

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Konetekniikan koulutus

Miika Ikäheimonen

TUULEN AIHEUTTAMIEN VÄRÄHTELYJEN MITTAUS LIGHT-
HOUSE JOENSUUSSA

Opinnäytetyö
Toukokuu 2021



OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2021
Konetekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Tekijä(t)
Miika Ikäheimonen

Nimeke
Tuulen aiheuttamien värähtelyjen mittaus Lighthouse Joensuussa

Toimeksiantaja
Karelia-ammattikorkeakoulu

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää Joensuussa sijaitsevan Lighthouse-nimisen 14-kerroksisen puukerrostalon tuulesta aiheutuvat värähtelyt. Värähtely haluttiin selvittää, koska puun käyttäminen kerrostalon kantavissa rakenteissa on uusi tapa rakentaa ja vastaavista rakennuksista ei ole kunnollisia värähtelymittaustietoja. Mittauksissa käytettiin toimeksiantajan laitteistoa ja niiden toimivuuden selvittäminen oli myös tavoitteena.

Värähtelymittaukset suoritettiin ajoittamalla mittauksen ajankohta mahdollisimman tuulille hetkelle, jolloin rakennuksen värähtely olisi todennäköisintä. Saadut mittaukset analysoitiin signaalin analysointiohjelmistolla. Ohjelmalla selvitettiin mittauksissa esiintyvät taajuudet ja niiden esiintymisajankohdat, joita verrattiin sääaseman tuulihavaintoihin.

Mittauksista saatiin selville rakennuksen ominaistajuudet. Havaittiin myös rakennuksen värähtelevän enemmän tuulensuuntaan nähden poikittaisessa suunnassa, sekä värähtelyjen herättävä tuulen nopeus.

Kieli
suomi

Sivuja 41

Asiasanat
värähtelyt, kiihtyvyys, anturit, taajuus



THESIS
May 2021
Degree Programme in Mechanical Engineering
Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author (s)
Miika Ikäheimonen

Title
Measuring Wind Induced Vibrations in Lighthouse Joensuu

Commissioned by
Karelia University of Applied Science

Abstract

The aim of this thesis was to find out wind induced vibrations of the 14 stories high wooden apartment house named Lighthouse which is located in Joensuu. The reason behind the interest in measuring these vibrations was because using wood as the material in load bearing structures is a relatively new way of constructing multi-storey buildings. Furthermore, there is very little vibration measurement data available of the same type of buildings. The equipment used to perform the vibration measurements is owned by Karelia University of Applied Sciences. The aim was also to see how well the equipment worked in this application.

The vibration measurements were conducted by timing the measurements to take place at the windiest time as possible. This way the possibility of the building to vibrate would be the highest. The data obtained from the measurements was analyzed with signal analyzing software. The frequencies of the vibrations and the time when they happened were extracted from the data. The data was then compared with wind observations.

The measurements revealed the building's fundamental frequencies. It was discovered that the building vibrates more at across wind direction. The wind speed which starts the vibrations was also found out.

Language

Finnish

Pages 41

Keywords

vibrations, acceleration, sensors, frequency

Sisältö

1	Johdanto	7
2	Kohde	7
3	Teoriatausta	9
3.1	Värähtely	9
3.2	Vaimennus	9
3.3	Heräte	9
3.4	Harmoninen värähtely	10
3.5	Rakennuksen värähtely	10
3.5.1.	Vaimennettu vapaa värähtely	11
3.5.2	Pakkovärähtely	11
3.6	Tuulen aiheuttamat herätteet	12
3.6.1	Pyörreratailmiö	12
3.6.2	Laukkaaminen	12
3.7	Kiihtyvyyssanturit	13
3.7.1	Pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi	13
3.7.2	Pietsyöresistiivinen kiihtyvyyssanturi	14
3.7.3	Kapasiivinen MEMS-anturi	14
4	Mittausmenetelmät	15
4.1	Käytettävät kiihtyvyyssanturit	15
4.2	Kiihtyvyyssanturi mittausten analysointi	16
4.3	Antureiden sijainti ja käyttö	19
4.4	Mittauksissa huomioitavat asiat	20
4.5	Näytteenottotaajuuden valinta	22
5	Mittausten tulokset	25
5.1	Y-suunta	27
5.2	X-suunta	30
6	Pohdinta	33
6.1	Tulosten tarkastelu	33
6.2	Mittausten luotettavuus	35
6.2.1	Laskostuminen	35
6.2.2	Alimman ominaistaajuuden vertailu muihin kerrostaloihin	36
6.3	Kehitysehdotuksia	38
6.4	Työn hyödyllisyyden arviointi	38
6.5	Ammatillinen kasvu	39
	Lähteet	40

