



YLIKORKEAT RAKENNUKSET SUOMESSA, KÄYTÄNNÖN PULMATILANTEITA JA RATKAISUJA

24.11.2011

Jukka Ala-Ojala

YLIMÄKI | TINKANEN

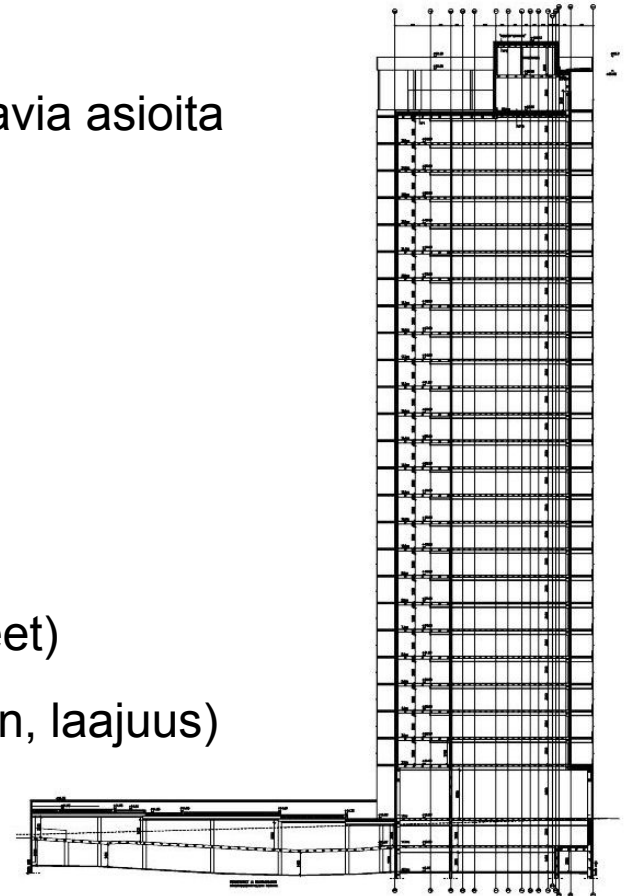
WISE GROUP

KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

RAKENNESUUNNITTELU

Yhteistyö viranomaisten kanssa, ennakkoon sovittavia asioita

- Rakenteiden vastuullinen suunnittelija
- Suunnittelunormi, kuormitukset
- Rakenteiden riskianalyysi
- Paloturvallisuus
- Käytettävät laskentaohjelmistot
- Valittavat rakenneratkaisut (runko ja kuorirakenteet)
- Ulkopuolinen tarkastus (henkilön hyväksyttäminen, laajuus)
- Työturvallisuus
- Suunnittelijan työmaavalvonta



KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

RAKENNESUUNNITTELU

- Stabiliateettitarkastelu on tehtävä jo alustavassa luonnosvaiheessa
- Runkovaihtoehtojen vertailu
- Tuulen vaikutukset runkoon ja julkisivurakenteisiin, mahdolliset tuulitunnelikokeet
- Perustamistavan vaikutukset, miten huomioidaan laskentamalleissa
- Dynaamiset tarkastelut, ominaistaajuudet ja -muodot
- Mukavuustekijät (human comfort), värähtelyt, haitallinen kiihtyvyys, paikalliset tuulen vaikutukset jalankulkijoille pihakansilla ja kaduilla
- Rakennusrungon detaljit, betonirakenteiden halkeilun merkitys, elementoinnin mahdollisuudet
- Käytettävät normit (RakMk / EN), muut kv. käytännöt ja ohjeet

KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

RAKENTAMINEN

- Valmistus- ja asennustoleranssit erikoisluokkaa
- Asennuksen pystysuoruus varmistettava kerroskohtaisin mittauksin
- Paloluokka R120
- Julkisivudetaljeissa huomioitava tuulen aiheuttamat äänet (esim. mahdollisten säleikköjen detaljointiin kiinnitettävä huomiota)
- Jään kertyminen ja putoaminen, detaljoinnissa huomioitava

KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

RAKENTAMINEN

Korkeiden kohteiden työturvallisuus

- Työsuojelupiirin järjestämät työturvallisuutta koskevat seurantakokoukset
- Putoamissuojauksesta tehtävä erillinen suunnitelma, estettävä myös tippuminen
- Ulkoseinäelementeissä
ikkunat asennettuina
kaiteet asennettuina elementtikohtaisesti jo alhaalla
- Julkisivujärjestelmät asennetaan ja kiinnitetään sisältäpäin
- Ulkoseinä asennuksen jälkeen saumausta vaille valmis



KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

RAKENTAMINEN

Korkeiden kohteiden työturvallisuus

- Vesikattovaiheessa kaiken materiaalin välitön kiinnitys paikalleen
- Normaalista tarkemmat työmaa- ja työsuojelusuunnitelmat
- Asennukselle asetettavat tuulirajat, vaihtelu nostettavasta kappaleesta riippuen
- Nostokorkeudesta johtuvat rajoitteet
- Pakkasrajoitteet yhdessä tuulen vaikutuksen kanssa
- Riipputelinesuunnitelma, tarvitaan myös huollossa jatkossa



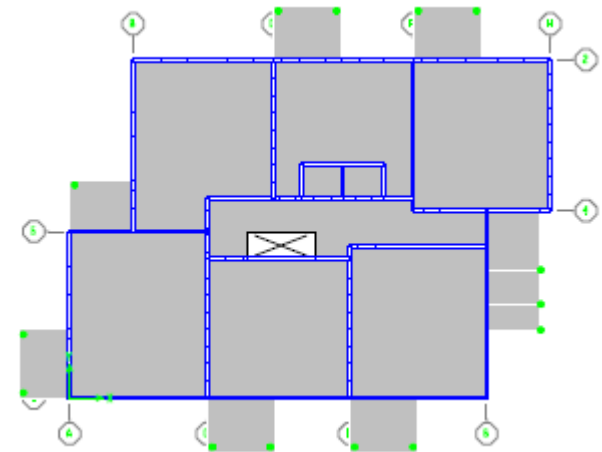
KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

ERI RAKENNUSTYYPPIEN JÄYKISTYSSYSTEEMEISTÄ

- Rakennuksen käyttötapa rajaa usein soveltuvan jäykistämistavan.

