

# Rakenteiden tuulikuormat

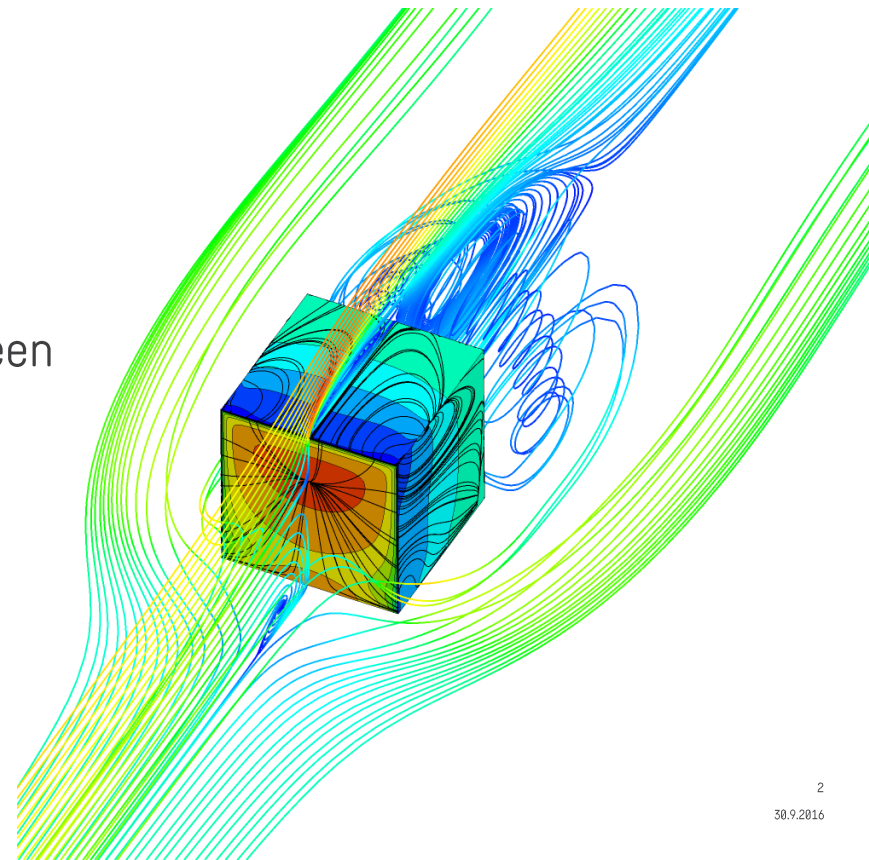
Juha Soini

Sweco Rakennetekniikka Oy

[juha.soini@sweco.fi](mailto:juha.soini@sweco.fi)

# Luennon sisältö

- Lyhyt esittely Sweco Rakennetekniikasta ja luennoitsijasta
- Johdanto
- Tuulikuormituksen teoreettista taustaa
- Tuulieurokoodi
  - Käyttö tavanomaisen rakenteen tapauksessa
  - Katsaus erityishuomiota vaativiin asioihin
- Katsaus muihin tuulikuormitusnormeihin
- Muut menetelmät tuulikuormien määrittämiseen
  - Tuulitunnelikokeet ja numeerinen virtauslaskenta
- Rakennusten jäykistyksen suunnittelusta
- Yhteenveto
- Lähteet



## Sweco numeroina



#1

Euroopassa

14 500

työntekijää

1,7 MRD €

liikevaihto

1889

perustettu

## Sweco Finland



### NUMEROINA

**178** M€ liikevaihto  
vuonna 2015

**25** Toimipistettä  
Suomessa

**2 000** työntekijää

### PALVELUT

- **Rakennetekniikka**
- Projektinjohto ja rakennuttaminen
- Talotekniikka
- Arkkitehtuuri
- Ympäristö- ja yhdyskuntatekniikka
- Teollisuus
- Asiantuntijapalvelut
- Kansainväliset toiminnot

# Sweco Rakennetekniikka



Toimistot 16 paikkakunnalla



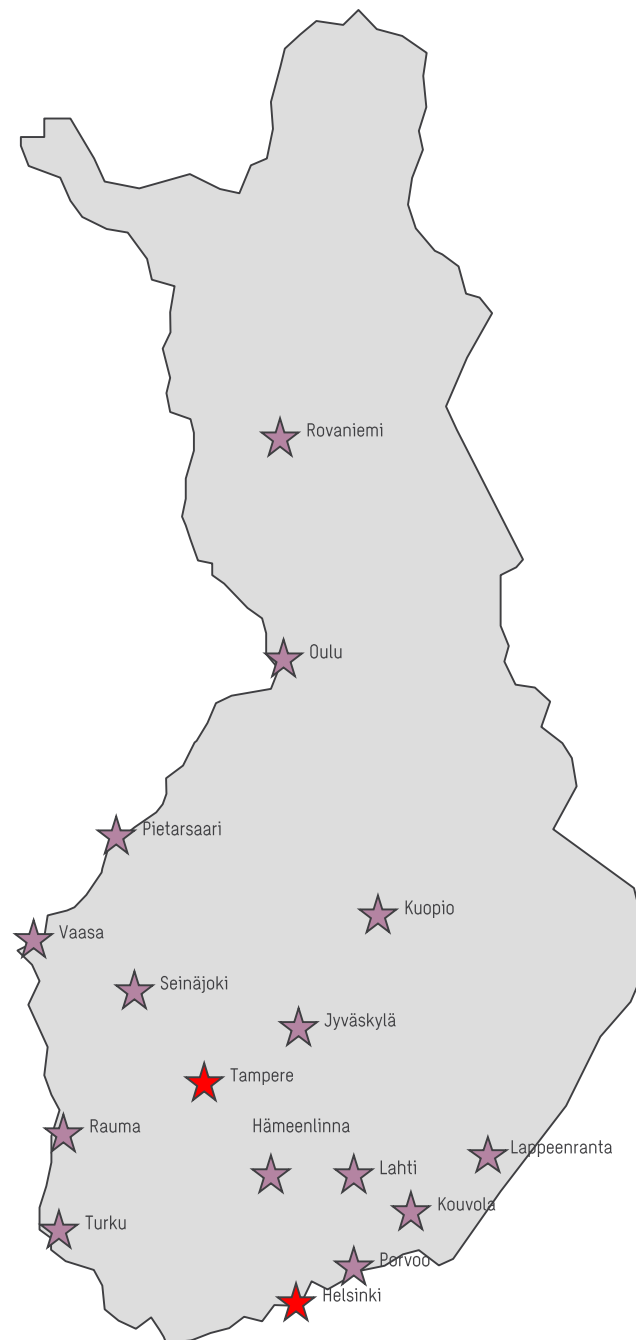
Yli 700 asiantuntijaa



~ 60 milj.€ liikevaihto vuonna 2015

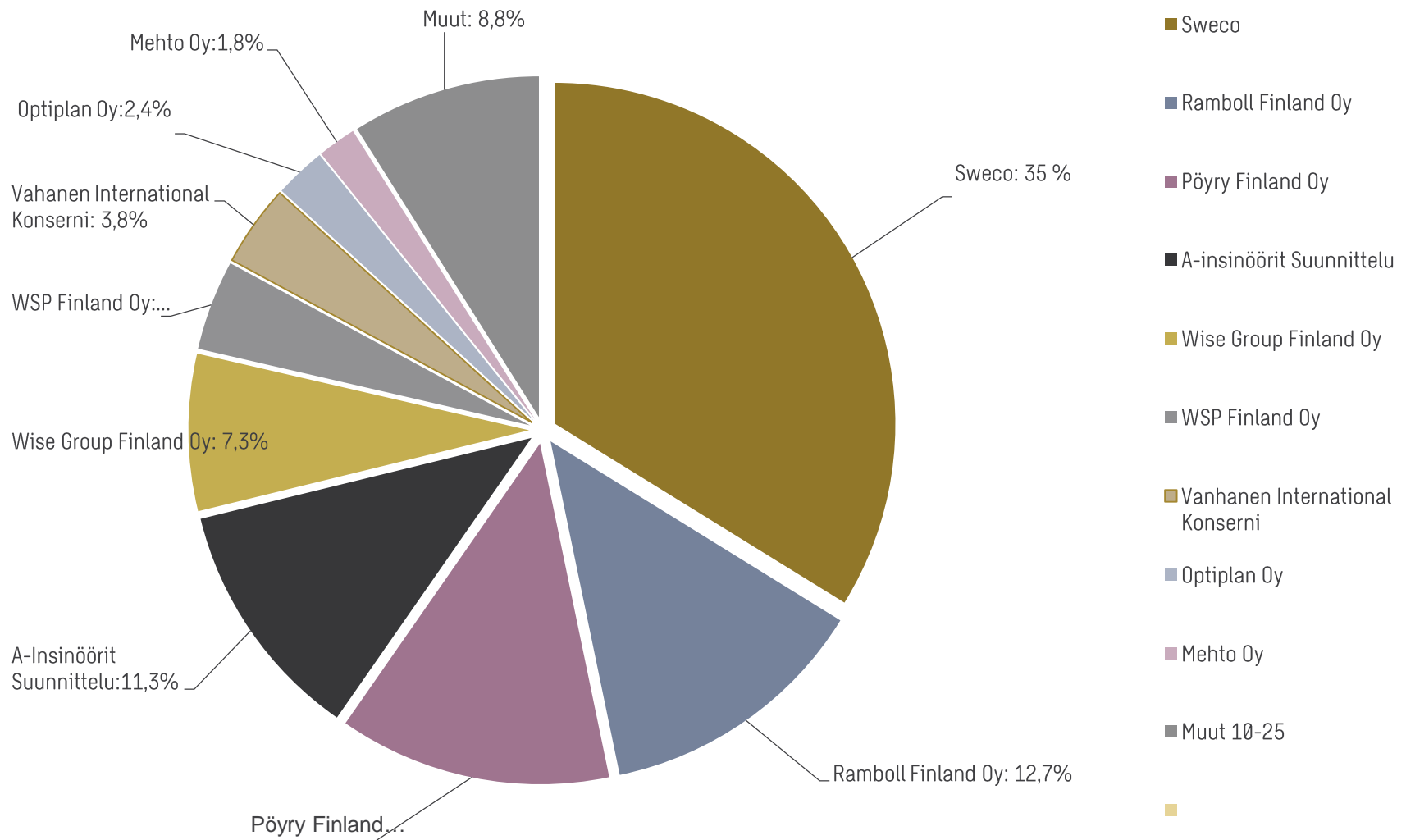


35 % markkinaosuus vuonna 2015



# Sweco Rakennetekniikka, markkina-asema 2015 \*)

\*) SKOL tilasto 2015



- **Juha Soini**

- vuosimallia 1988
- Juuret Etelä-Pohjanmaalla, Jalasjärvellä
- Opiskelujen myötä tamperelaistunut

- **DI-opinnot TTY:llä 2008-2016**

- Pääaine: rakennesuunnittelu
- Sivuaine: korjausrakentaminen
- ”Ylimääräiset” opinnot: vaativien rakenteiden suunnittelu, rakenteiden mekaniikka, virtauslaskenta
- Osaamisen painopisteet: teräsrakenteet, tuulikuormat, FEM- ja CFD-laskenta

- **Työura**

- Ensin haalarihommia työmaalla
- Suunnittelutoimistoon 3. opiskeluvuoden jälkeisenä kesänä (KPM-Engineering Oy)
- Sillä tiellä edelleen, suunnittelukokemusta 5,5 v ajalta
  - Nykyään firman nimenä yritysostojen myötä Sweco Rakennetekniikka
  - Työskentelen Tampereen toimistolla, teknisen laskennan osastolla
- Työtehtävät pääosin teräsrakenteisten teollisuuskohteiden rakennelaskentaa

# Tuulikuormien merkitys

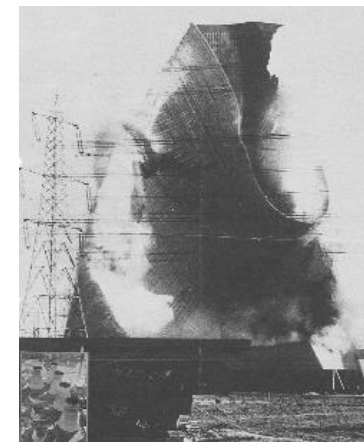
- Usein rakennuksen merkittävin vaakakuorma.
  - Vaikuttaa oleellisesti jäykistysjärjestelmän suunnitteluun ja mitoitukseen.
  - Ajan saatossa rakennukset on pyritty suunnittelemaan yhä
    - Kevyemmiksi
    - Korkeammiksi
    - Hoikemmiksi
 } → joustavemmiksi
- Ovat alttiimpia tuulikuormien vaikutuksille.
- Maailmanlaajuisesti tuuli aiheuttaa rakennuksille suurimmat taloudelliset vahingot.