Merkit ja kirjaintunnukset

b	Taivutuksen suuntaan poikittaisen sivun pituus
h	Taivutuksen suuntaisen sivun pituus
N	Signaalista otettujen näytteiden määrä
n_1	Ominaistaajuus
x_1	suurin siirtymä, joka syntyy, kun oma paino asetetaan vaikuttamaan värähtelyn suuntaan
Neperin luku	Matemaattinen vakio. Likiarvo kuuden desimaalin tarkkuudella on 2.71828. (Valtanen 2016, 154)
W	Taivutusvastus on lujuusopin suure, minkä yksikkö on mm^3 .
%	Prosentti
g	Putoamiskiihtyvyys, mikä on likimäärin 9.81 m/s^2 .
Hz	Hertzi eli värähtelyn taajuus.
km	Kilometri
milli-g	Tuhannesosa g:stä
min	Minuutti
m/s	Metriä sekunnissa
V	Voltti

Lyhenteet

CLT	Cross Laminated Timber eli ristiin liimatuista laudoista valmistettu puutuote (Puuinfo 2020b).
DFT	Discrete Fourier Transform, diskreetti Fourierin muunnos. Muunnoksessa signaali jaetaan taajuuskomponentteihin ja niiden suhteellinen voimakkuus määritetään. (Tervo 2001, 5–6.)
FFT	Fast Fourier Transform, nopea Fourierin muunnos, mikä on nopeampi laskentaalgoritmi DFT:stä (Tervo 2001, 9).
LVL	Puusta sorvattuja viiluja yhteen liimaamalla valmistettu puutuote eli viilupuu (Puuinfo 2020b).
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems, mikä on suomeksi mirko systeemi.
RFEM	Dlubal Software GmbH:n rakenteiden suunnittelu ja analysointi ohjelmisto.
WLAN	Wireless Local Area Network eli langaton lähiverkko.

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana oli Karelia-ammattikorkeakoulu. Työn tavoitteena oli selvittää, mitä on mahdollista saada selville kiihtyvyyssantureilla Opiskelija-asunnot Oy Joensuun Ellin Lighthouse-puukerrostalon värähtelystä tuullessa. Mittaukset haluttiin suorittaa, koska vastaavanlaisesta kerrostalosta ei ole tehty aiemmin värähtelymittauksia, sillä se on vielä varsin uusi tapa rakentaa.

Mittausten suorittamiseen käytettiin toimeksiantajan asentamia kiihtyvyyssantureita, joiden käytöstä heillä oli jo vähän kokemusta. Kunnollisia mittaustuloksia he eivät kuitenkaan vielä olleet kerrostalosta saaneet, minkä johdosta heitä kiinnosti mihin laitteistolla oikeasti pystyy. Heillä on myös aikomuksena käyttää antureita muissa projekteissa.

2 Kohde

Opiskelija-asunnot Oy Joensuun Ellin rakennuttama vuonna 2019 valmistunut Lighthouse on Suomen korkein puukerrostalo (kuva 1). Se sijaitsee Joensuun Penttilässä Pielisjoen rannalla osoitteessa Penttilänkulma 2. Talossa on 14 kerrosta, ja sen korkeus on lähes 50 metriä. Asuntoja siinä on 117. (Sillanpää 2019.)



Kuva 1. Penttiläankulma 2, Lighthouse (Kuva: Arcadia Oy Arkkitehtitoimisto).