Asuinrakennukset

- Yleensä taloudellisin tapa on käyttää kantavia väliseiniä ja tarvittaessa myös ulkoseiniä rungon jäykistävinä osina.
- Tällä tavalla saadaan hoikkuus yleensä pieneksi ja voidaan suunnitella jopa 40 kerroksisia rakennuksia, joissa ei synny vetoa jäykistäviin seiniin millään kuormitustapauksilla.

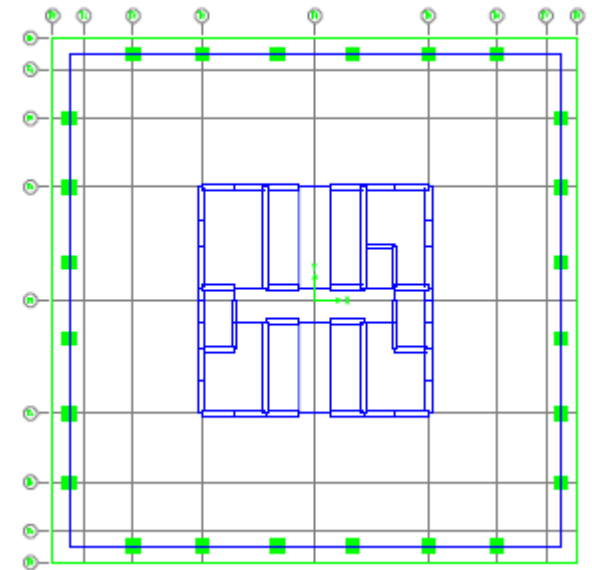


KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

ERI RAKENNUSTYYPPIEN JÄYKISTYSSYSTEEMEISTÄ

Toimistorakennukset

- Toimistorakennusten jäykistys on usein joku muu kuin kantavat väliseinät □ menetelmä.
- Mastojäykistystä (jäykistävä ydin: hissikuilu ja porrashuoneet) käytettäessä hoikkuus on korkeilla rakennuksilla on suhteellisen suuri ja suuria vetojännityksiä voi esiintyä alemmissa kerroksissa.
- Alustavassa suunnittelussa tulisi minimissään pyrkiä jäykistävän kuilun hoikkuuteen $h/10 \dots h/13$, missä h on rakennuksen korkeus.



KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

ERI RAKENNUSTYYPPIEN JÄYKISTYSSYSTEEMEISTÄ

- Jäykistystä voidaan parantaa esimerkiksi lisäämällä jäykistäviä ristikoita tai seiniä, tai niiden yhdistelmiä.
- Suunnittelussa tulisi pyrkiä selkeään jäykistyssysteemiin, jolloin voimien hallinta on suhteellisen yksinkertaista eri kuormitustapauksilla. Samalla huomioidaan taloudellisuus.
- Kuilujen ja jäykistävien rakenteiden sijainti tulisi olla mahdollisimman keskeinen ja symmetrinen tason kiertymän estämiseksi.

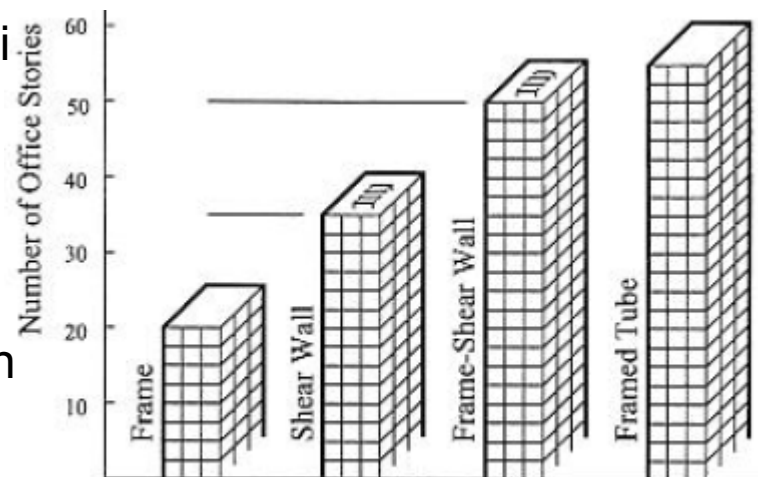


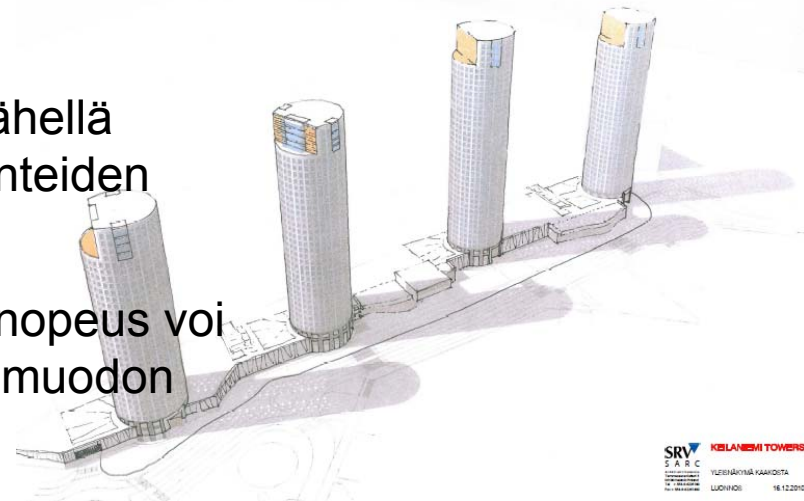
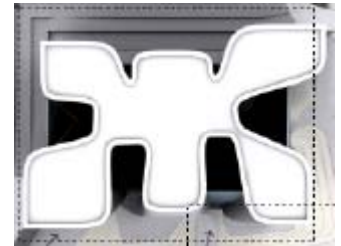
Figure 3: Classification of tall building structural systems

KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

”MILLOIN TARVITAAN TUULITUNNELIKOKEITA?”