Kuva: [1]



Kuvat: [2]

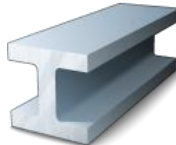
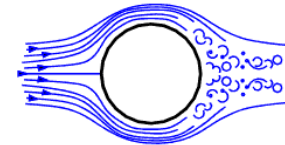
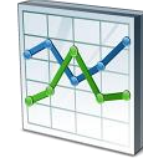


Kuvat: [3]



# Tuulikuormista yleisesti

- Tarkempi ymmärtäminen vaatii poikkitieteellisyyttä.
  - Meteorologia
  - Tilastotiede
  - Virtausmekaniikka
  - Rakenteiden mekaniikka ja dynamiikka



- Ollaan kiinnostuneita hyvin harvoin (kerran 50 v) toistuvista myrskytuulista.
- Luonteeltaan dynaaminen kuormitus, tuulen puuskien vaikutus merkittävä.
- Rakenneanalyysissä käytetään ekvivalenttista staattista korvausvoimaa.
- Virtausteknisestä näkökulmasta tuulikuormituksille tyypillisiä piirteitä:
  - Rajakerrosvirtaus (rakennus sijaitsee kokonaan ilmakehän rajakerroksessa)
  - Virtaus voimakkaasti turbulenttia
  - Suuri Reynoldsin luku
  - Maan pinnankarheus hyvin suuri
  - Rakennukset ovat massiivisia (*bluff body*)
  - Monilla rakenteilla riippuvuus Reynoldsin luvusta pientä

# Tuulitekniikka (*wind engineering*)

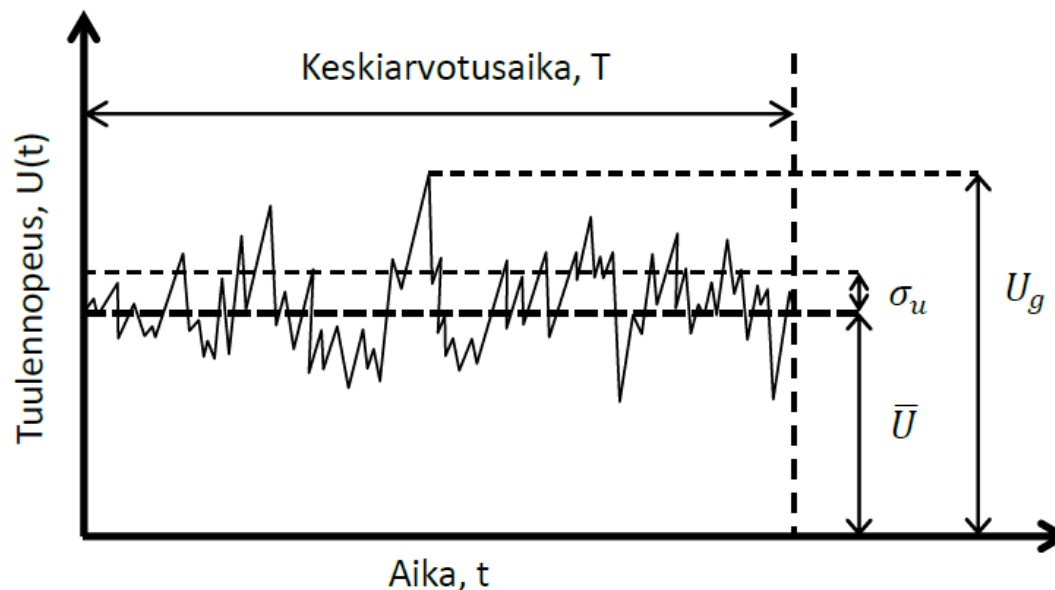
- = Tuulen ja ihmisen sekä ihmisen aikaansaannoksien vuorovaikutuksen järjestelmällinen käsittely.
- Pitää sisällään useita eri aihealueita
    - **Rakennusten tuulikuormat**
    - Painovoimainen ilmanvaihto
    - Katutasen virtausnopeudet (jalankulkijoiden viihtyvyys)
    - Tuulienergia
    - Ilmansaasteiden leviäminen
    - Viistosade
  - Tuulikuormitusnormit perustuvat kokeelliseen tutkimukseen
  - Normit mallintavat laaja-alaisiin matalapaineisiin liittyviä myrskyjä.
    - Ei menetelmiä paikallisille ilmiöille, kuten ukkosmyrskyille tai trombeille.



Kuva: [4]

# Tuulikuorman luonne

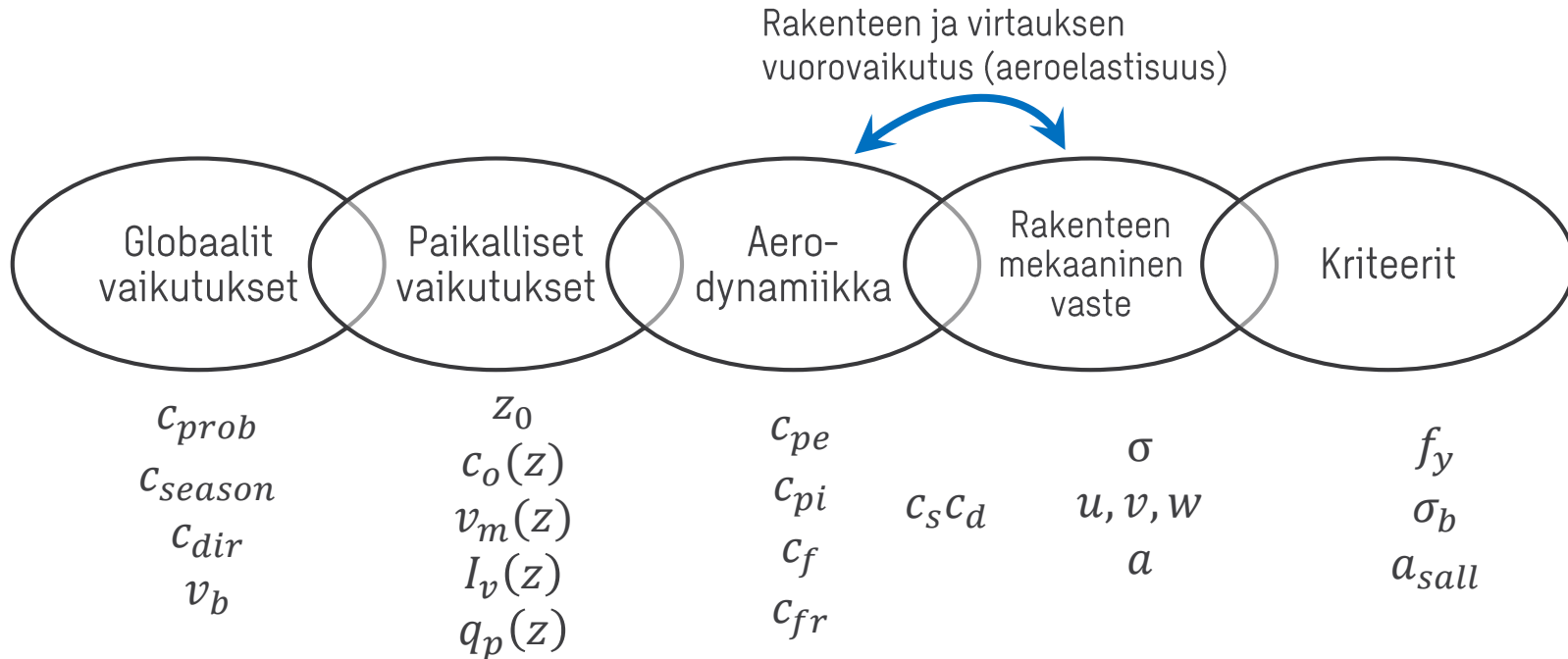
- Luonnon tuuli on käytännössä aina voimakkaasti turbulენტtista
  - Virtaus sisältää paljon kooltaan erilaisia pyörteitä
  - Tuulennopeus vaihtelee kaottisesti
- Merkittävä osuus tuulen turbulenssin energiasta on hyvin suurilla pyörteillä
  - Kooltaan suurimmat pyörteet ovat selvästi rakennusta suurempia
  - Tuulikuormaa voidaan yleensä käsitellä kvasistationaarisena kuormana



**Kuva 2.7.** Tuulennopeus heilahtelee ajan funktiona. Kuvassa myös tuulennopeuden keskiarvo  $\bar{U}$  ja keskihajonta  $\sigma_u$  sekä tuulennopeuden puuska-arvo  $U_g$ .

# Tuulikuormiin vaikuttavat tekijät

## Alan G. Davenportin tuulikuormitusketju



Eri osa-alueiden vaikutus lopputulokseen on syytä tuntea.

Ketju on yhtä vahva kuin sen heikoin lenkki.





- **Alueen yleinen tuulisuus**

- Globaalilla tasolla (meret, sisämaa)
- $v_{b,0}$  (Suomen NA: 21 m/s kaikkialla)

- **Tuulensuunnan vaikutus**

- Tietty ilmansuunta voi painottua (usein mereltä päin tuulee kovempaa)
- $c_{dir}$  (Suomen NA: 1,0 kaikkialla)

- **Kausittainen vaihtelu tuulennopeudessa**

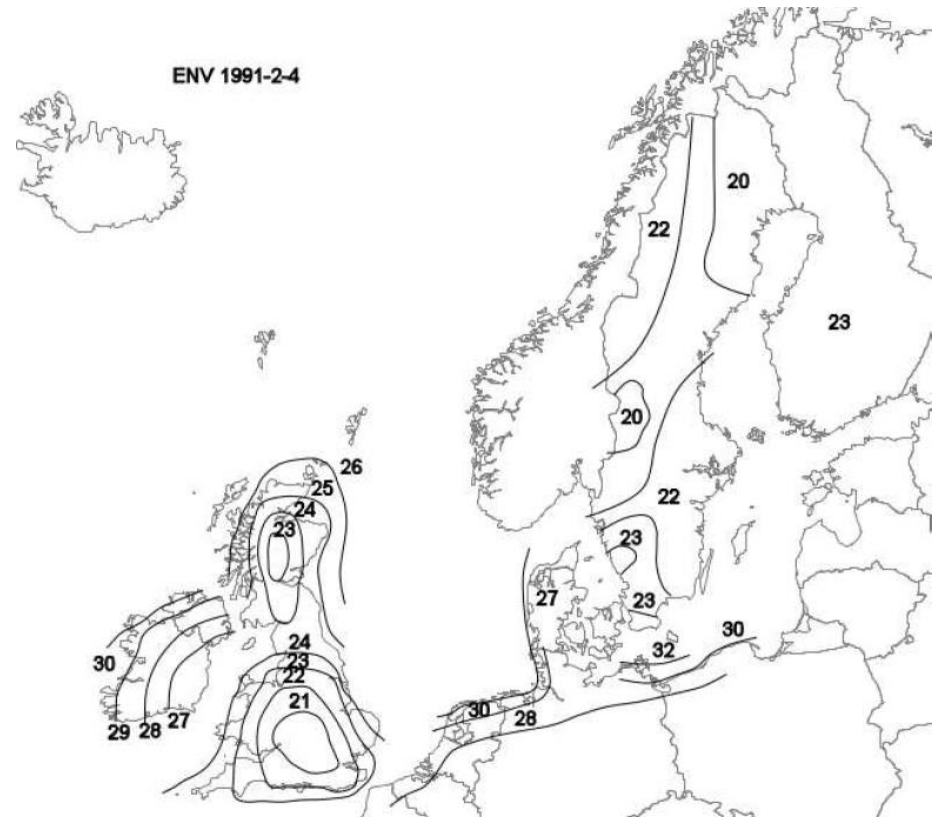
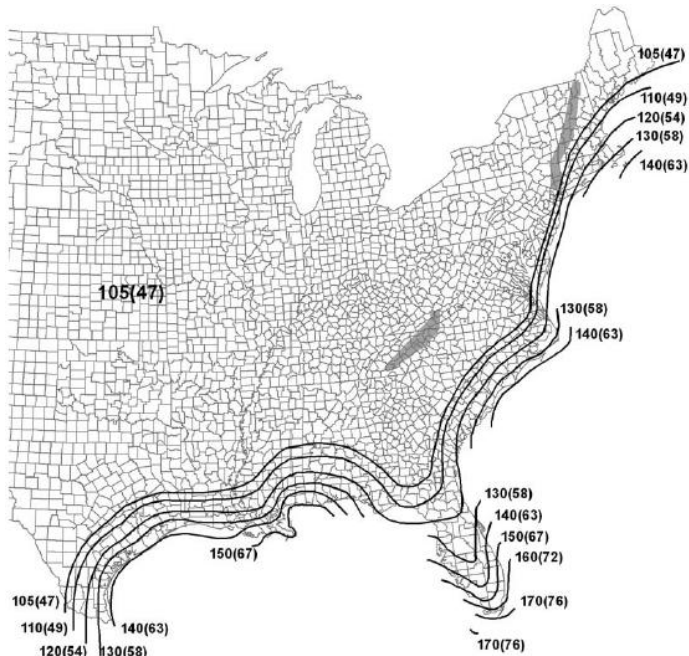
- Pohjoismaisessa ilmastossa kovimmat tuulet esiintyvät yleensä talvikuukausina
- $c_{season}$  (voidaan hyödyntää vain tilapäisrakenteissa)

- **Toistumisajan vaikutus**

- Lähtökohtana keskimäärin kerran 50 vuodessa toistuva tuulennopeus
- $c_{prob}$  (esim. toistumisväli 5 v  $\rightarrow c_{prob} = 0,85 \rightarrow c_{prob}^2 = 0,73$  (paineelle))

