 brm<sup>2</sup>

## Kalasadama 2011: Design and Build-Competition, SRV Team



- 20 ... 33 kerrosta
- Ylin korko +125.90
- Rak. max Korkeus  
 $H = 125.9 + 14.4 = 140.3 \text{ m}$
- Alin ominais-  
 taajuus = 0,33 Hz
- Maan taso (= tulva-  
 korkeus) = +2.80
- Max kork.  
 maanpinnasta =  
 $125.9 - 2.8 = 123.1 \text{ m}$
- 4 pysäköinti-  
 kellaria
- Alin taso - 9.40  
 (jäteasema)
- Alin taso - 14.40  
 (pysäköintikellari)
- Patoseinät  
 kaivannon ympäri

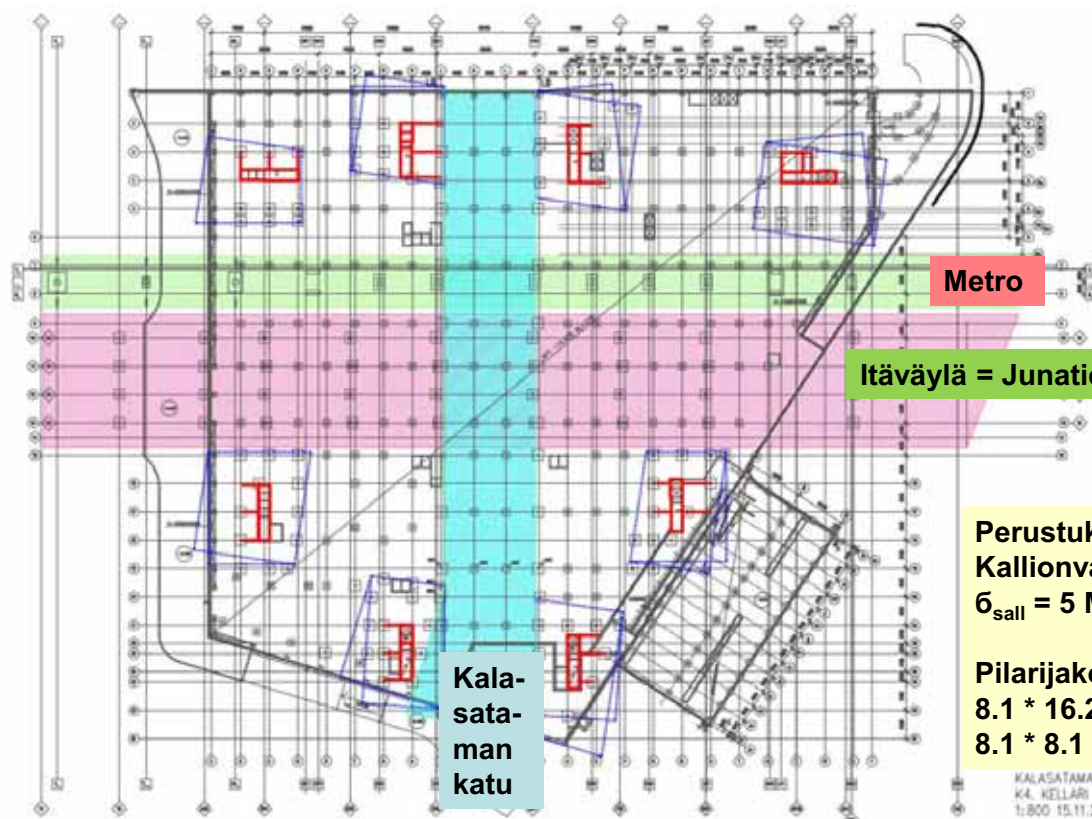
Aaro Kohonen

17.11.2011 TMe

Helin&Co

39