Tuulitunnelikokeita suositellaan harkittavaksi kun yksi tai useampi seuraavista ehdoista on voimassa:

1. Rakennuksen muoto poikkeaa merkittävästi laatikkomaisesta.
2. Rakennuksen alin ominaistajuus on alle 1 Hz (käytännössä n. 20-kerroksiset ja siitä ylöspäin riippuen jäykistämistavasta).
3. Rakennus altistuu heräte-tärinälle toisten lähellä sijaitsevien korkeiden rakennusten tai rakenteiden johdosta.
4. Rakennus sijaitsee paikassa, jossa tuulen nopeus voi kasvaa tunnelointivaikutuksen tai maaston muodon johdosta.



KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

”PALJONKO TORNI SAA HEILUA?”

KÄYTTÖTILAN TARKASTELUISTA

- Eurokoodissa ei ole annettu korkeiden rakennusten vaakasiirtymän maksimiarvoa.
- Yleisesti käytetty taipumaraja on noin $h/400 \dots h/700$, missä h on rakennuksen korkeus perustamistasosta kattoon saakka.
- Alustavassa suunnittelussa voidaan käyttää raja-arvoa $h/500$ kerran 50v. tapahtuvalle tuulen vaikutukselle muut vaakakuormat huomioiden.
→ 100 m:n tornin taipumaraja olisi silloin 20 cm.
- Lisäksi tulisi tarkistaa, että kerrosvälillä taipuma ei ylitä arvoa $h_1/400$, missä h_1 on kerroskorkeus.



KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

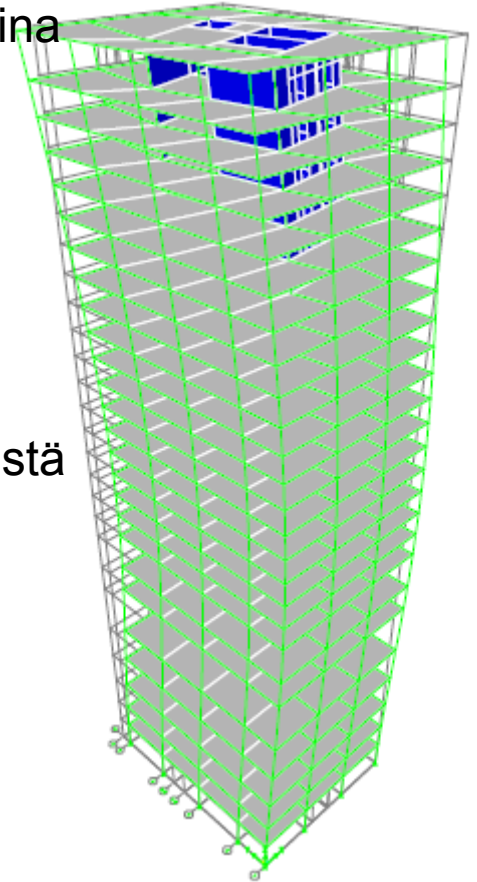
”MITÄ TARKOITETAAN MUKAVUUSTEKIJÖILLÄ?”

- Taipumarajoitus ei ole riittävä kriteeri käyttötilassa
- Eurokoodissa SFS-EN 1990, A1.4.4 Värähtely- kohdassa todetaan, että käyttöolosuhteissa rakennusten *käyttäjän mukavuus* tulee ottaa huomioon.
- Mukavuustekijöistä merkittävin on tuulen herätteestä aiheutuva käyttäjän kokema kiihtyvyys.
- Sen lisäksi tulee huomioida *rakenteen ja sen rakenneosien toimivuus* (esim. väliseinien halkeamat, verhousten vauriot, tavaroiden tai aineiden herkkyys värähtelylle).



KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

- Eurokoodin edellyttämä mukavuustarkastelu edellyttää aina rakennuksen dynaamisten ominaisuuksien laskentaa.
- Alustavassa arviossa nyrkkisääntöjä ja käsinlaskentakaavoja ominaistuuksien laskentaan (normit, muu kirjallisuus).
 - hajonta voi olla suuri, jopa kymmeniä prosentteja!
 - rakennuksen todellisen jäykkyyden huomiointi työlästä käsinlaskennassa
 - aukkojen merkitys
 - seinien paksuuksien muutokset korkeussuunnassa
 - rakenteiden halkeilu
 - muu kuin levy- tai kuilujäykistys