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot c_{prob} \cdot v_{b,0}$$

# Globaalit vaikutukset - Alueen yleinen tuulisuus

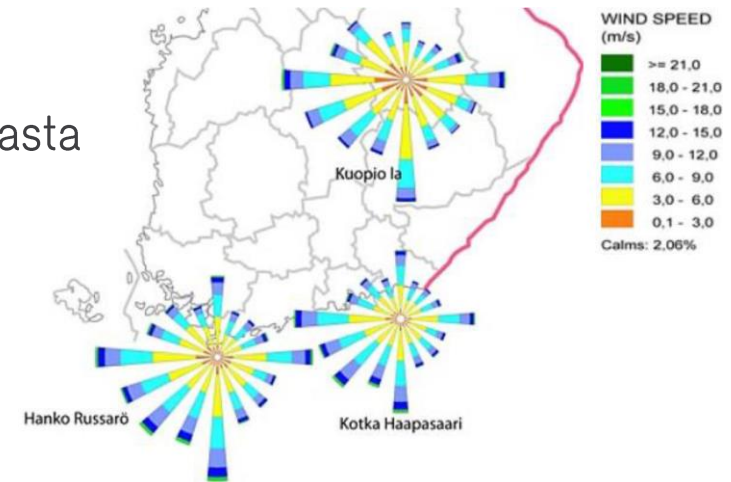
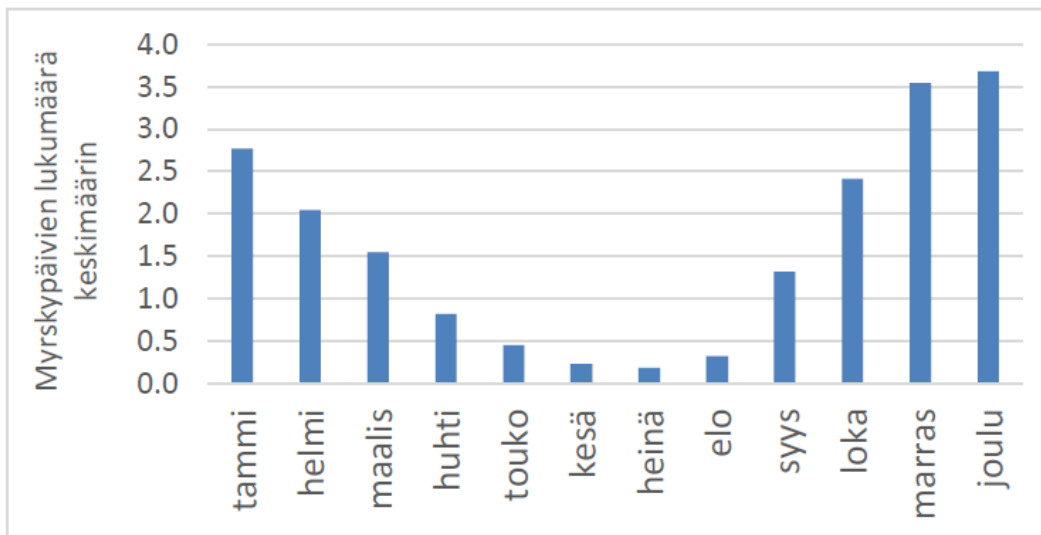


Location	Vmph	(m/s)
Guam	180	(80)
Virgin Islands	150	(67)
American Samoa	150	(67)
Hawaii - <b>Special Wind Region Statewide</b>	115	(51)

# Tuulen suunnan ja vuodenajan vaikutus

- Kovimmat tuulet esiintyvät Suomessa keskimäärin talvikuukausina

- Etelä-Suomessa tuulee useimmiten etelästä, lounaasta tai lännestä



**Kuva 2.11.** Suomen merialueilla havaittujen myrskypäivien keskimääräinen kuukausittainen lukumäärä vuosina 1994-2015. [97]



- **Maanpinnan rosoisuus (aerodynaaminen pinnankarheus,  $z_0$ )**

- Maastoluokat 0, I, II, III, IV
- Rajanveto eri maastoluokkien välillä (EN 1991-1-4, liite A.1)
  - Maastoluokka 0 → 2 km, maastoluokat I-III → 1 km
- Valitaan yleensä suunnittelijan arvion mukaan (Google Maps on hyvä apu)

- **Pinnanmuotojen vaikutus,  $c_o$**

- Mäet ja jyrkänteet kasvattavat tuulennopeutta
- **Pitää** huomioida (liite A.3), jos tuulenpuoleisen maaston kaltevuus on yli 3°

- **Suuret ja huomattavasti korkeammat viereiset rakenteet**

- Korkea rakennus kääntää nopeasti virtaavaa ilmaa alaspäin ja kasvattaa siksi viereisten rakennusten tuulikuormaa.
- **Pitää** huomioida (liite A.4), jos korkean rakennuksen korkeus  $h_{\text{high}} \geq 2 \cdot h_{\text{ave}}$

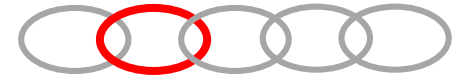
- **Lähellä sijaitsevat tuulelta suojaavat rakenteet**

- Voidaan periaatteessa huomioida, mutta kunnollista ohjeistusta ei EN 1991-1-4 anneta.
- Ei kannata hyödyntää tuulikuorman pienentämiseen, koska viereinen rakennus voidaan purkaa.

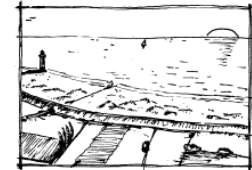


# Lähellä sijaitseva sileämmän maaston maastoluokka

- Tampereen keskustan alueella tuulikuormat tulisi määrittää maastoluokka I mukaan lähellä sijaitsevan Näsijärven ja Pyhäjärven takia.



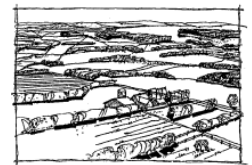
0



I



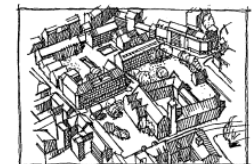
II



III



IV



# Pinnanmuotojen vaikutus

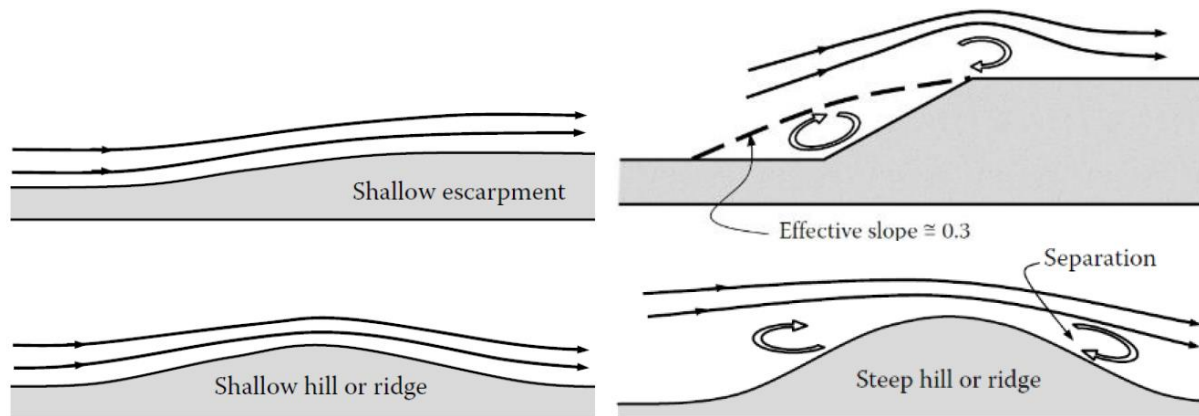
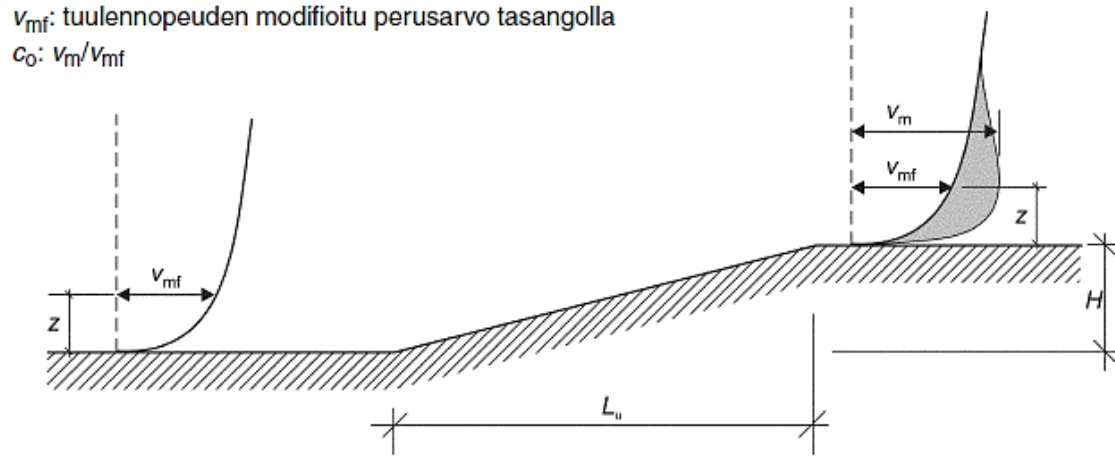
- Tuulenopeus on suurempi mäen laen läheisyydessä



$v_m$ : tuulenopeuden modifioitu perusarvo korkeudella  $z$  maanpinnasta

$v_{mf}$ : tuulenopeuden modifioitu perusarvo tasangolla

$C_0$ :  $v_m/v_{mf}$



**Kuva 2.15.** Loivat (vasemmalla) ja jyrkät (oikealla) rinteet ja mäet. [14, s. 74, 77]

# Tuulen puuskaisuus



- Puuskaisuus huomioidaan turbulenssin intensiteetin avulla

- Maastoluokka 0 → vähäisempi puuskaisuus
- Maastoluokka IV → voimakas puuskaisuus

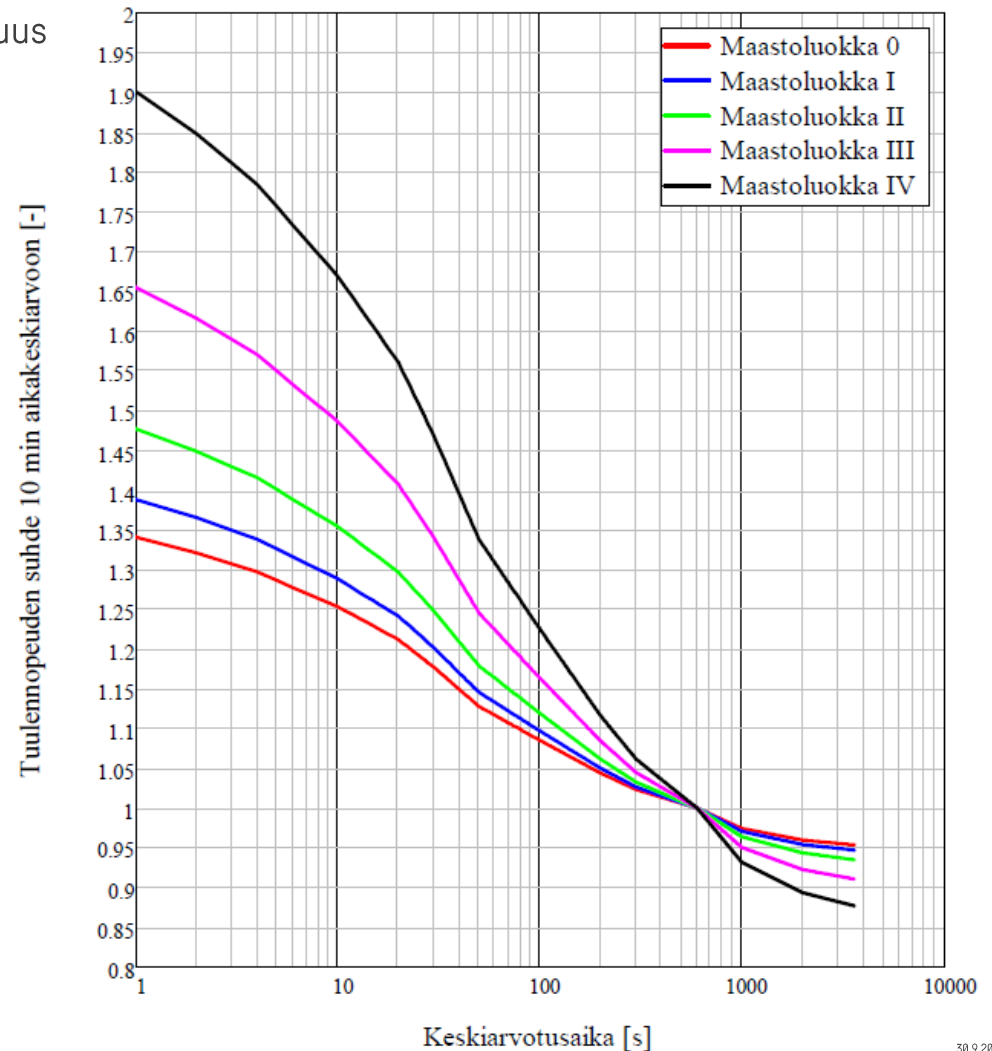
- Tämä puuskaisuus on suuren mittakaavan pyörteilyä (rakennuksen kohtaava virtaus)

- Rakennuksen nurkkien lähellä esiintyy pienipiirteistä rakennuksen generoimaa puuskaisuutta, joka on huomioitu painekertoimissa

