



RAKENNUSTIETO >

Rakennusalan täyden palvelun tietotalo

Rakennustieto Oy edistää hyvää rakennustapaa ja tuottaa rakentamisesta luotettavaa tietoa. Puolueettoman ja asiakaslähtöisen Rakennustieto Oy:n tuotteet kattavat rakentamisen koko elinkaaren suunnittelusta ylläpitoon. Yhtiön omistaa Rakennustietosäätiö RTS.

Tutustu palveluihimme

> rakennustieto.fi/rk/palvelut

Rakentajain kalenterin artikkelit

Tämä artikkeli on julkaistu alun perin Rakentajain kalenterissa, jota ovat julkaisseet Rakennustietosäätiö RTS sr ja Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL ry.

Julkaisu oli rakennusalan ammattilaisten ja opiskelijoiden käsikirja, joka yhdisteli teoriaa ja käytäntöä sekä kannusti hyvään rakentamiseen. Artikkelin vasemmassa reunassa olevasta vesileimasta näkee ko. Rakentajain kalenterin vuosikerran.

> [Artikkeliarkisto, kokoelma vuosien 1997–2018 Rakentajain kalenterissa julkaistuista artikkeleista](#)

Suomen korkeimman rakennuksen turvalliset rakennusratkaisut: tuulen vaikutus

Risto Kiviluoma, tekniikan tohtori
Johtaja, WSP Wind Engineering
risto.kiviluoma@wspgroup.fi

Tuuli ja korkeat talot

Korkeiden talojen rakennetekniikassa tuulikuorma ja sen dynaamiset vaikutukset muodostuvat tärkeäksi suunnittelukriteeriksi. Rakennuksen runko ja perustukset suunnitellaan kes-tämään tuulikuorma ottamalla huomioon rakennuksen värähtelyiden ja niihin liittyvien hitausvoimien aiheuttama lisärasitus. Toinen tärkeä, ja usein määräävämpi kysymys, on värähtelyra-jatilataarkastelu asukkaiden kokemien haitallisten kiihtyvyyksien suhteen. Tavanomainen taipumakriteeri ei yleensä takaa vielä hyväksyttävää tulosta kiihtyvyyksien suhteen. Joissain tapauksissa onkin käytetty rakennuksen ylimpiin kerroksiin rakennettuja vaimentimia, joilla saadaan maksimikiihtyvyyksiä alennettua kovimmissa tuulissa. Kiihtyvyyksien aistiminen riippuu pääasiassa kiihtyvyyden suuruudesta ja taa-juudesta. Myös rungon korkeammat värähtelymuodot ja vääntövärähtely voivat muodostua ongelmaksi, jolloin on tarkasteltava useammalla eri taajuudella vaikuttavien kiihtyvyyksien yhteisvaikutusta.

Kun kyseessä on lasijulkisivu, tutkitaan usein tarkasti paikalliset painekuormat lasipaksuuksi-en ja ripustuksien suunnittelemiseksi eri kohdis-sa rakennusta. Arkkitehtonisessa mielessä tärkeitä kysymyksiä ovat korkeiden talojen tuulisuutta lisäävä vaikutus katutasossa, esimerkiksi sisäänkäyntien kohdalla, sekä rakennuksen terassien tuulisuus.

Korkeisiin taloihin liittyvä tuulen vaikutuksen luotettava selvittäminen on haasteellinen tehtävä, ja sen teknistä luodellinen merkitys kasvaa tyypillisesti rakennuksen korkeuden kasvaessa. Käytännössä tarkastelut tekevätkin useasti erillisenä toimeksiantona alan asiantuntijat tuulitunnelikokeiden avulla. Erityisesti Pohjois-Amerikassa on pitkät perinteet rajakerrostuulitunnelien hyödyntämisestä korkeiden talojen suunnittelussa, josta tämä sittemmin on levinnyt standardikäytännöksi eri maihin.