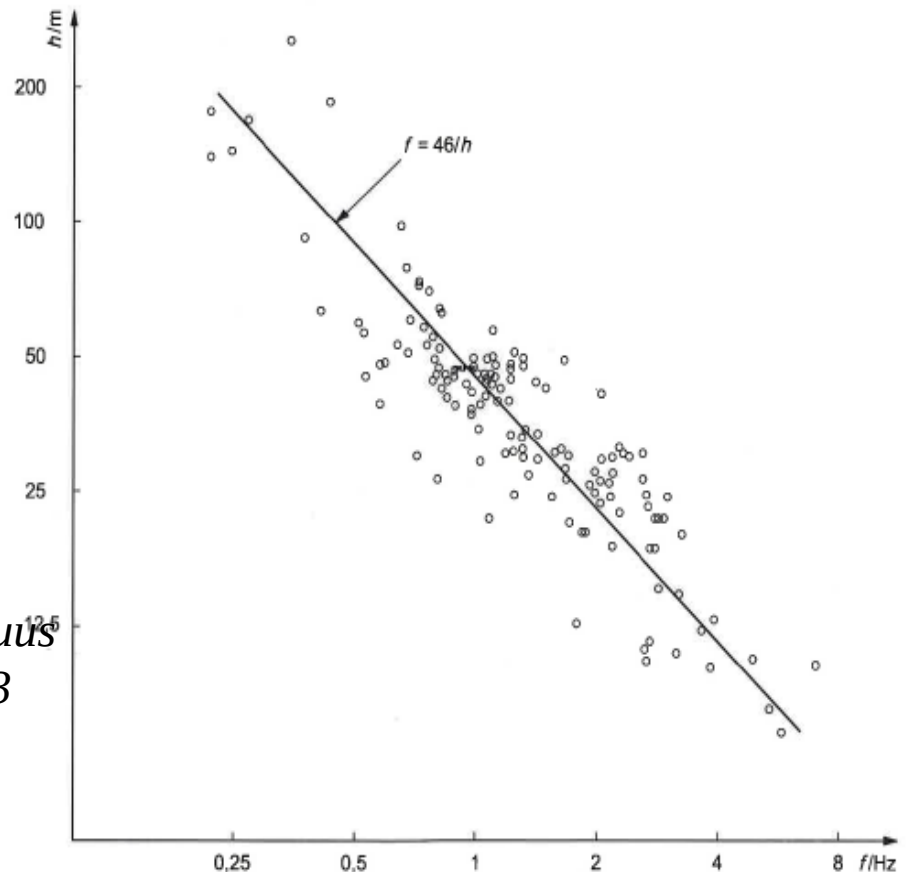
KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

YLI 50 m KORKEAN MONIKERROKSISEN RAKENNUKSEN
ALIN OMINAISTAAJUS SFS-EN 1991-1-4 MUKAAN

h = rakennuksen korkeus, m
 f = alin ominaistaaajuus, Hz
 $f=46/h$

*Ei huomioi rakennuksen jäykkyyttä.
Virhemarginaali +- 50% !!*

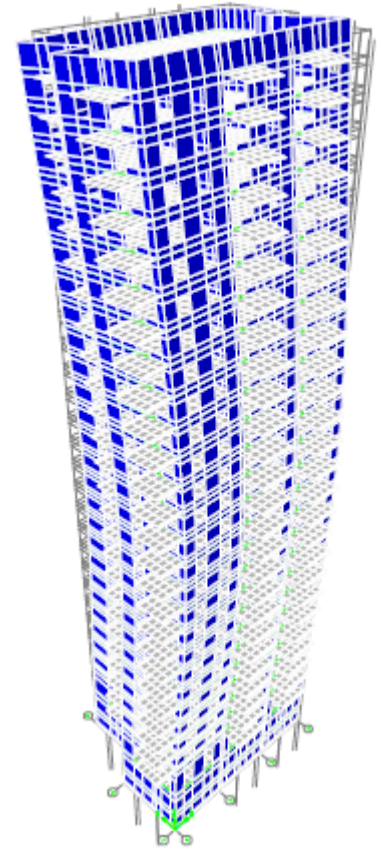
*- Kuva 1. Suorakaiteen muotoisen
rakennuksen ominaistaaajuuden riippuvuus
rakennuksen korkeudesta perustuen 163
rakennuksen tutkimustuloksiin [ISO
4866:2010(E)].*



KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

OMINAISTAAJUUDEN LASKENTA

- Käytännössä soveltuva tapa on 3D FEM-malli, jolla saadaan
 - alimmat ominaistajuudet ja ominaismuodot
 - siirtymät
 - voimasuureet → mahdollinen rakenteiden halkeilu
- Soveltuvien ohjelmistojen ominaisuudet tunnettava, käytön riskit tunnistettava
- Miten tarkastetaan tulosten oikeellisuus?
 - ulkopuolinen tarkastus
 - vertailumalli, muut vertailulaskelmat
 - alkuperäisen mallin tarkastus



KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

OMINAISTAAJUUKSISTA

- Teoreettisesti ominaistaajuudet saadaan rakennuksen FEM-laskennan tulosteena taivutusvärähtelyille x- ja y- suuntiin sekä vääntövärähtelylle erikseen
- Yleensä tarkasteluun riittää 3-6 alinta ominaistaajuutta
- Ominaistaajuuksien määrittely on aina arvio ja kiihtyvyyksiä laskettaessa tulisikin huomioida mahdollinen vaihteluväli ja mitkä tekijät siihen vaikuttavat. → Herkkyystarkastelu.

KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

ESIMERKKEJÄ OMINAISTAAJUUKSISTA

- Dynaamisilta ominaisuuksiltaan ”normaalisti” käyttäytyvän tornin kolme alinta ominaistajuutta ovat yleensä ensin kaksi pääsuuntaa ja vääntöväärähtely kolmantena.
- Vääntöväärähtely myös tarkistettava kiihtyvyyksiä laskettaessa.
- Seuraavassa on esitetty muutama luonnosvaiheen tarkastelussa olleiden 26...40- kerroksisen tornin ominaistajuus (toimistotyyppisestä ja asuintorneista)
- [JAO Esitys\Ominaistajuuksia.wpl](#)

KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

KIIHTYVYYSKRITEEREISTÄ

- Jäykästi tuetun ulokemaisen rakennuksen *heilahduksen kiihtyvyyden keskihajonta* lasketaan kaavalla SFS-EN 1991-1-4 B.10. Huippukiihtyvyydet saadaan kertomalla kaavasta B.10 saatu arvo huippukertoimella käyttäen resonanssitaajuutena rakennuksen ominaistajuuden arvoa.
- Tarkastelujaksot 1v., 5v., 10 v.
- Mistä raja-arvot?
 - Eri maissa eri käytäntöjä
 - Eurokoodissa ei ole suoraan annettua raja-arvoa, viittaus ISO-standardiin 10137
 - ISO-standardit
 - (ISO 6897:1984; 5v. rms, ISO 10137:2007 1v. peak)

KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

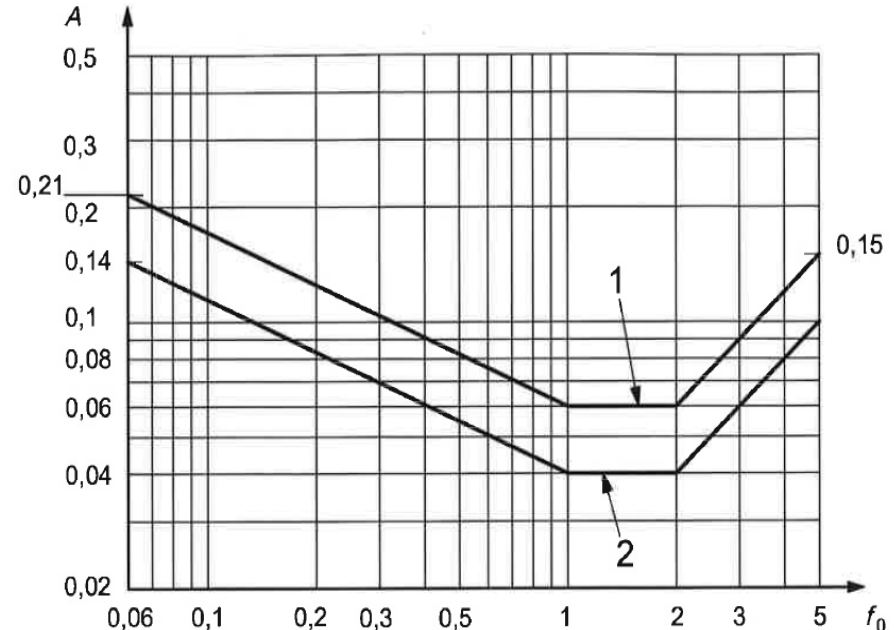
Vaakasuuntaisen kiihtyvyyden huippuarvon raja-arvokäyrät rakennuksille kerran vuodessa tapahtuvalle tuulen vaikutukselle [ISO 10137:2007(E)].

A = kiihtyvyyden huippuarvo, m/s^2

f_0 = alin ominaistajuuus
sivusuuntaisessa ja
vääntöväärähtelyssä, Hz

1 toimistot

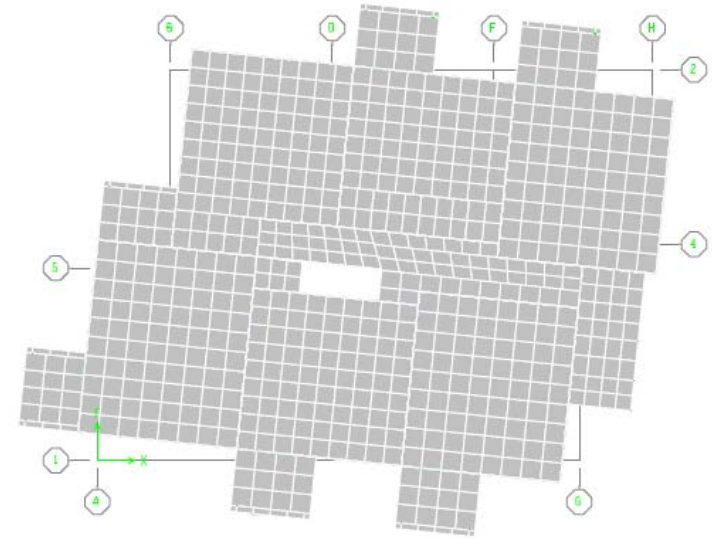
2 asunnot



KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

VÄÄNNÖN MERKITYS

- Nurkimmaiset alueet ylimmissä kerroksissa siirtyvät väännössä eniten.
- Ihmiset ”herkempiä” aistimaan väännön vaikutukset rakennuksissa.
- Rakennuksen vääntöjäykkyyteen kiinnitettävä riittävästi huomiota.



KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

DYNAAMISIIN OMINAISUUKSIIN ENITEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

- Dynaamisiin ominaisuuksiin vaikuttaa rakennuksen jäykkyyyden lisäksi massan jakautuminen ja merkittävänä tekijänä kiihtyvyytlaskelmissa käytettävä rakennuksen vaimennuskerroin.
- Eurokoodissa vaimennuskertoimen arvoja on esitetty kohdassa SFS-EN1991-1-4 taulukossa F.2.
- Lähteessä ISO 4354:2009(E), taulukossa E.3 on annettu myös eri korkuisten betoni- ja teräsrunkoisten rakennusten vaimennuskertoimien arvoja.
- Rakenne tulisi laskea erilaisilla vaimennuskertoimilla (ala- ja yläraja-arviot), jotta saadaan vaihteluväli lopulliseen mukavuustekijöiden arviointiin.

KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

VAIMENNUSKERTOIMIA ISO 4354:2009(E) MUKAAN

Table E.3 — Representative values of structural damping ratio, ζ_{str}

Type of structure		Material	
		Steel	Concrete
Building	$h = 40$ m	0,018	0,02
	$h = 50$ m	0,015	0,02
	$h = 60$ m	0,015	0,015
	$h = 70$ m	0,015	0,015
	$h > 80$ m	0,01	$0,012 \leq \zeta_{str} \leq 0,015$
Chimney		0,002 ^a	0,01
		0,005 ^b	
Lattice tower		0,001	—

NOTE 1 The damping ratio is equal to the logarithmic decrement of damping divided by 2π .

NOTE 2 Lower values (75 % of the above-mentioned values) are recommended for evaluation of habitability to horizontal vibrations of structures.

^a Unlined, all welded.

^b Lined.