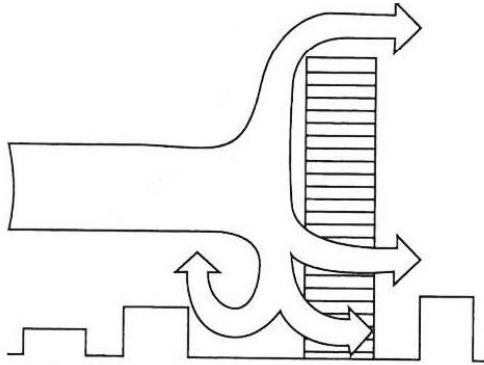
- Puuskaisuuskerroin  $1 + 7 \cdot I_v(z)$  maastoluokasta riippuen 1,8 – 3

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

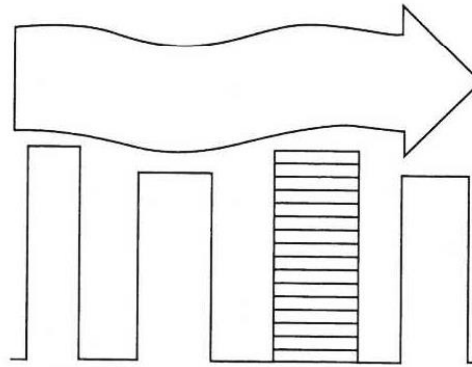
Keskiarvotusajan vaikutus tuulennopeuteen (z = 10 m)



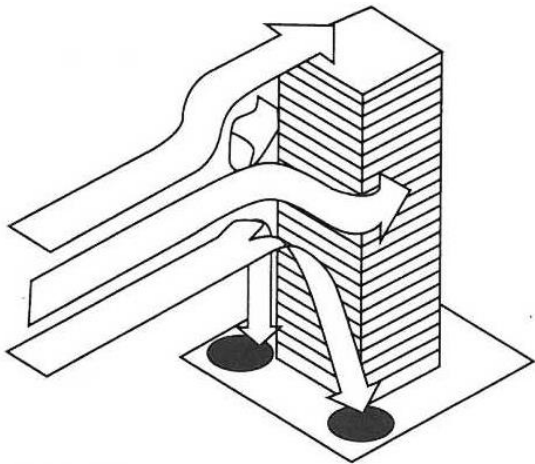
# Esimerkkejä tuulen käyttämisestä rakennuksen ympärillä



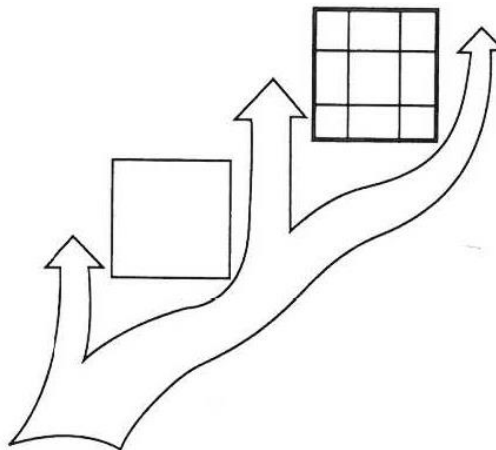
A building significantly taller than its surroundings can experience high wind loads and concentrate pedestrian-level winds



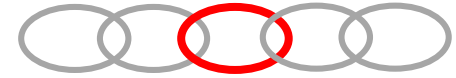
A building of height similar to its surroundings may be protected from large wind loads and concentrated pedestrian winds



A tall building concentrates wind at its base



Adjacent building placement may deflect wind, resulting in higher wind loads and pedestrian-level winds



- **Voimakerroin,  $c_f$**

- Käytetään yleensä sauvamaisille rakenteille tuulikuorman resultantin laskentaan
- $c_{f,0}$  (äärettömän pitkä rakenne) +  $\psi_\lambda$  (virtaus rakenteen pään ohi, päätevaikutuskerroin)

- **Ulkoisen paineen painekerroin,  $c_{pe}$**

- Normissa on määritelty tuulilohkot, joille on taulukoidut arvot erilaisille seinille ja katoille
  - Joillekin lohkoille on annettu kaksi eri arvoa → molemmat tulisi huomioida.
- Paine kerroin riippuu rakenneosan kuormituspinta-alasta (ei tuulilohkon koosta)

- **Sisäisen paineen painekerroin,  $c_{pi}$**

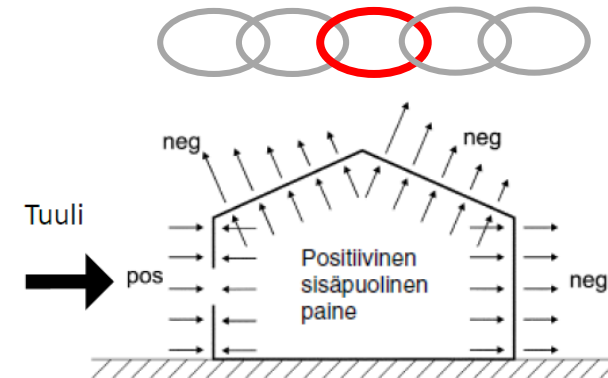
- Riippuu rakenteen vaipan aukkojen koosta ja aukkojen kohdalla vallitsevista ulkoisista paineista.
- Jos rakenteessa ei ole merkittäviä aukkoja, käytetään yleensä arvoja  $c_{pi} = -0,3 / +0,2$

- **Kitkan vaikutus,  $c_{fr}$**

- **Pitää** huomioida laajoilla pinnoilla (matalat ja laajarunkoiset hallirakennukset)
- Ei tarvitse huomioida, jos  $A_{w,0} \leq 4 \cdot A_{w,90}$  (esim. raja-arvosta: halli 10 m x 20 m x 40 m)

## • Paineiden merkisäännöt

- Positiivinen arvo = ulko- tai sisäpintaan kohdistuva ylipaine
- Negatiivinen arvo = ulko- tai sisäpintaan kohdistuva alipaine



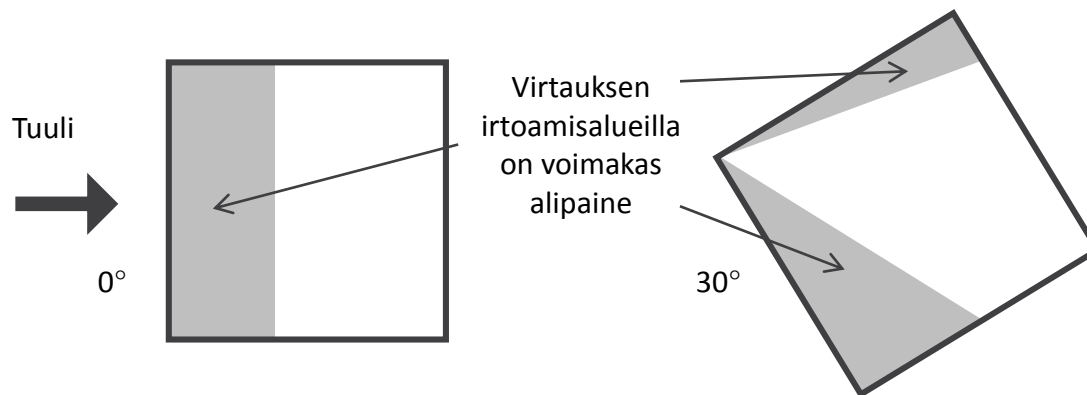
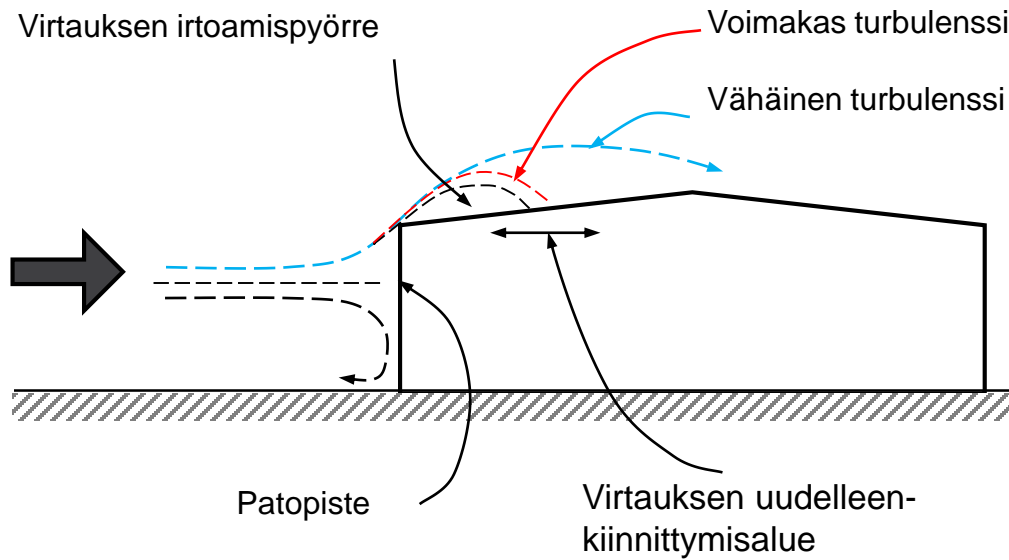
## • Dimensiottomien paine- ja voimakertoimien käyttö

- Täytyy ymmärtää mitä kertoimet pitävät sisällään
- Suorakulmaisen rakenteen painekertoimet huomioivat tuulensuunnat  $-45^\circ \dots +45^\circ$ 
  - Riittää, että tarkastellaan suorakulmaiset pääsuunnat  $\rightarrow$  4 tarkasteltavaa tuulensuuntaa
- Paine kertoimet huomioivat ”pienen mittakaavan” puuskaisuutta
  - Siksi painekertoimien taulukoissa on tietyille tuulilohkoille kahdet arvot
- Kerroin pätee aina tietylle puuskanopeuspaineen määrittystavalle
- Voimakertoimen yhteydessä puuskanopeuspaine määritetään rakennuksen huipun korkeudella
- Voimakertoimen perusteella määritetty resultantti jaetaan rakenteelle viivakuormaksi

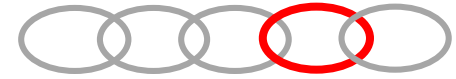
## • Tuulikuorman vaikutusala

- Tuulen ”näkemä” rakennuksen projektioala

# Aerodynamiikka – Rakenteen muodon vaikutus



# Rakenteen mekaaninen vaste - Dynaamisuus



- **Koon vaikutuskerroin,  $c_s \leq 1,0$**

- Huomioi tuulenpaineen huippuarvojen esiintymisen eriaikaisuuden tietyllä pinnalla
- Pinta-alan kasvaessa tuulikuorma pienenee

- **Dynaaminen kerroin,  $c_d \geq 1,0$**

- Riippuu rakenteen ominaistaajuudesta (alin tuulensuuntainen taivutusvärähtelymuoto)
- Huomioi tuulen turbulentsuudesta aiheutuvan rakenteen värähtelyn aiheuttamat hitausvoimat **tuulen suunnassa**

- **Rakennekerroin,  $c_s c_d$**

- Rakenteen koon ja dynaamisuuden vaikutus samassa paketissa
- Arvo tavanomaisesti lähellä 1,0



# Mitoituskriteerit tuulikuormaan liittyen



- **Kestävyys ja stabiilisuus**

- **Siirtymät ja taipumat**

- Toiminnalliset ja esiteettiset vaatimukset

- Eurokoodissa ja Suomen kansallisissa liitteissä annetaan **suositus**arvot taipumille ja siirtymille

- Rakennuksen vaakasiirtymät

- 1- ja 2-kerroksinen rakennus:  $H / 150$  esim.  $H = 7 \text{ m}$  → max siirtymä: 47 mm

- Muut rakennukset:  $H / 400$  esim.  $H = 40 \text{ m}$  → max siirtymä: 100 mm