Suunnittelu

Rakenteiden suunnitteluohjeet ja normit muutuvat ajan myötä yleisesti yhä tarkemmiksi, ja kattavat myös korkeita taloja. Näiden asiantuntemattomassa käytössä piilee samalla riski, koska rakennesuunnittelijan tai tarkastajan on vaikea erottaa mitkä annetuista menetelmistä ovat tarkkoja ja mitkä karkeita yksinkertaistuksia, jotka sopivat vain tietyn tyyppisiin rakennuksiin ja olosuhteisiin. Tuulen vaikutuksen tarkastelun epävarmuustekijöihin ja suoraan ilmiön satunnaisuuteeseen liittyen oikea suunnitteluperiaate on valita keskeiset parametrit konservatiivisesti eri lähteistä. Esimerkiksi Eurokoodin versioiden myötä sen puutteita ja epä johdonmukaisuuksia on korjattu sekä sovellusaluetta tarkennettu. Viimeisimmässä versiossa [1] sydän-jäykisteisten korkeiden talojen vääntövärähtelyt ja korkeampien värähtelyjen ominaismuotojen tarkastelu on rajattu sovellusalueen ulkopuolel-le. Tavanomainen laatikkotalon painekertoimis-ta määritetty muotokerroin on kasvanut noin 40 % ja vastaa nyt amerikkalaista suunnittelukäytäntöä. SEI/ASCE-7 [2] versioissa on tuulikuorman laskennallista epäkeskisyyttä toistuvasti lisätty. Tuulivärähtelyjen monimutkaisuudesta johtuen ei ole oletettavissa, että korkeiden rakennusten analyysi voitaisiin tulevaisuudes-sakaan viedä kattavasti normitasolle. Tuulitun-nelikokeet ja asiantuntijoiden laskelmat, samoin kuin ulkopuolinen tarkastus, toimivat jatkossa-kin luotettavimpina suunnitteluperusteina.

Korkeiden talojen suunnittelussa jää harkittavaksi milloin turvaututaan tuulitunnelikokei-siin ja asiantuntijan selvityksiin, ja milloin riit-tää rakennesuunnittelijan tekemä normipohjai-nen laskelma. Kysymys on toisaalta viran-omaistahojakin kiinnostavasta rakennuksen ja sen ympäristön turvallisuudesta, ja toisaalta rakentajaa ja asukkaita kiinnostavasta taloudelli-sesta optimoinnista. Tuulivärähtelyjen tapauk-sessa rakennuksen korkeus ja hoikkuus (korkeu-den suhde leveyteen) sekä muoto ovat määrää-viä tekijöitä. Rakennuksen kapeus vaikuttaa erityisesti poikittaisvärähtelyjen esiintymismah-dollisuuteen. Kun rakennuksen muoto on muu

kuin tavanomainen suorakaidepohja, korostuu vääntöväärhtelyjen merkitys. Syynä on paitsi tuulikuorman ja vääntökeskiön epäkeskisyyden, myös kerrosten massan epäkeskisyyden. Julkisivun tavanomaisesta poikkeava muoto, esimerkiksi kaarevat pinnat ja terävät kulmat, voivat aiheuttaa suuria paikallisia paine- ja imukuormia. Rakennusrungon liiallinen värähtely voi johtaa julkisivun saumojen vuotamiseen sateella tai esimerkiksi hissien kannatinvaijereiden liiallisen heiluntaan.

SEI/ASCE-7 [2] on tyyppillinen, ja tiettyssä mielessä edistyksellinen suunnitteluohje. Sen mukaan tuulen vaikutuksen tarkastelu tehdään tapauksesta riippuen jollain seuraavista menetelmistä:

- yksinkertaistettu laskentamalli (taulukkomitointus)
- analyttinen laskentamalli (tuulen vaikutuksen, mukaan lukien värähtelyt, tarkempi laskenta)
- tuulitunnelikokeilla.