Lighthouse eroaa merkittävästi normaalista kerrostalosta, sillä runkorakenne on hissikuilua myöten valmistettu massiivipuutuotteista. Seinärakenteet ovat LVL-viilupuuta ja välipohjat ovat CLT:tä eli ristiin liimattua puuta. Ainoastaan ensimmäinen kerros väestönsuojineen on tehty betonista. (Vara 2020.) Rakennus on jäykistetty teräksisillä jännetangoilla, mikä tekee siitä poikkeuksellisen, ja se on uutta Suomessa ja Euroopassa. Se on Euroopan korkein jännetangoilla jäykistetty kerrostalo. (Sillanpää 2019.)

3 Teoriatausta

3.1 Värähtely

Kappaleen liikettä, mikä toistuu jaksollisesti, sanotaan värähtelyksi tai heilahteluksi. Esimerkiksi heilurin liike tai kitaran kielen värähtely. Värähtelevässä systeemissä yleisesti kineettinen energia muuttuu potentiaalienergiaksi ja päinvastoin. (Rao 2011, 13.)

3.2 Vaimennus

Vaimennus poistaa energiaa värähtelevästä systeemistä. Vaimennusvoimat vastustavat liikettä ja muuttavat liike-energian esimerkiksi lämmöksi. Jos poistuvaa energiaa ei korvata, värähtely vaimenee lopulta kokonaan. (Pennala 1999, 18, 62.)

On olemassa myös poikkeustapauksia, missä vaimennus ei poista vaan lisää energiaa värähtelevään systeemiin. Tällöin värähtelyn amplitudi pyrkii itsestään jatkuvasti kasvamaan. (Pennala 1999, 18, 62.)

3.3 Heräte

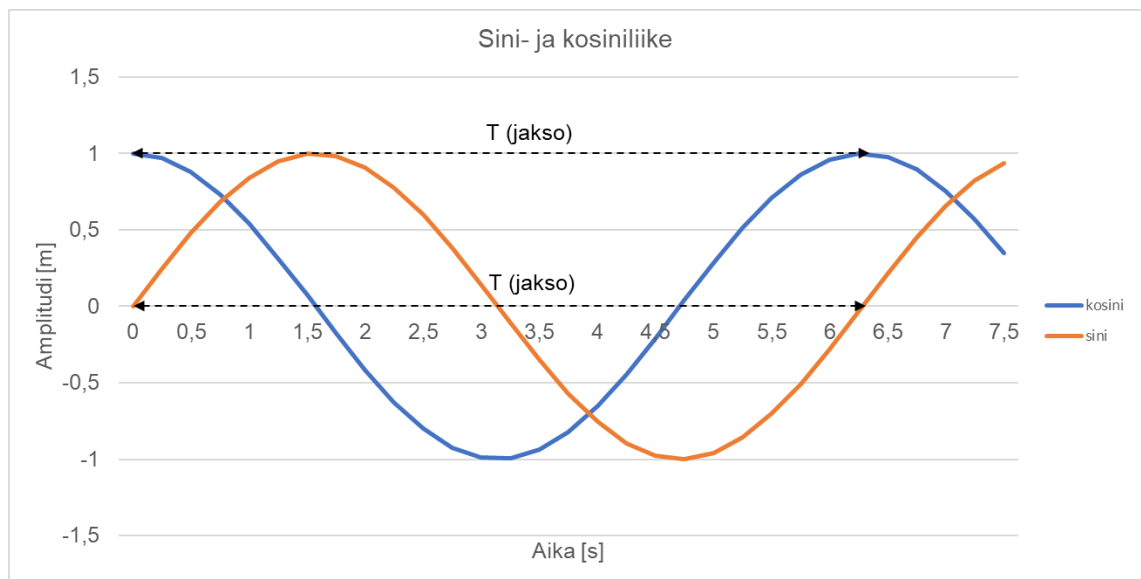
Heräte on systeemiin vaikuttava voima tai pakkosiirtymä. Heräte voi olla jaksollinen, jaksoton, impulssimainen tai itseherätteen. (Pennala 1999, 18–20.)