- Taipumat

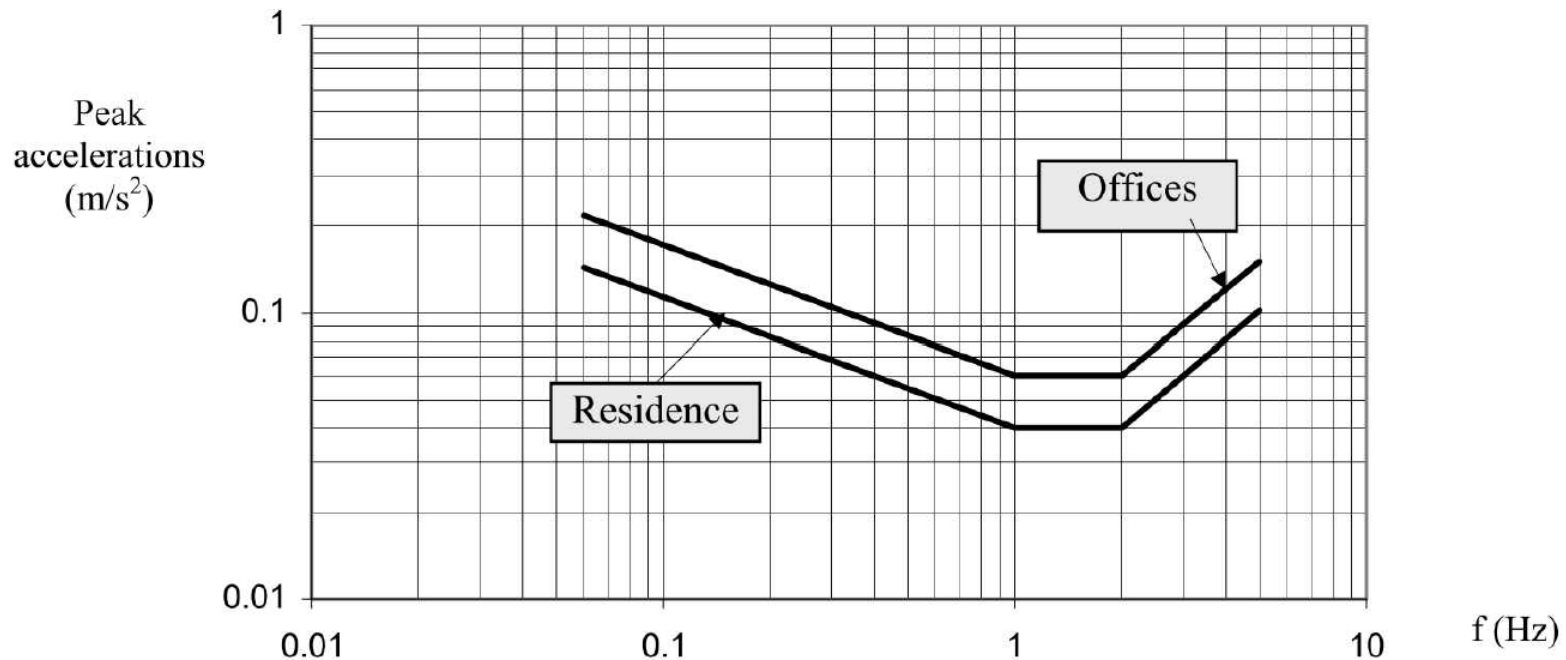
- Seinäorret:  $L / 150$  esim.  $L = 6 \text{ m}$  → max taipuma: 40 mm

- Muotolevyt seinissä:  $L / 100$  esim.  $L = 6 \text{ m}$  → max taipuma: 60 mm



## • Kiihtyvyys

- Ihmiset kokevat tuulen aiheuttamat värähtelyt epämiellyttäväiksi → pahoinvointia
- Värähtelyn epämiellyttävyys riippuu sen taajuudesta
  - Kiihtyvyyden sallittu maksimiarvo riippuu rakennuksen ominaistaajuudesta
  - Suositusrajat kiihtyvyyden huippuarvolle (1 v tuulella) esim. ISO 10137
- Korkeissa rakennuksissa tuulen aiheuttama kiihtyvyys voi muodostua määrääväksi.



# Muutamia yksityiskohtia tuulieurokoodista

- Tuulenpuoleisen ja suojanpuoleisen seinän paineiden korreloimattomuus
  - EN 1991-1-4, 7.2.2 (3)
  - Ilmiö esiintyy matalilla rakennuksilla
  - Tuulikuorman tuulensuuntaiselle resultantille pienennyskerroin 0,85 – 1,0
  - Voidaan hyödyntää, mutta vain jäykistysjärjestelmän mitoitusessa
    - Lähinnä seinäsiteiden mitoituksessa
    - Yksinkertaisuuden vuoksi kannattaa jättää hyödyntämättä
- Onnettomuustilanteen tuulikuormitus
  - Ikkunoiden ja ovien oletetaan yleensä olevan suljettuja kovalla tuulella
  - Jos esim. ikkuna rikkoutuu myrskyssä, tarkastellaan sitä onnettomuustilanteena
    - Sisäinen paine nousee
    - Tilanne voi muodostua mitoittavaksi esim. kattoristikoiden kiinnitysten osalta.
  - Sisäisen paineen viivettä voidaan arvioida lausekkeella

$$T_c \approx 1,21 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{V}{A} \cdot \sqrt{\Delta p}$$

$$U = 21 \frac{m}{s}, \quad \rho = 1,25 \frac{kg}{m^3}, \quad c_{pe} = 0,8, \quad c_{pi} = -0,3$$
$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho U^2 \cdot (c_{pe} - c_{pi}) = 303 \text{ Pa}, \quad V = 200 \text{ m}^3$$

$$A = 0,02 \text{ m}^2$$
$$T_c = 21 \text{ s}$$

$$A = 1 \text{ m}^2$$
$$T_c = 0,4 \text{ s}$$

- Korkean rakennuksen poikittainen värähtely ja vääntövärähtely
  - Pyörreratailmiö (vortex shedding) esim. Savupiipuissa
  - Pyörreratailmiö herää tasaisella häiriöttömällä virtauksella
- Aeroelastiset ilmiöt
  - Kytkeyty tapaus, jossa rakenteen muodonmuutokset ja virtaus rakenteen ympärillä vuorovaikuttavat toisiinsa
  - Ilmenee mm. vääntöjäykkyydeltään löysissä rakenteissa (esim. riippusillan kansirakenne)
  - Aeroelastisten ilmiöiden herääminen pyritään estämään
- Lähellä sijaitsevan rakenteen virtausvanassa esiintyvä puuskaisuus (vanavärähtely)
- Lumen ja jään kertyminen voi muuttaa rakenteen muotoa ja vaikuttaa ratkaisevasti aerodynaamiseen käyttäytymiseen
  - Esim. radiomaston jäätyminen (jopa umpeen)

# Tuulikuormitusnormien erot

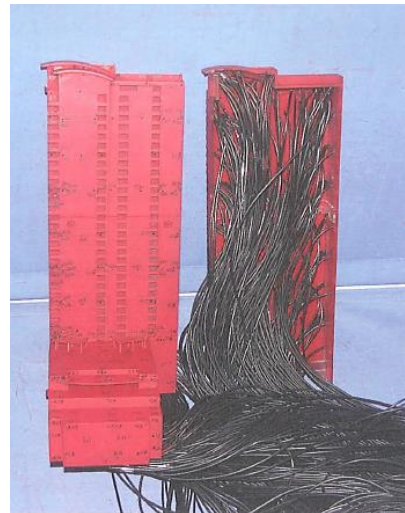
- Käytännössä sama teoria eri normien taustalla
  - Erot tuulennopeuden perusarvon määrittelyssä (3 s, 10 min tai 1 h keskiarvo)
  - Erot mitoituksessa käytettävän tuulennopeuden keskimääräisessä toistumisvälissä
- Ero lopputuloksissa johtuvat paljolti siitä, että painekertoimet on määritetty eri tuulitunnelikokeiden perusteella

*Taulukko 2.9. Toimistorakennuksen tuulensuuntainen leikkausvoima ja taivutusmomentti perustuksilla laskettuna eri tuulikuormitusnormeilla [74].*

Country/Region			Code/Standard	Base shear Q [kN]	Base bending M [MNm]
Australia/New Zealand	AN	AS/NZS1170.2:2002		5 727	150
Canada	NB	NBCC-2005		5 332	142
<b>China</b>	<b>CH</b>	<b>GB50009-2001</b>		<b>3 282</b>	<b>99</b>
Hong Kong	HK	CP-2004		4 573	116
India	IN	IS875(Part 3)-1987		4 957	131
<b>Indonesia</b>	<b>IA</b>	<b>SNI-03-1727</b>		<b>7 477</b>	<b>210</b>
Japan	JA	AIJ-RLB-2004		5 061	132
Korea	KO	KBC-2005		5 534	134
Malaysia	MA	MS1553-2002		5 698	152
Philippines	PH	NSCP-2001		5 026	128
Singapore	SI	(draft)		6 556	163
Taiwan	TA	TBC		3 738	100
Thailand	TH	EIT-1018-46		3 737	97
United States	US	ASCE 7-05		4 108	117
Vietnam	VI	TCVN2737-1995		6 423	165
<b>Eurocode</b>	<b>EU</b>	<b>EN 1991-1-4</b>		<b>6 042</b>	<b>182</b>
Mean				5 204	139
Coefficient of variation (%)				22	22

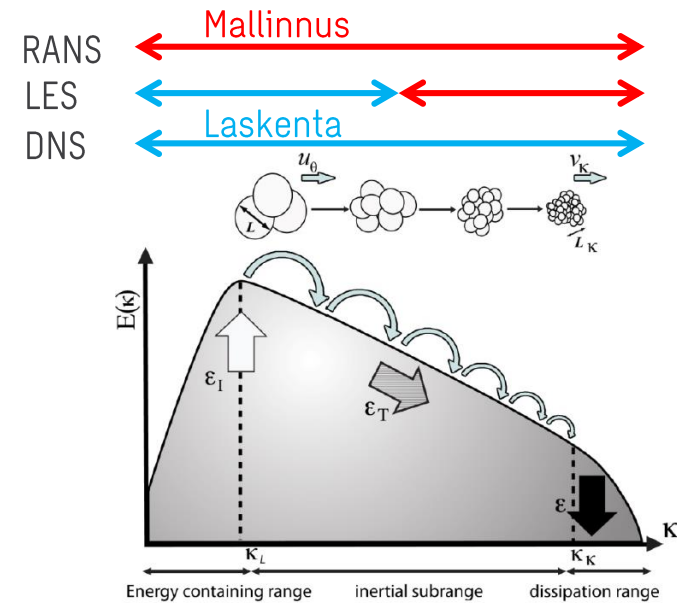
# Tuulitunnelikokeet

- Pienoismalleilla tehtäviä kokeita (mallin mittakaava 1:200 – 1:500)
  - Tuulitunneliin luodaan turbulenttinen ilmakehän rajakerrosta mallintava virtaus
  - Pienoismalli voi olla jäykkä tai joustava (aeroelastinen malli)
  - Tietyt dimensiottomat virtausta kuvaavat suureet täytyy saada similaarisiksi todellisen rakennuksen kanssa
    - Nopeusprofiilin muotoa kuvaava Jensenin luku on tärkeä,  $Je = \frac{h}{z_0}$
    - Riippuvuus Reynoldsin luvusta on terävänurkkaisilla rakenteilla melko pientä
- Voidaan mitata pienoismallin resultanttivoimaa tai pintapaineita monesta pisteestä



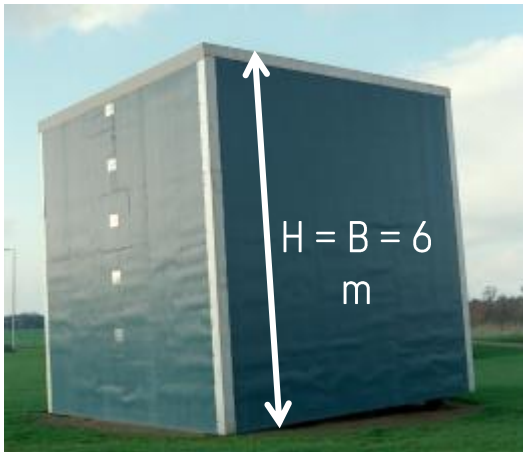
# Virtauslaskenta tuulitekniikassa

- Laskennallinen tuulitekniikka (*CWE, computational wind engineering*)
- RANS-laskenta on realistisin vaihtoehto tuulitekniikan sovellutuksiin.
- RANS-laskennan haasteita:
  - Suuri pinnankarheus
  - Nopeus- ja turbulenssiprofiilien säilyminen
    - Reunaehtojen ja turbulenssimallin yhteensopivuus
  - Virtauksen suuri turbulentsisuus ( $TI \approx 0,1..0,3$ )
- LES-laskennalla on saatu hyviä tuloksia, mutta vielä on haasteita.
  - Sopivien ajastariippuvien reunaehtojen valitseminen haastavaa.
- Virtauksen ja rakenteen vuorovaikutuksen (*FSI, flow-structure interaction*) analysointi mahdollista, mutta hyvin laskentaintensiivistä.



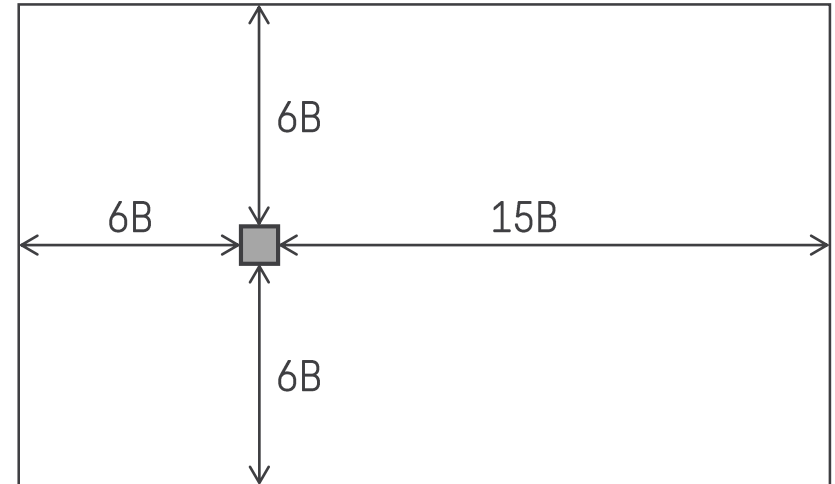
# Virtauslaskennan soveltaminen Silsoen kuutioon

- Lohkorakenteellinen laskentaverkko, noin 1,8 milj. laskentatilavuutta.
- SST  $k-\omega$  -malli lähteen [13] mukaan muokatuilla malliparametreilla.