## Kalasadama 2011: Design and Build-Competition, SRV Team



Perustukset  
 Kallionvaraisia  
 $\sigma_{sall} = 5 \text{ MN/m}^2$

Pilarijako  
 $8.1 * 16.2 \text{ m}$   
 $8.1 * 8.1 \text{ m}$

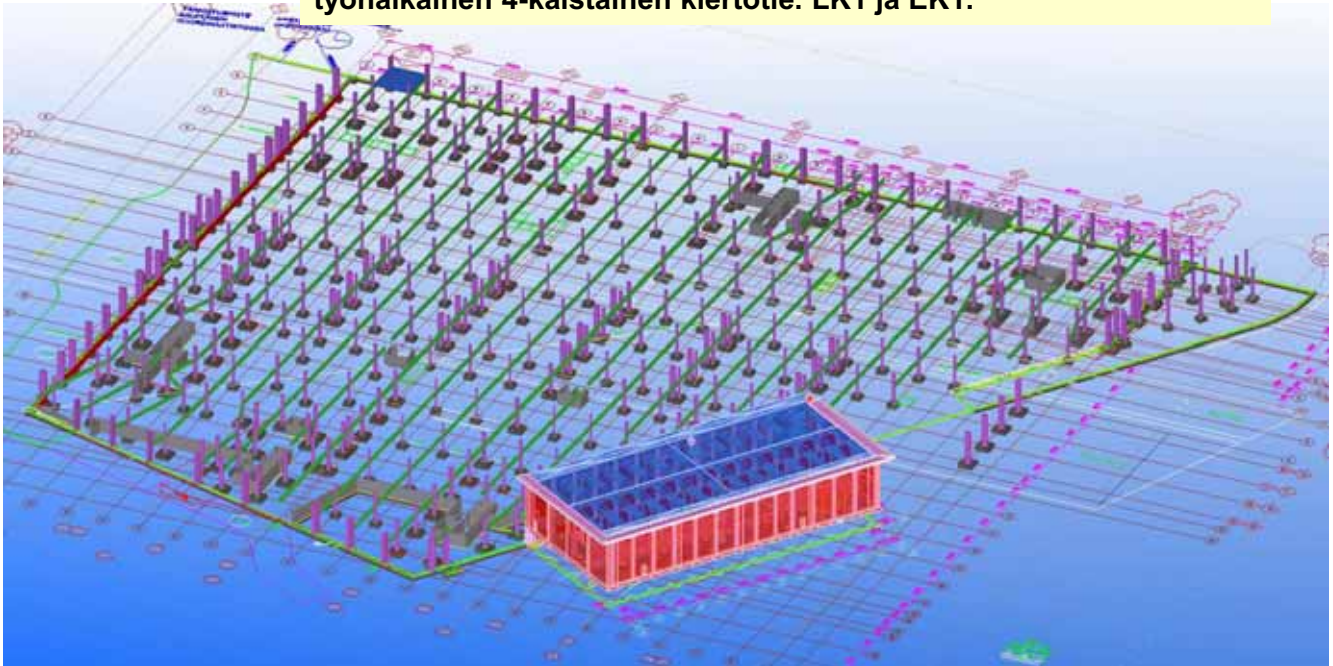
KALASATAMA  
 K4, KELLARI -14.400  
 1:800 15.11.2011

Aaro Kohonen

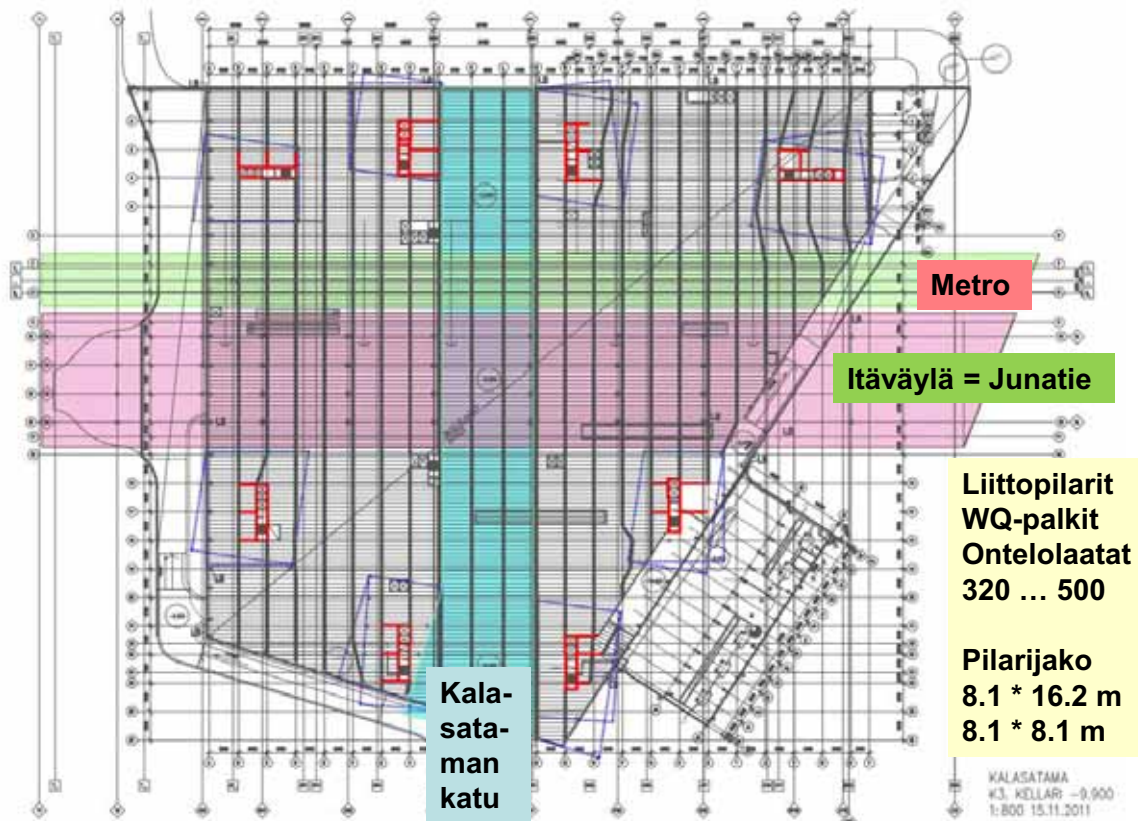
17.11.2011 TMe

40

Asuntotornien max. Pilarikuormat 25 ... 35 MN (ominaiskuormia)  
Edessä alhaalla maanalainen koko aluetta palveleva imujärjestelmään perustuva Jäteasema, jonka päälle tukeutuu Itäväylän työnaikainen 4-kaistainen kiertotie. LK1 ja EK1.