Jaksollisia herätteitä ovat esimerkiksi koneissa pyörivät tai edestakaisin liikkuvat massaepäkeskeiset akselit, mitkä aiheuttavat jaksollisia pakkovoimia. Jaksottomat herätteet ovat pitkinä ajan jaksoina satunnaisesti muuttuvia voimia, kuten maanjäristys tai raskaiden ajoneuvojen aiheuttamat tärähdykset maaperään. Impulssiheräte on lyhyt ja iskumainen voima. Se aiheuttaa yleensä lyhytkestoisia värähtelyjä. Itseherätteisissä ilmiöissä systeemin omat ominaisuudet aiheuttavat

jaksollisia herätteitä. Ne johtuvat epästabiileista fysikaalisista ilmiöistä kuten negatiivinen vaimennus. (Pennala 1999, 18–20.)

3.4 Harmoninen värähtely

Systemi voi värähdellä eri tavoin. Vapaassa värähtelyssä systeemi värähtelee alimmalla ominaisvärähtelytaajuudella ilman herätettä. Jos edellä mainittu värähtely vaimenee, on kyseessä vaimennettu vapaa värähtely. Pakkovärähtelyssä systeemiin vaikuttaa heräte, ja silloin se värähtelee herätteen taajuudella. Harmoninen värähtely on pelkistettynä sini- tai kosiniliikettä (kuvio 1). (Pennala 1999, 21–22.)



Kuvio 1. Sini- ja kosiniliike

3.5 Rakennuksen värähtely

Rakennukseen kohdistuvat dynaamiset kuormat voivat saada sen värähtelemään. Dynaaminen kuorma tarkoittaa voimaa, mikä muuttuu ajan suhteen. (Allen, McDougal & Tedesco 1999, 2–3.)

Dynaamisien kuormien lähteitä on lukemattomia, mutta suurin osa voidaan jakaa seuraaviin kategorioihin; luonnonvoimat, koneiden aiheuttamat voimat ja

ajoneuvojen aiheuttamat voimat. Luonnonvoimia ovat tuulikuormat, maanjäristyksen aiheuttamat kuormat ja aaltojen aiheuttamat kuormat. Koneiden aiheuttamat kuormat ovat esimerkiksi IV-koneiden ja hissien pyörivät moottorit. Ajoneuvot voivat aiheuttaa dynaamisia kuormia rakenteisiin esimerkiksi, jos rakennuksen vieressä on tie, missä kulkee raskaita ajoneuvoja ja tärähtely välittyy maaperän kautta rakenteisiin. (Allen, McDougal & Tedesco 1999, 2–3.)

3.5.1. Vaimennettu vapaa värähtely

Rakennukseen voi olla varastoituneena potentiaalienergiaa. Energiaa voi olla varastoituneena vetosauvoihin tai rakennus on altistunut pakkosiirtymälle esimerkiksi jää- tai lumikuorman takia. (Pennala 1999, 19.)

Jos varastoitunut energia vapautuu äkillisesti sauvan katkettua tai jää- tai lumikuorman irrottua, pyrkii rakennus palautumaan tasapainoasemaan ja voi alkaa värähdellä (Pennala 1999, 19). Värähtelytyyppi on silloin vaimennettu vapaa värähtely, koska rakennukseen ei kohdistu ulkoisia voimia, värähtely tapahtuu rakennuksen alimmalla ominaisvärähtelytaajuudella ja värähtely vaimenee lopulta kokonaan rakenteiden vaimennuksen takia (Allen ym. 1999, 9).

3.5.2 Pakkovärähtely

Rakennus voi pakkovärähdellä jaksollisen herätteen johdosta. Kun pakkovärähtelyn taajuus on sama tai hyvin lähellä rakennuksen jotakin ominaistaajuutta, puhutaan resonanssista. (Allen ym. 1999, 9.)

Resonanssissa värähtelyn amplitudi kasvaa nopeasti erittäin suureksi, mitä vain rakenteen vaimennus rajoittaa. Koneiden aiheuttamat herätteet ovat usein jaksollisia ja voivat aiheuttaa pakkovärähtelyn. (Allen ym. 1999, 9.) Myös yksi jaksollisen herätteen lähde on ilmanvirtauksesta syntyvä pyörreratailmiö (Pennala 1999, 19).

3.6 Tuulen aiheuttamat herätteet

Tuulesta aiheutuu yleensä jaksottomia herätteitä. Ne voivat aiheuttavaa rakennuksessa värähtelyinä tunnettuja värähtelyjä. (Pennala 1999, 19.) Muutamissa poikkeuksissa tuuli voi aiheuttaa jaksollisen herätteen, kuten pyörreratailmiössä ja laukkaamisessa.