- SFS-EN1991-1-4 taulukossa F.2 on annettu 0,016 kaikille teräsbetonirakennuksille korkeudesta riippumatta.
- ISO 4354 huomioi rakennuksen korkeuden, suositus n. 40 % pienempi kuin EN taulukko F.2 yli 80 m torneilla, 0,016 vs 0,009.

KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

HALKEILUN MERKITYS RAKENNUKSEN STAATTISIIN JA DYNAAMISIIN OMINAISUUKSIIN

- Esimerkkinä kuilurakenteet ja niiden aukkopalkit
- Vaikutus voimasuureisiin ja siirtymiin
- Vaikutus ominaistaajuuksiin
- Miten huomioidaan rakenteiden analyysissä?
- Vetoa vai puristusta?
- Perustusten ankkurointi
- Onnettomuuskuormat

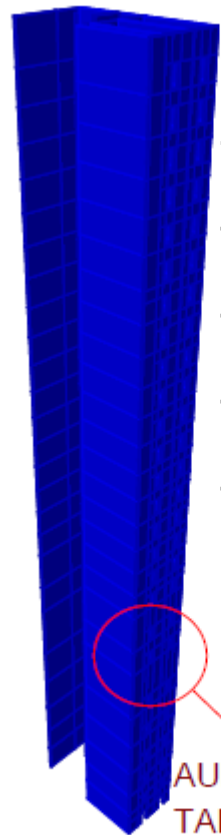
KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

HALKEILUN MERKITYS RAKENNUKSEN STAATTISIIN JA DYNAAMISIIN OMINAISUUKSIIN

- Mikäli rakenneosan jännitystasot jäävät betonin vetolujuuden alapuolelle, katsotaan se halkeilemattomaksi.
- Rakennuksen kokonaistaipumaa ja dynaamisia ominaisuuksia laskettaessa voidaan rakenteiden halkeilu ottaa huomioon käyttäen redusoitua jäykkyyttä laskentamallissa.
- Esimerkkinä kuilujäykisteinen 24 kerroksinen toimistorakennus, jossa 5 alinta kerrosta mallinnettu halkeilleena siten, että jäykkyyssarvot ovat 70% halkeilemattomasta → taipuma kasvaa yli 30% (130 mm → 170 mm) ja vaikutus ominaistajuuksiin n. 10...15 %.

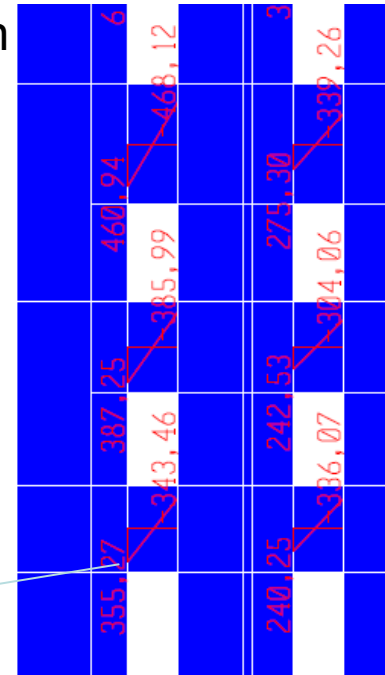
KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

HALKEILUN MERKITYS RAKENNUKSEN STAATTISIIN JA DYNAAMISIIN OMINAISUUKSIIN



AUKKOPALKKIEN
TARKASTELUT!
- HALKEILU?

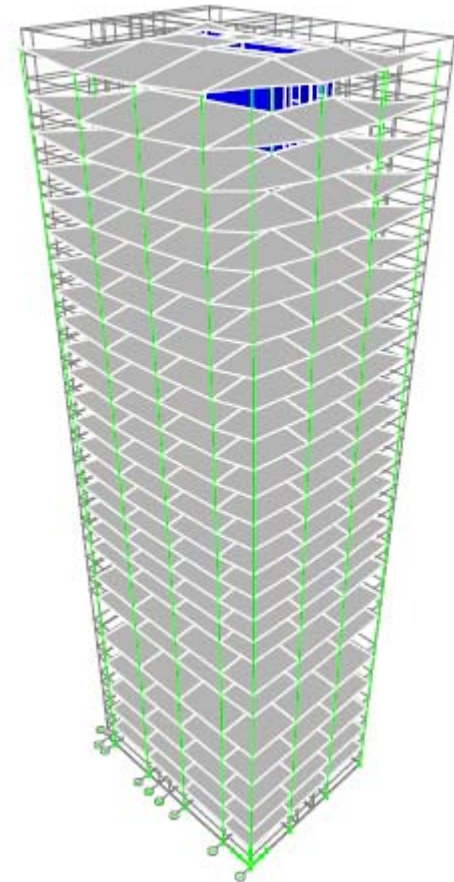
- voimasuureet tarkastettava kerroksittain
- FEM-mallin elementtiverkon koko?
- aukkojen pielet, seinien päät, nurkat
- talotekniikan reikävaraukset!
- raudoitusten ankkuroinnit!



KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

MUITA ERITYISKYSYMYKSIÄ

- Pystyrakenteiden (seinät ja pilarit) erisuuruinen kokoonpuristuminen erilaisesta jännitystasosta johtuen.
- Viruma ja kutistuma huomioitava → toimenpiteet rakentamisen aikana.
- Kuormitusvaihtelut
- Perustusten painuminen
- Kallion laatu, tunnelit (saako olla vetovoimia?) → Kalliomekaaninen herkkyystarkastelu
- Paalutetuilla perustuksilla paalujännitysten vaihteluväli pieneksi



KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

ELEMENTOINNIN MAHDOLLISUUDET

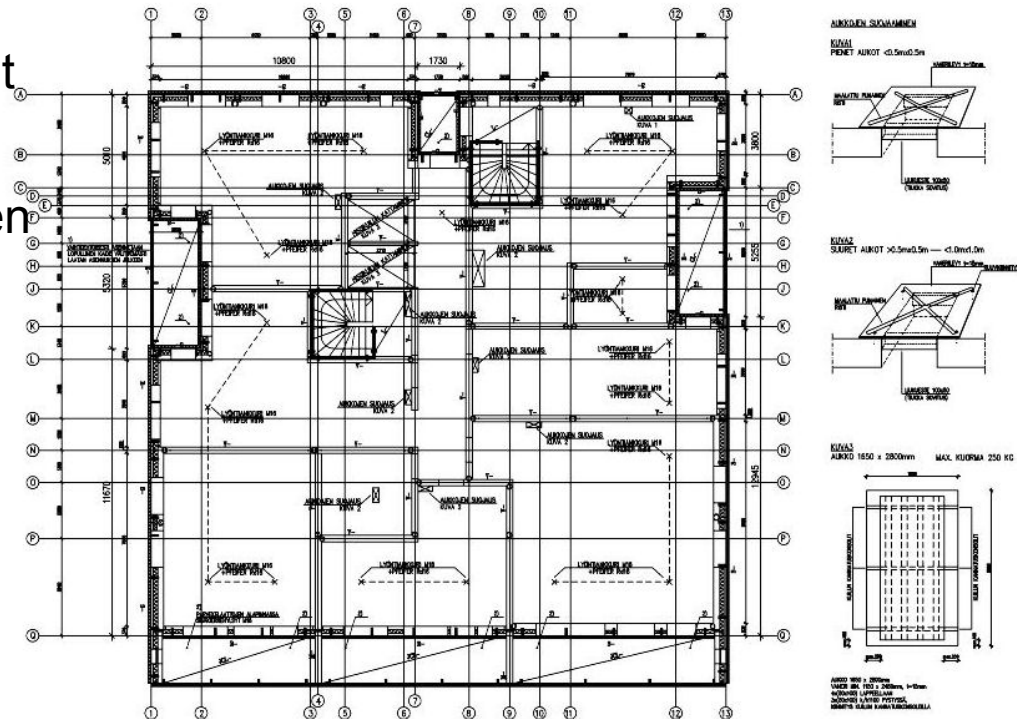
Pystyrakenteiden elementoinnin ongelmakohdat

- Alimmissa kerroksissa jäykät harjateräsvaarnat ja niiden tiheys vaikeuttavat asennusta verrattuna ylempien kerrosten vaijerilenkkiliitoksiin
- Ulkoseinien saumaus
- Ikkunoiden liittymädetaljien tiiveys
- Keveiden rakenteiden esim. lasirakenteiden ja elementtien liittymien tiiveys

KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

ELEMENTOINNIN MAHDOLLISUUDET

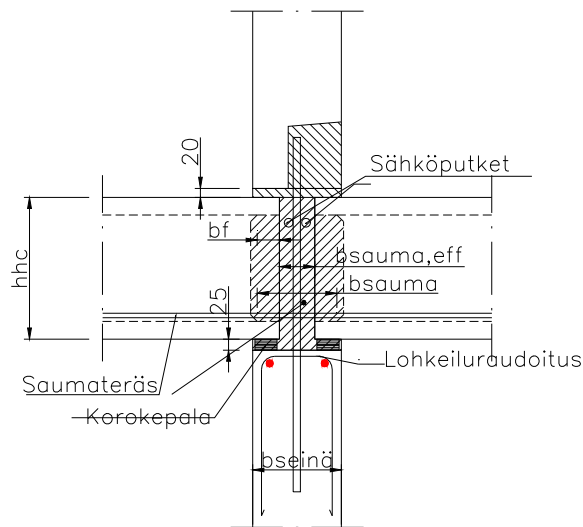
- Asuintornit, joissa kantavat väliseinät ja ulkoseinät, suuri jäykkyys
- Jopa 40 kerroksisia rakennuksia siten että seinissä ei vetovoimia normaalitilanteissa
- Alimmat kerrokset paikalla valettuja, 20...30 kerrosta elementtejä
- Paikalla valetut välipohjat
- Kerroskorkeusrajoite elementeillä 4...4.5 m



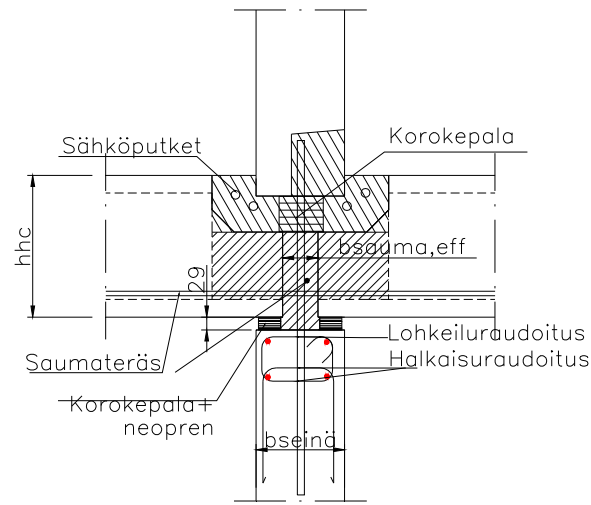
KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

ELEMENTOINNIN MAHDOLLISUUDET

- Ontelolaatastoja voi käyttää rajoituksin
- Käytettävä lovettua ontelolaatan päätä, jolla pystykuormakapasiteetti noin 30 % suurempi
- Soveltuu teknisesti n.16 kerrokseen asti riippuen laattojen pituudesta