Kalasadama 2011: Englantilaiskallio louhitaan kokonaan pois



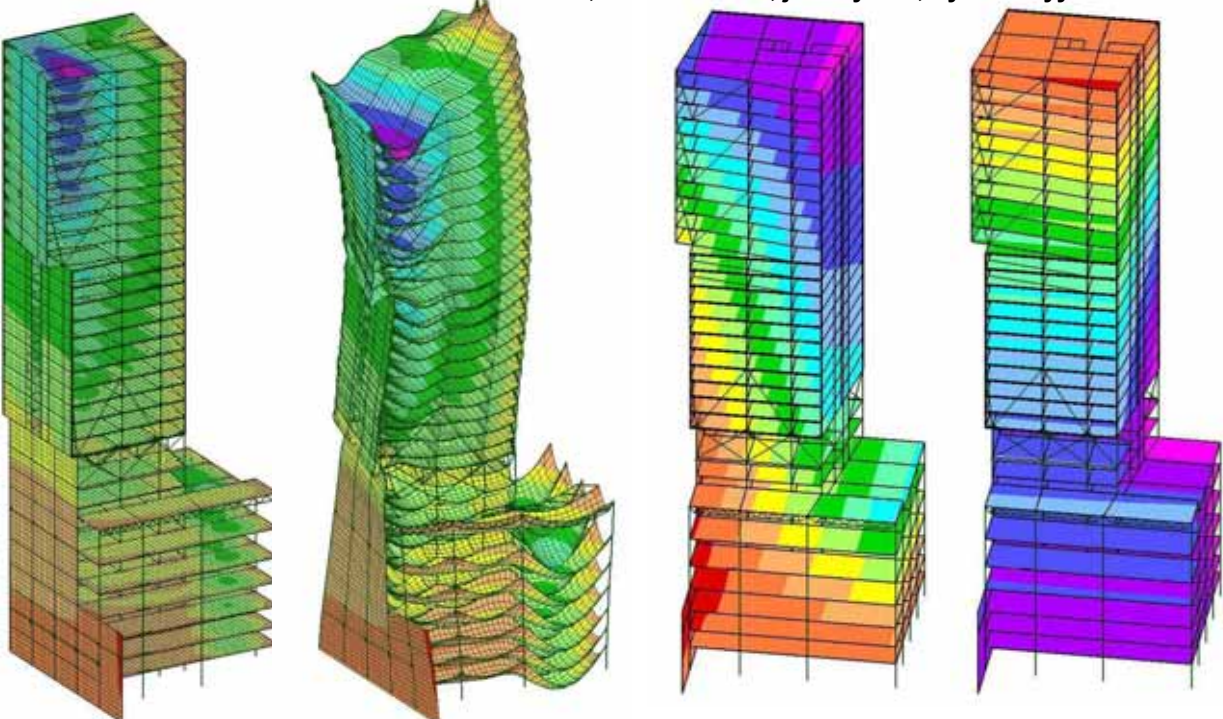
# Kalasadama 2011: Design and Build-Competition, SRV Team



Runko: Kallioanturat, Liittopilarit, WQ-palkit, Ontelolaatat 320...500. Paikallavalu (as.)

# Kalasadama 2011: Design and Build-Competition, SRV Team

Robot-laskentamalli: muodonmuutokset, voimasuureet, jännitykset, dyn. analyysi



Runko: Kallioanturat, Liittopilarit, WQ-palkit, Ontelolaatat 320...500. Paikallavalu (as.)

▪ Kalasataman keskus / Yhteenveto



Aaro Kohonen

**Suomessa** tuulikuormitus ja sen vaikutukset värähtelyyn merkittävin kuormitustekijä yli 100 m korkeitten rakennusten suunnittelussa. Taifuunit, tsunamit ja maanjäristykset eivät täällä ole määrääviä. Aerodynaaminen muotoilu tärkeä!

”**Suomen Eurokoodit EN 1991-1-4**” rajoittuvat tuulikuormissa alle 100 m korkeisiin rakennuksiin. Värähtely / puuskat huomioitu kertoimissa.

Yli 100 m korkeille rakennuksille **Dynaaminen Analyysi: tutkittava värähtelyn vaikutukset.**

**Tuulitunnelikokeilla** voidaan luotettavasti selvittää tuulikuormat ja värähtelyt.

**Dynaamisilla** FEM-laskentaohjelmilla voidaan laskea luotettavasti ominaismuodot ja –taajuudet sekä kiihtyvyydet ja amplitudit. Ihmisten herkkyys.