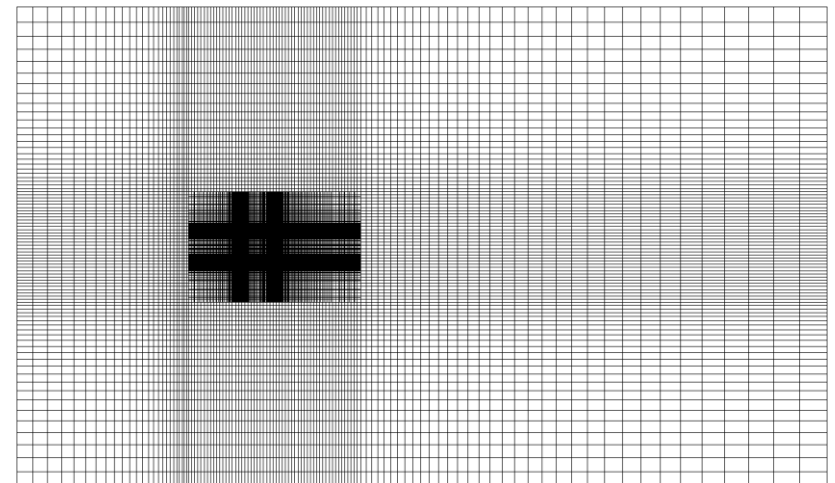


Kuva: [9]

Tuuli  

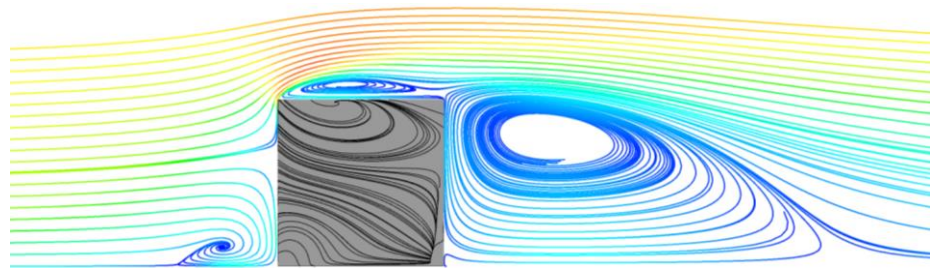
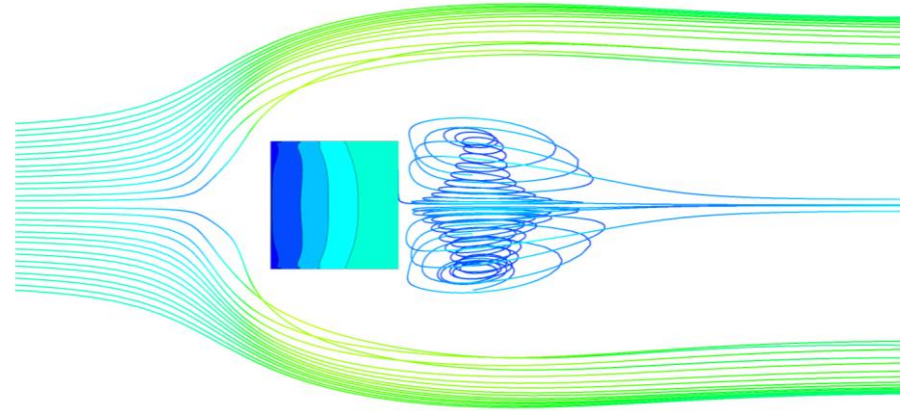
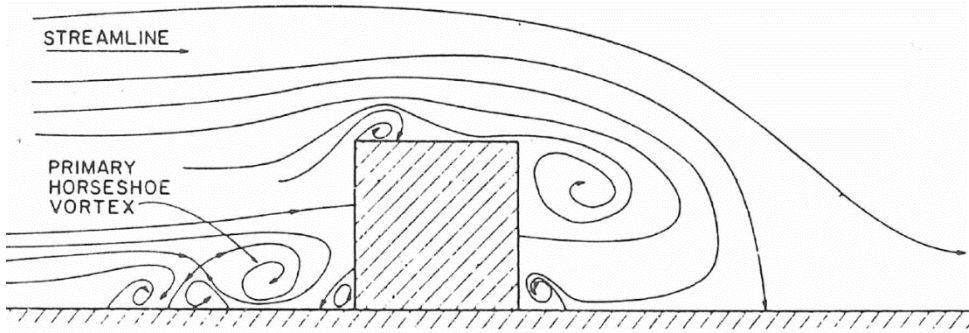
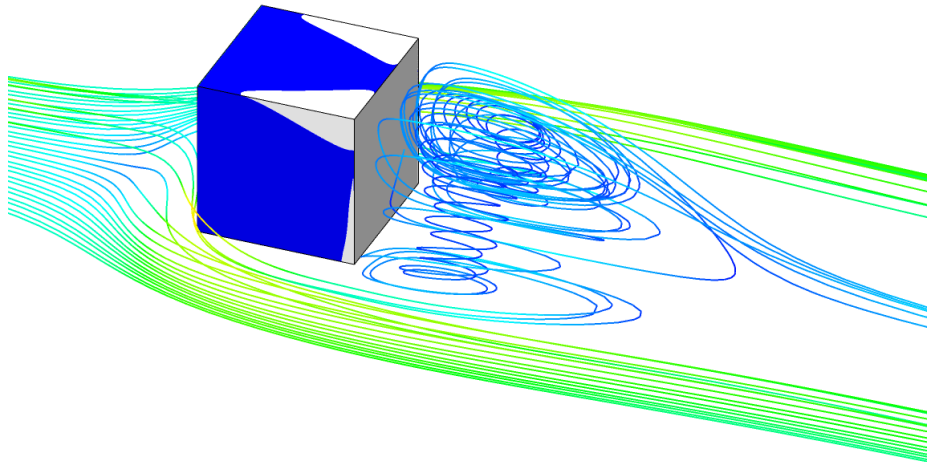
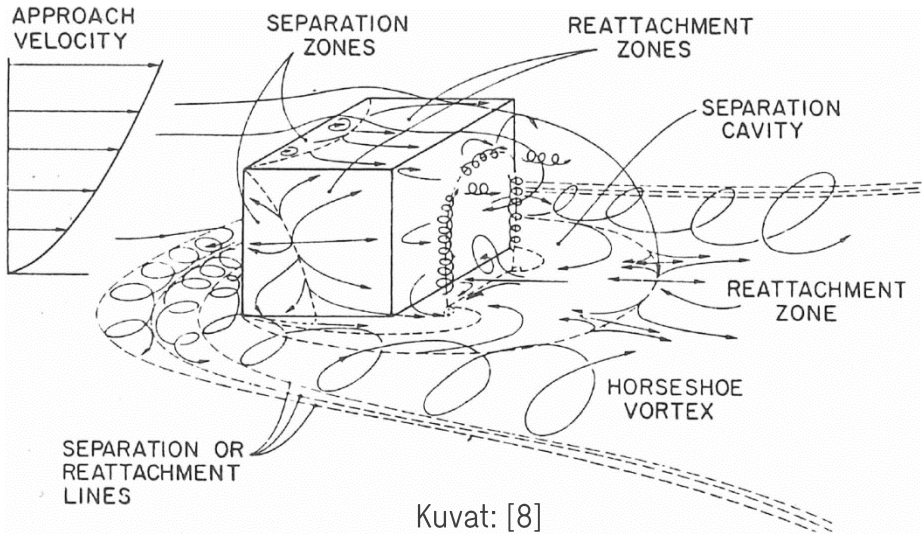



Kuva: [10]



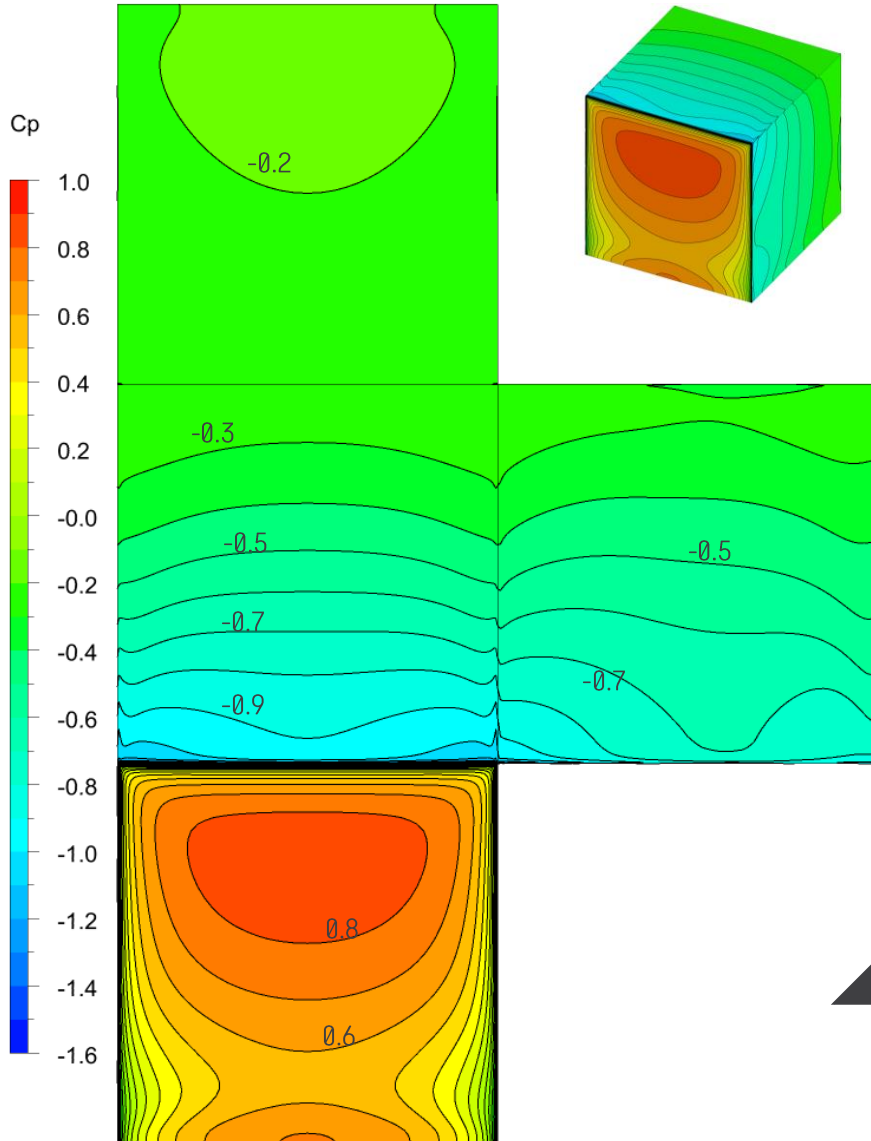


# Virtauslaskennan soveltaminen Silsoen kuutioon

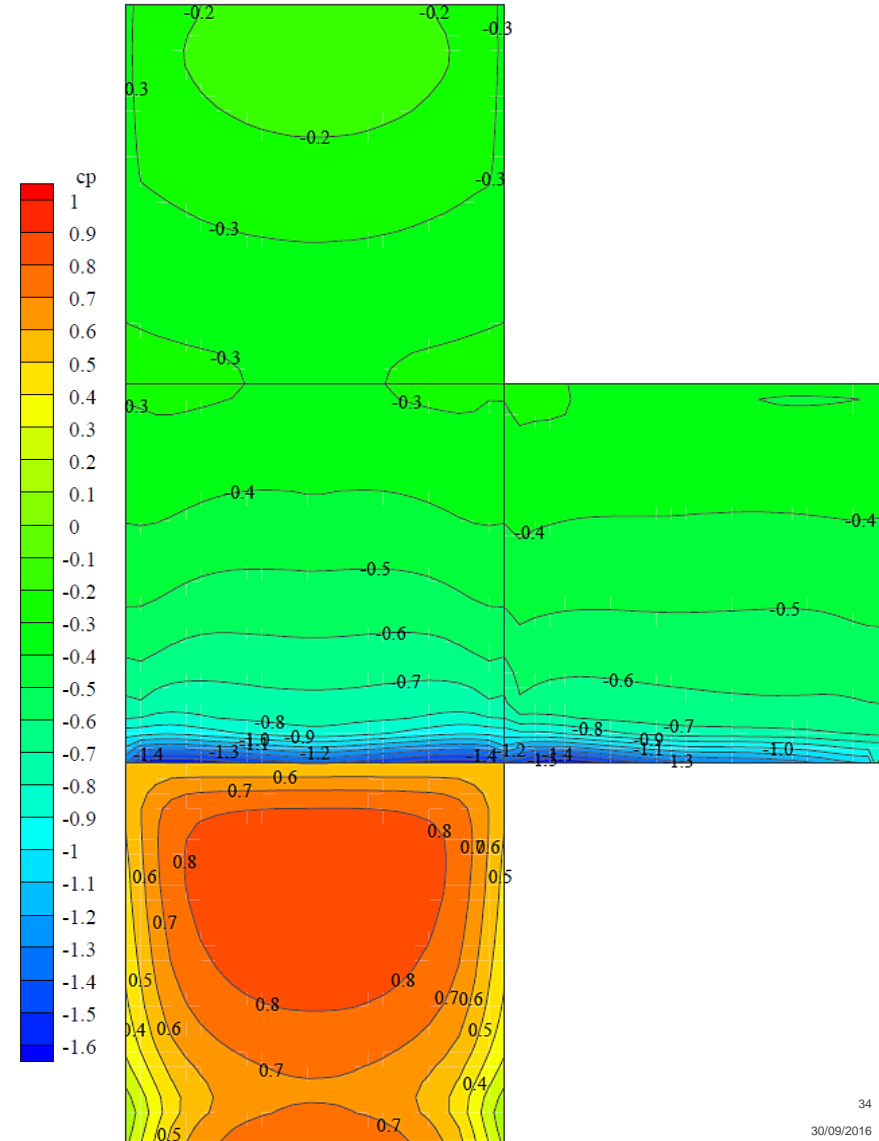


# Virtauslaskennan soveltaminen Silsoen kuutioon

Tämä tutkimus SST k- $\omega$  (muokattu, [13])