VAIHTOEHTO A

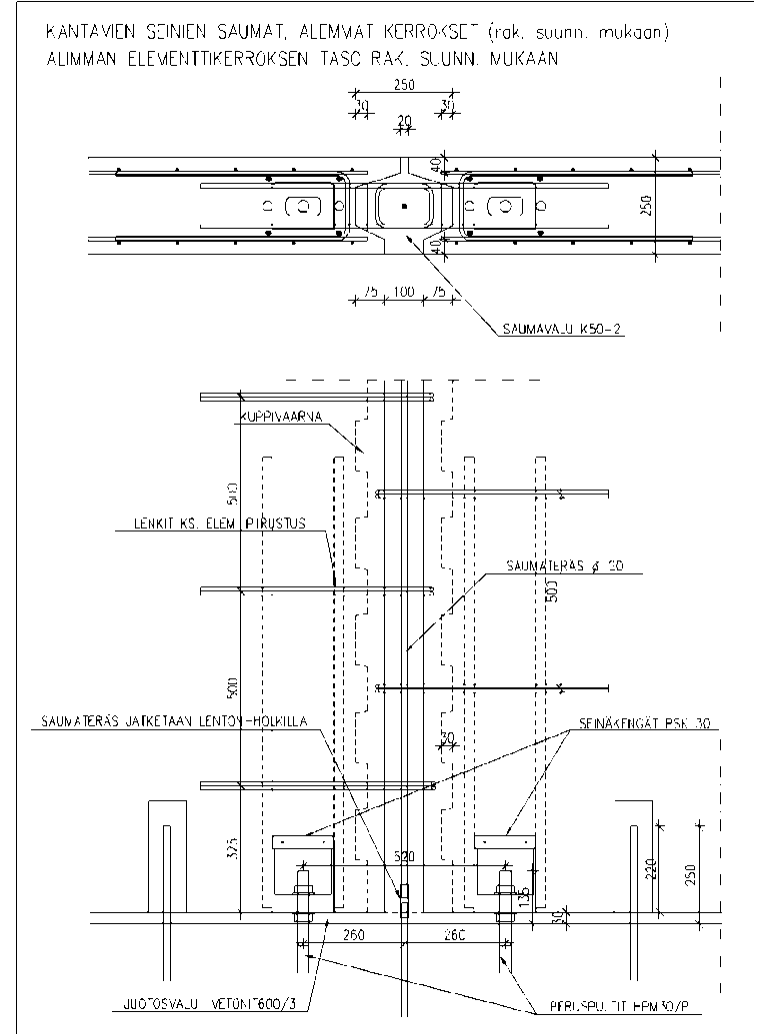


VAIHTOEHTO B

KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

ELEMENTOINNIN MAHDOLLISUUDET

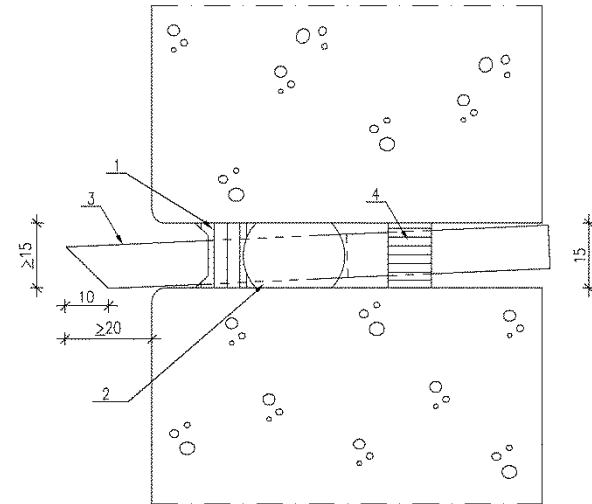
- Elementtirakentamisessa seinäelementtien vaakasaumat valettava kutistumattomalla juotosbetonilla painevaluna, alimpien kerrosten pystysaumot kuppivaarnoilla ja harjateräksisin tuplalenkein
- Pystysaumojen betonin lujuus suurimmillaan K-50
- Elementtien asennuksessa käytettävän kaluston korkeus ja mahdolliset korkeudesta johtuvat nostorajoitukset



KORKEAN RAKENTAMISEN ERITYISPIIRTEITÄ

BETONIJULKISIVUJEN DETALJIT

- Kaksinkertainen saumanauha erikseen määritellyillä alueilla



- 1 Kestoelastinen saumamassa
 - 2 Pyöreä, umpisoluinen polyeteeninauha
 - 3 Tuuletusputki Ø 10 mm, pakkasenkestävää muovia, (väri arkkisuunn. mukaan), sijoitetaan jokaiseen pysty- ja vaakasauman risteykseen siten, että putki päättyy saumanauhojen väliin. Lisäksi vaakasaumoihin putket k3000, jotka päättyvät lämmöneristeen tuuletustilaan.
 - 4 Paisuva saumanauha esim. ILLMOD 600.
- Vaakasaumoissa läpimenevänä.
 - saumaustyön ja -materiaalin ja laadunvaatimusten osalta noudatetaan RT-korttien 28-10528 ja RT 82-10527 sekä elementtilyöselityksen ohjeita ja vaatimuksia
 - saumausmassoilla tulee olla voimassaoleva Suomen Betoniyhdistyksen myöntämä käyttöseloste
 - saumausmassan tulee soveltua ylipinnoitettavaksi
 - tuuletusputki kallistettu alaspäin
 - saumattavista elementteirunoista tulee sementtäläma, muottijälly yms. poistaa mekaanisesti jo elementtitehtaalla; valkabetonikuorien saumattavat pinnat hiotaan elementtitehtaalla
 - varastoinnin, kuljetuksen jne. aikana kertynyt lika, suolat yms. tulee poistaa ennen saumaustyötä
 - saumattavien pintojen Primer-käsittely saumausmassan käyttöselosteen mukaan

KIITOS HUOMIOSTANNE.



YLIMÄKI | TINKANEN

WISE GROUP

Insinööritoimisto
Ylimäki & Tinkanen Oy
SKOL ry:n jäsen
www.ylimakitinkanen.fi

Kyminlinnantie 6
48600 Kotka
Puhelin (05) 2279 270
Faksi (05) 2279 298

Malminkaari 23 B
00700 Helsinki
Puhelin (09) 3507 620
Faksi (09) 3507 6222

Y-tunnus 0545948-6
Kotipaikka Kotka