Tuulitunnelikokeiden käyttöä suositellaan harvittavaksi, kun yksi tai useampi seuraavista ehdoista on voimassa:

1. rakennuksen muoto poikkeaa merkittävästi laatikkomaisesta
2. rakennus on joustava siten, että sen alin ominaistajuus on alle 1 Hz
3. rakennus altistuu heräte-tärinälle toisten lähellä sijaitsevien kerrosten rakennusten tai rakenteiden johdosta
4. rakennus sijaitsee paikassa, jossa tuulen nopeus voi kasvaa tunnelointivaikutuksen tai maaston muodon johdosta.

Esimerkiksi Eurokoodin [1] likikaava rakennuksen alimmalle ominaistajuudelle on $n_1 = 46/h$ [Hz], jossa h = rakennuksen korkeus metreissä. Siten jo noin 15-kerroksisessa talossa voi tuulen dynaaminen vaikutus olla siinä mielessä merkittävä, että joudutaan harkitsemaan tuulitunnelikokeiden käyttöä. Runгон eri jäykistysmenetelmillä (kantavat seinät, sydänjäykistys, sydänjäykistys jäykistävillä kerroksilla, putki-jäykistys jne.) on oma taloudellinen ja käyttö-kelpoinen korkeusalueensa, ja siten esimerkiksi 30-kerroksisen sydänjäykisteisen rakennuksen ominaistajuus voi olla hyvinkin alhainen, kun tämän jäykistysmenetelmän käyttökelvopoisena rajana pidetään yleisesti noin 35 kerrosta. Heräte-tärinä voi muodostua ongelmaksi tyyppillisesti kaupunkien keskuoissa, joissa samalle alueelle rakennetaan lähemmäs ympäristöään selvästi korkeampia rakennuksia. Näissä tietyn tyyppinen tuulitunnelikoe on erityisen tarpeellinen kiihtyvyyssrajatilatarkastelun luotettavaksi suorittamiseksi [3].

On huomattava, että puutteellisesti tehty tuulitunnelikoe ei ole sen luotettavampi menetelmä kuin analyttinen laskelmakaan. Erityisen tarkasti on tarkasteltava tilanteet, jossa tuulitunne-

likokeen tai paikallisten tuulimitausten tuloksena saadaan normia pienempiä kuormia. Näin voi käydä esimerkiksi kun rakennuksen alaosa on tuulensuojassa toisten talojen takia tai jos paikallinen tuulitilasto ei ole riittävän kattava. Useasti on suositeltavinta käyttää analyttisiä laskelmia ja tuulitunnelikoetta rinnakkain.

As Oy Helsingin Cirruksen tuulitarkastelu

Cirruksessa on tavanomaisen normitarkastelun lisäksi tutkittu mitoittavia tuulia ja tuulen dynaamisia vaikutuksia. Rakennustarkastuksen aloitteesta on selvitetty suunnittelutuulennopeus rakennuksen pitkä käyttöikä huomioon ottaen. Tehdyssä selvityksessä on tarkasteltu esimerkiksi ilmaston lämpenemisen mahdollisia vaikutuksia maksimituuliin. Ulkopuolisessa tarkastuksessa on käsitelty mm. betonirungon tavanomaisen halkeilun vaikutusta jäykkyytteen, joka puolestaan vaikuttaa rakenteen värähtelyominaisuuksiin. Rakennuksen alin ominaistajuus, halkeamattomana ja halkeilleena on, vastaavasti, suuruusluokkaa 0,4 Hz ja 0,3 Hz.

Dynaamista tuulianalyysiä varten rakennuspaikan turbulenssiolosuhteet on arvioitu katselumuksen ja laskentamallien perusteella. Cirrus sijaitsee lähellä rantaa, ja merituuli pääsee lähes hidastumattomana sen ylimpiin kerroksiin. Tuulianalyysi on tehty analyttisillä laskelmilla erikoisohjelmiston avulla. Laskennan perustana ovat olleet rakennesuunnittelijan 3D elementtimallilla määrittämät alimmat ominaistajuudet ja ominaisuudet, joita tarkasteluun on otettu mukaan 6 kpl kattaen alimmat taivutuksen sekä vääntöväärhtelyyn ominaisuudet.