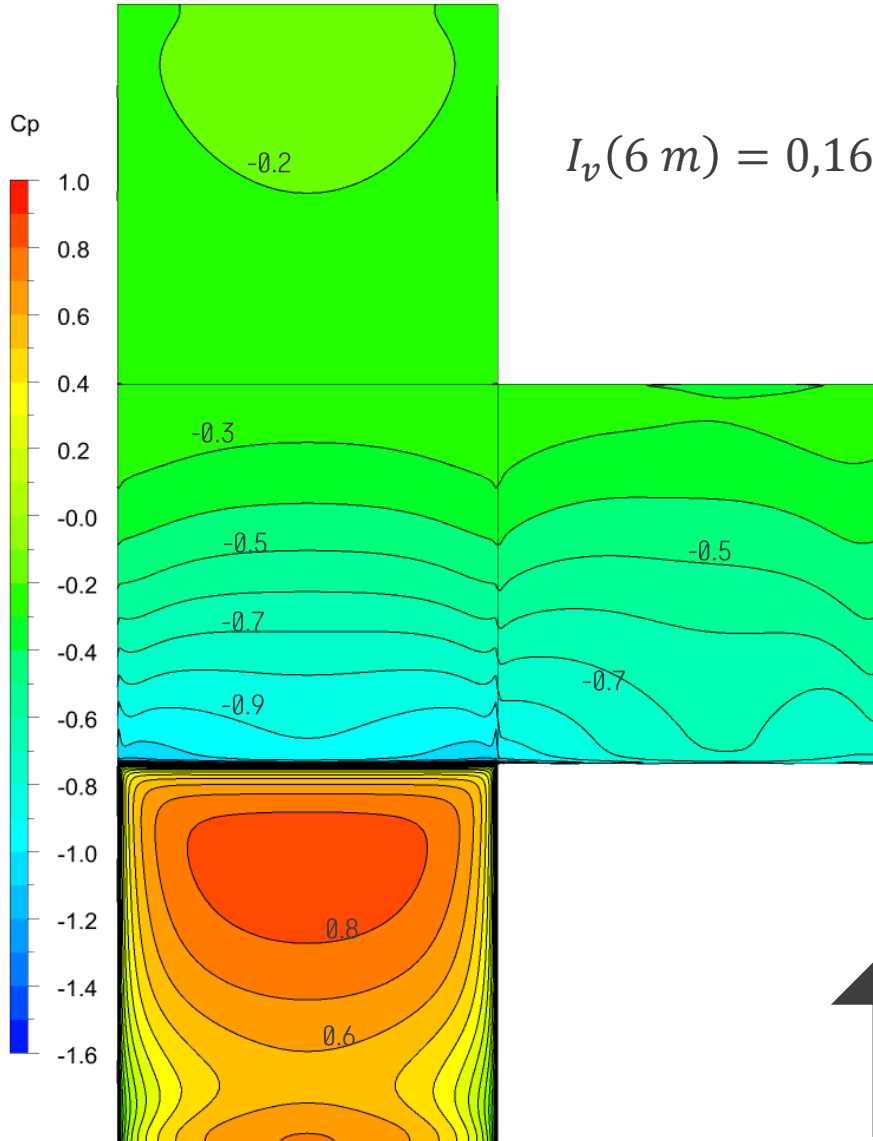


k- $\epsilon$  MMK (Lopes, [11])

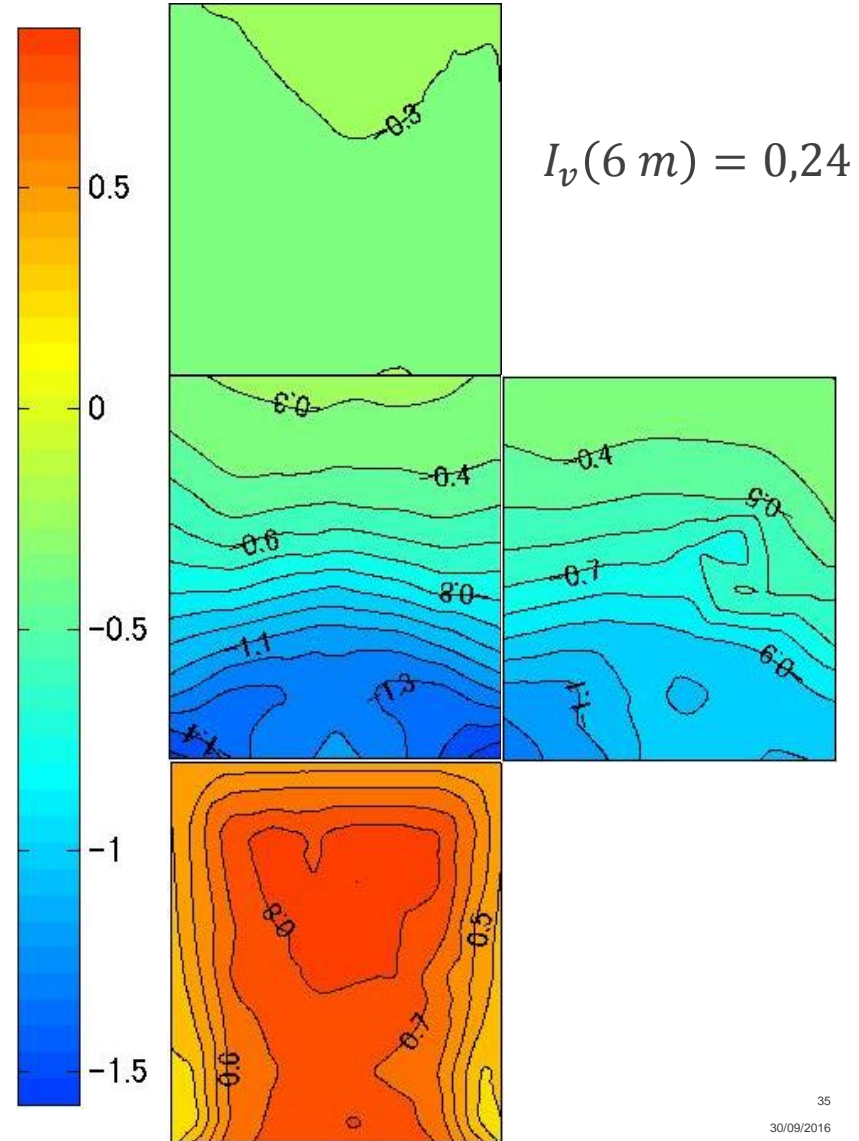


# Virtauslaskennan soveltaminen Silsoen kuutioon

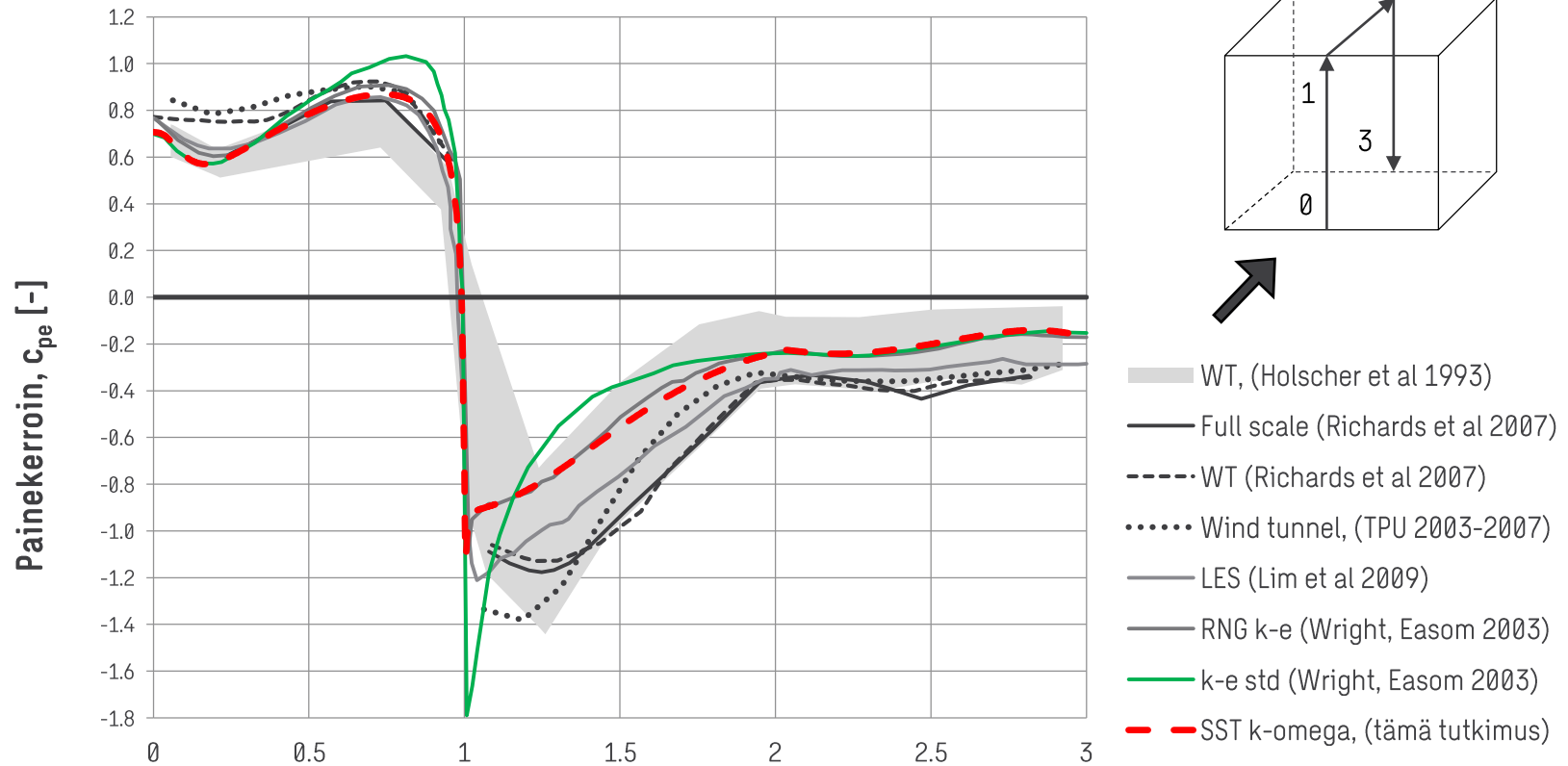
Tämä tutkimus SST k- $\omega$  (muokattu, [13])



TPU tuulitunneli [12]

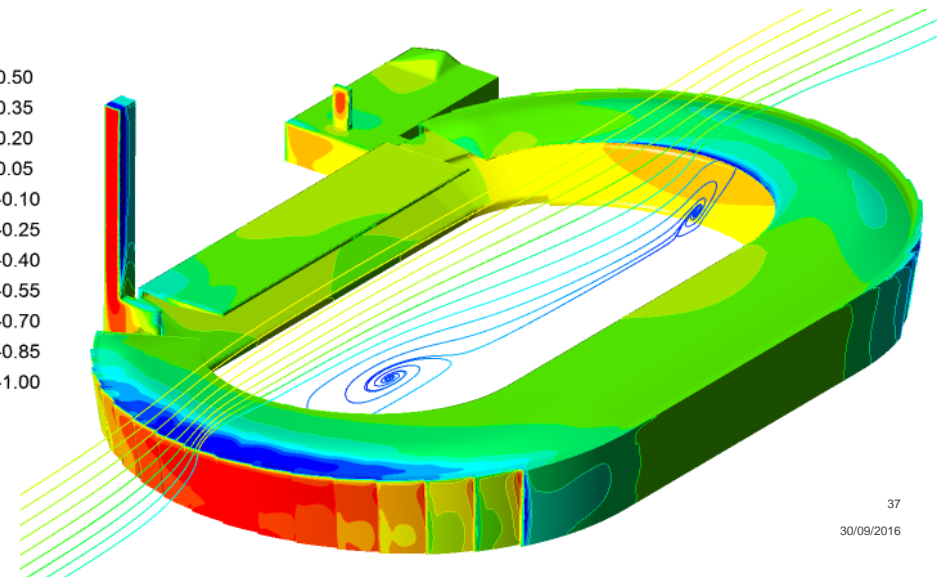
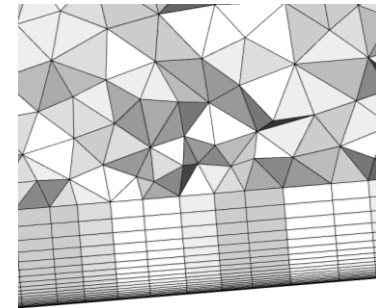