Analyysin tuloksena rakennesuunnittelijalle on tulostettu staattiset korvauskuormat, eli tuulikuormat, jotka ottavat huomioon resonanssi-värähtelyihin liittyvät hitausvoimat. Vastaava dynaaminen lisäkerroin on 1,35, joskin normin tuulikuorman ja staattisen korvauskuorman jakamat eivät ole täysin samat, ja vaikutus kokonaisvaakakuormaan on pienempi.

Rakennuksen hetkellinen maksimitaipuma suunnitteluluuessa on noin 66...135 mm ($h/1400...h/700$) betonirakenteiden halkeiluista riippuen.

Kiihtyvyyssrajatilatarkastelu tehtiin ISO standardien 6897 ja 2631 [4,5] suositusten pohjalta. Näissä tarkastelun perusteena on kerran 5 vuodessa esiintyvä maksimituuli ja talon ylimpien asuinkerrosten lattian vaakavärähtely. Tulosten perusteella:

- alhaisella taajuusalueella (≤ 1 Hz) kiihtyvyyden keskihajonta on $n, 0,03 \text{ m/s}^2$ kun suositeltu yläraja on $0,04 \text{ m/s}^2$. Värähtelyn keskimääräinen aistimisraja on $n, 0,02 \text{ m/s}^2$

– korkealla taajuusalueella (> 1 Hz) kiihtyvyyden painotettu huippuarvo on n. 0,018 m/s² kun vastaava värähtelyn keskimääräinen aistimisraja on 0,015 m/s². Varsinaisia suosituksia korkean taajuusalueen raja-arvoille ei toistaiseksi ole ISO standardissa [5] annettu. Maksimi taipuma-amplitudit kerran 5 vuodessa esiintyvistä maksimituulista meren suunnalta ovat suuruusluokkaa 22...44 mm betonirakenteiden halkeilusta riippuen.

Aistittavien kiihtyvyyksien kestoa on tarkasteltu pitkäaikaisen tuulitilaston perusteella. Keskimääräisen aistimisrajan ylittäviä tuulivärähtelyitä esiintyy ylimmässä asuinkerroksessa noin 0,5 h vuodessa. Herkimpien ihmisten kohdalla vastaavasti noin 90 h. Vaikka Cirrus täyttääkin selvästi suositukset, tulokset kuvaavat osaltaan värähtelyrajatilatarkastelun merkitystä. Korkean talon jäykistävästä rakenteesta ei voida tinkiä, ilman että sillä on havaittavissa olevia vaikutuksia.

VIITTEET

- [1] Eurocode 1: Actions on structures, Part 1–4: General actions – Wind actions, European standard EN1991-1-4:2005 (E).
- [2] SEI/ASCE 7-02 Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers.
- [3] KIVILUOMA, R., Aeroelastic wind-tunnel testing technique revisited. Proceedings, CTBUH2005 7th World Congress: Renewing the Urban Landscape, 16–19 October 2005, New York City. Council on Tall Buildings & Urban Habitat.
- [4] International Standard ISO 6897-1984E 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).
- [5] International Standard ISO 2631-2:1997(E) Mechanical vibration and shock – evaluation of human exposure to whole-body vibration: Part 2: vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz).



TIESITKÖ, ETTÄ VESIVEK ON ENNEN KAIKKEA

KATTOTURVATALO

VESIVEK ON VALMISTANUT TEOLLISESTI VESIKATTOJEN TURVALLISUUSTUOTTEITA JO VUODESTA 1987.

ASENNAMME VUOSITTAIN SATOJA KILOMETREJÄ KATTOTURVATUOTTEITA.

TÄNÄÄN OLEMME SUOMEN JOHTAVA KATTOTURVATOIMITTAJA.



TURVALLISUUTTA KATOLLE
VESIVEK

Lisätietoja lähimmästä toimipisteestämme www.vesivek.fi
Valmistus ja neuvonta: Nesco Oy p. (03) 468 7700