## Painekertoimet Silsoen kuution keskilinjalta



# Olympiastadionin katosten tuulikuormat

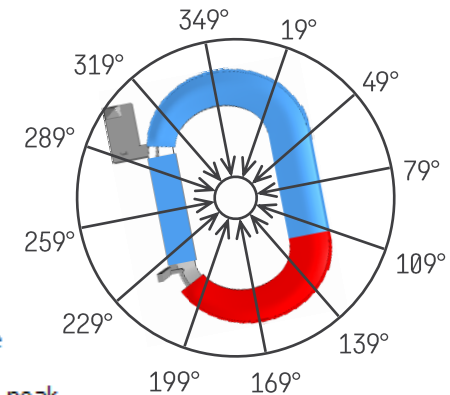
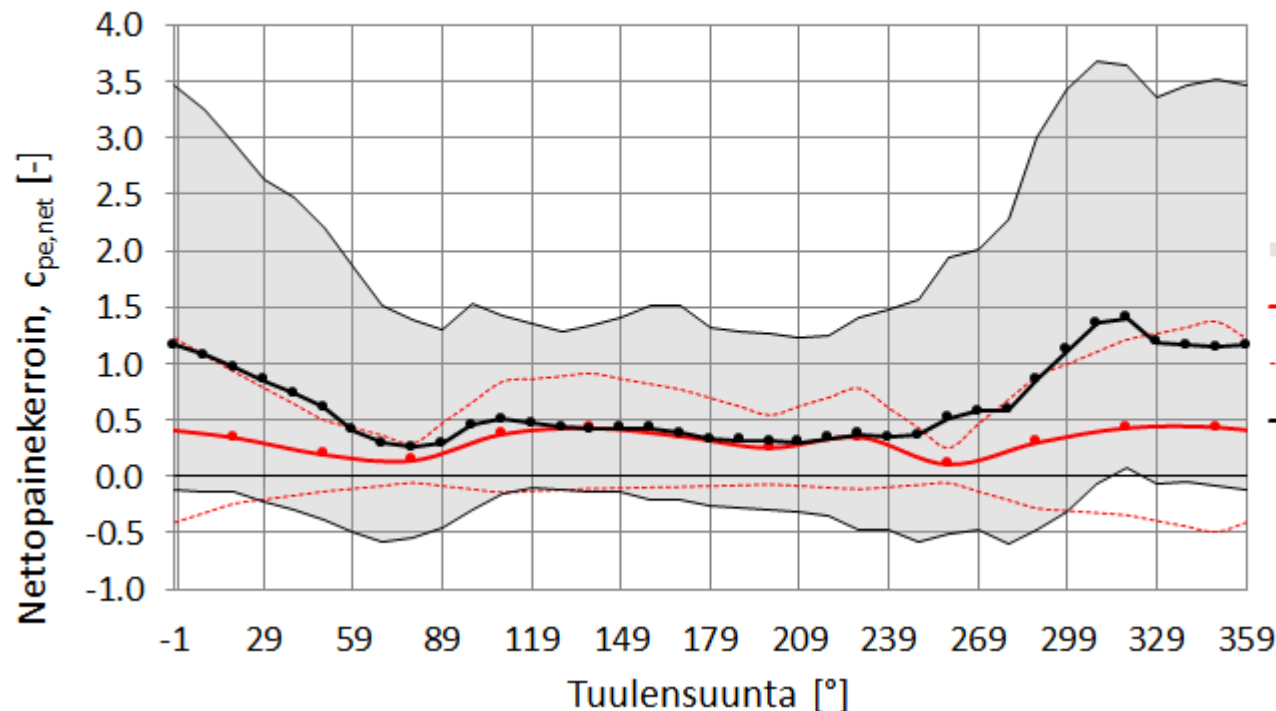
- Helsingin Olympiastadionin peruskorjauksen yhteydessä myös kaarteiden katsomot katetaan.
- Alustavassa katosten rakennesuunnittelussa käytettyjen tuulikuormien määrittämisessä hyödynnettiin virtauslaskentaa.
- Lähtökohdiltaan sovelluskohde on virtausteknisesti haastava
  - Tutkittava alue on kokonaan kaarevaa kattoa.
  - Virtaviivainen rakenne, keskimääräiset paineet melko pieniä.
  - Hoikka rakenne → dynaamiset ilmiöt.
- Laskenta-asetukset samoin kuin Silsoen kuutiossa
- Kaukana rakenteellinen heksaedriverkko, lähellä tetraedriverkko
  - Noin 12 milj. laskentatilavuutta.
  - Yli 60 % laskentatilavuuksista rajakerrostihennyksessä.



# Olympiastadionin katosten tuulikuormat

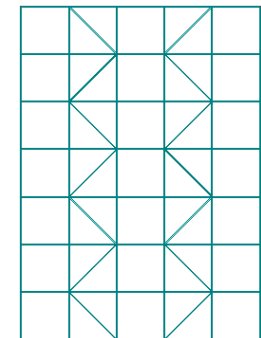
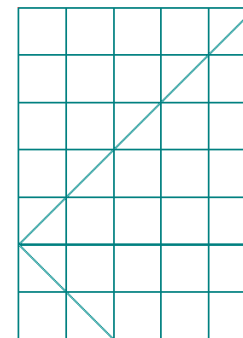
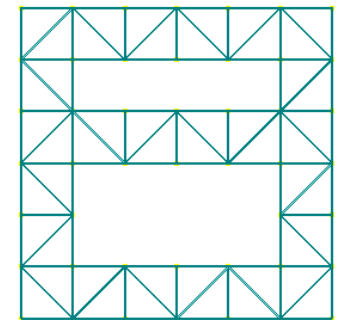
- CFD-analyysillä ja tuulutunnelikokeilla määritetyistä suureista keskimääräisen virtauksen nettopaine kertoimet ovat parhaiten verrattavissa toisiinsa.
- Puuskaisuuden vaikutus arvioitu karkeasti normin hengessä.
  - Lopullisten tuulikuormien vertaaminen ei niin mielekästä (CFD vs tuulutunneli).

## Eteläkatoksen keskimääräinen nettopaine kerroin



# Rakennusten jäykistyksen suunnittelusta

- Masto- tai kehäjäykistys (esim. laajarunkoiset hallirakenteet)
- Levyjäykistys (esim. betoniset kerrostalot)
- **Ristikkojäykistys** (esim. korkeat teräsrakenteet)
  - Jäykistysjärjestelmän osat: pilarit, ulkoseinien vinositeet ja seinäpalkit, jäykistävät tasot
  - Erilaisia seinäsiteiden järjestelyitä riippuen kuormista
  - Tuulikuormien kannalta mahdollisimman jäykkä runko on hyvä
    - Seinäsiteet levitetään mahdollisimman leveälle
  - Jäykistävät tasot pyritään sijoittamaan tasaisin välein
  - Tasot kolmioidaan vinositeillä, pyritään yksinkertaisuuteen ja symmetrisyyteen
- Hyödynnetään stabiloivaa pystykuormaa
  - Seinän vinositeen lähtöä nurkkapilarista pyritään välttämään
    - Nurkkapilarilla vähän pystykuormaa
    - Perustusliitos nurkkapilariin hankala, jos halutaan epäsymmetrinen liitos
- Voimalaitoksissa yleensä paljon rajoitteita
  - Paljon laitteita, putkistoja ja huoltokäytäviä prosessin takia



- Tuulikuorma määräytyy monen osatekijän perusteella



- Eri tuulikuormitusnormeissa on yllättävän suuria eroja
- Tuulitunnelikoe on tarkin tapa määrittää rakenteen tuulikuorma
- Virtauslaskenta on lupaava menetelmä, jolla on kiistattomia etuja, mutta
  - Tietokoneiden laskentateho ei ole vielä riittävällä tasolla käytännön sovellutuksiin
  - Virtauslaskenta sopii parhaiten eri vaihtoehtojen vertailuun ja alustavaan laskentaan
  - Vaatii laskijalta vankkaa asiantuntemusta ja tervettä kriittisyyttä tuloksia kohtaan
- Hyvän jäykistysjärjestelmän suunnittelu vaatii harjaantunutta silmää
  - Peruseriaatteet ovat kuitenkin yksinkertaisia:  
Rakenteiden kolmiointi, symmetria, stabiloivan pystykuorman hyödyntäminen



- Keskeiset asiat tuulikuorman määrittämisessä EN 1991-1-4 mukaan

## Tuulennopeuden perusarvo

$$v_b = c_{\text{prob}} \cdot c_{\text{dir}} \cdot c_{\text{season}} \cdot v_{b,0}$$

## Maaston rosoisuuden ja pinnanmuotojen vaikutus

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b$$

## Puuskaisuuden vaikutus

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

## Rakenteen aerodynamiikan (geometrian ja aukkojen) vaikutus

- Rakenneosan kuormituspinta-ala
- ( $c_{pe}$  tai  $c_f$ ) ja  $c_{pi}$

## Rakenteen koon ja dynaamisuuden vaikutus (rakennekerroin)

$$c_s \leq 1 \quad \text{ja} \quad c_d \geq 1$$

## Muut huomioon otavat asiat:

- Lähellä sijaitsevat korkeat rakennukset
- Kitka
- Vääntöä aiheuttava tuulikuorma
- Aeroelastiset ilmiöt
- Tuulen- ja suojanpuoleisen seinän paineiden samanaikaisuus

## Tuulikuorma

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{\text{ref}}$$

$$F_{w,e} = c_s c_d \cdot c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{\text{ref}}$$

$$F_{w,i} = c_{pi} \cdot q_p(z_i) \cdot A_{\text{ref}}$$

# Lähteet

SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat – tuulikuormat.

ISO 4354:2009. Wind actions on structures.

RIL 201-1-2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Eurokoodit EN 1990, EN 1991-1-1, EN 1991-1-3, EN 1991-1-4.

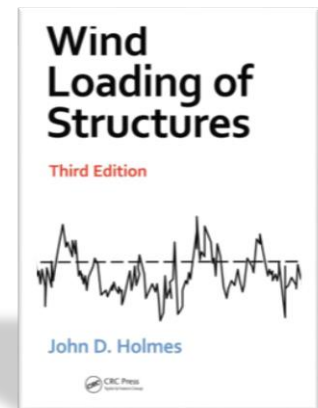
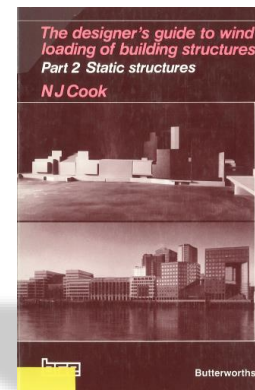
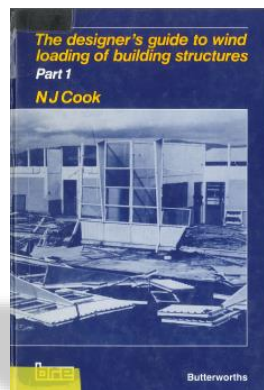
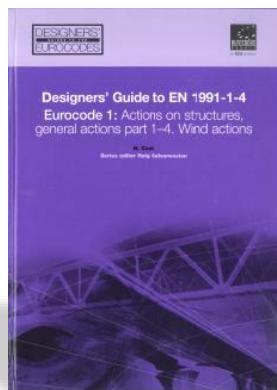
Cook, N.J. Designer's Guide to EN 1991-1-4 Eurocode 1: Actions on structures, general actions part 1-4. 2007.

Cook, N.J. The designer's guide to wind loading of building structures - Part 1. 1985.

Cook, N.J. The designer's guide to wind loading of building structures - Part 2. 1990.

Holmes, J.D. Wind Loading of Structures. 3rd Edition. 2015.

Soini, J. Numeerisen virtauslaskennan käyttö tuulikuormien määrittämisessä. Diplomityö. 2016.



1. [http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info\\_center/ITcontent.html](http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/ITcontent.html)
2. [http://en.wikipedia.org/wiki/Tacoma\\_Narrows\\_Bridge\\_\(1940\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Tacoma_Narrows_Bridge_(1940))
3. <http://lef.uprm.edu/Storyteller/index.html>
4. <http://imgarcade.com/1/strong-wind-clipart/>
5. <http://imgkid.com/weakest-link-chain.shtml>
6. Dagnev A. Computational Evaluation of Wind Loads on Low- and High-Rise Buildings. Dissertation. Florida 2012. Florida International University. 226 p. <http://digitalcommons.fiu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1843&context=etd>
7. Tamura, T., Nozawa, K., Kondo, K. AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96(2008)10-11, pp. 1974-1984.
8. Cook, N. J. The designer's guide to wind loading of building structures - Part 2. London 1990, Butterworths. 478 p. + app. 108 p.
9. <http://www.windresearch.org/>
10. <http://www.silsoereseearch.org.uk/envir-wind-waste/wind.html>
11. Lopes, M.F.P., Numerical calculation of the wind action on buildings using Eurocode 1 atmospheric boundary layer velocity profiles. [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137784253/Paper\\_MFPLopesVersaoFinal.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137784253/Paper_MFPLopesVersaoFinal.pdf)
12. <http://wind.arch.t-kougei.ac.jp/system/eng/contents/code/tpu>
13. Yang, W., Quan, Y., Jin, X., Tamura, Y., Gu, M. Influence of equilibrium atmosphere boundary layer and turbulence parameter on wind loads of low-rise buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96(2008)10-11, pp. 2080-2092.

**SWECO**