Tuuli voi aiheuttaa rakennukseen kuormia tuulen suunnassa ja tuulen suuntaan nähden poikittain (Kawada & Scott 2010, Gurley, Tognarelli & Kareem 1997, Elbakheit 2018 mukaan). Yleensä poikittaiset kuormat tuulen suuntaan nähden ovat suurempia pyörreratailmiön takia (Steffen 2016, 21).

3.6.1 Pyörreratailmiö

Pyörreratailmiössä rakennukseen kohdistuva tuuli kiertää rakennuksen ja irrotessaan rakennuksen sivuilta muodostaa pyörteet. Pyörteet irtoavat rakennuksen sivuilta vuorotellen aiheuttaen tuulensuuntaan nähden kohtisuorat voimat. Jos tuulen nopeus on riittävän korkea, jotta pyörteet irtoavat samalla taajuudella kuin rakennuksen ominaistajuus, voi se alkaa värähtelemään. (Suomen Standardisoimisliitto SFS 2010,196.)

3.6.2 Laukkaaminen

Laukkaaminen on negatiivisesta vaimennuksesta johtuva aroelastinen epästabiiliusilmiö (Pennala 1999, 20). Se voi tapahtua alhaisemmissa tuulen nopeuksissa kuin missä pyörreratailmiön heräte olisi samalla taajuudella rakennuksen ominaistajuuden kanssa (Smith 1962, 3).

Laukkaamisessa rakennus värähteleä alimmalla ominaisvärähtelytaajuudellaan ja värähtelytyyppi on itseherätteen vapaa värähtely eli värähtely aiheuttaa aerodynaamisen epävakaan ja epävakausta aiheuttaa värähtelyn. Värähtely tapahtuu tuulen suuntaan nähden poikittaisessa taivutusstilassa ja alkaa vasta tietyllä

tuulen nopeudella. Sen amplitudi kasvaa nopeasti tuulen kasvaessa. (Suomen Standardisoimisliitto SFS 2010, 220.)

3.7 Kiihtyvyyssanturit

Kiihtyvyyssanturit mittaavat nimensä mukaan niihin kohdistuvia kiihtyvyyksiä. Kiihtyvyydet voivat olla staattisia, kuten maan vetovoima tai dynaamisia, kuten liike tai värähtely. On olemassa antureita, mitkä mittaavat yhden, kahden tai kolmen askelin suuntaan, joista viimeisin alkaa olemaan yleisin valmistuskustannuksien laskemisen takia. (Klopfenstein 2021.)

Kiihtyvyyssantureita on analogisella tai digitaalisella ulostulolla. Analogisella ulostulolla anturi antaa ulos jatkuvaa jännitettä, mikä kasvaa samassa suhteessa kiihtyvyyden kasvamisen kanssa. Esimerkiksi 2,5 V, kun kiihtyvyys on 0 g, 2,6 V, kun kiihtyvyys on 0,5 g ja 2,7 V, kun kiihtyvyys on 1 g. Digitaalisella ulostulolla olevat anturit käyttävät yleisimmin pulssinleveysmodulaatiota. Näissä antureissa ulostuleva jännite muutetaan neliöaaloksi, jossa jännite on joko päällä, eli 1, tai pois päältä, eli 0. Kiihtyvyyden suuruus ja aika, jolloin jännite on päällä, kasvavat samassa suhteessa. (Dimension Engineering LLC 2021.)

Kiihtyvyyssanturi tyyppejä on kolmenlaista, joista jokainen soveltuu hieman erilaiseen käyttötarkoitukseen. Toimintatapoja ovat, pietsosähköinen, pietsoresistiivinen ja kapasitiivinen.

3.7.1 Pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi

Pietsosähköisen anturin toiminta perustuu pietsosähköilmiöön. Ilmiössä pietsosähköisen kristallin vastakkaisille sivuille syntyy vastakkaiset sähköiset varaukset, kun siihen kohdistuu painetta. (Fleischer 2021.) Anturissa tunnetun massa on kiinni kristallissa, ja kun anturiin kohdistuu kiihtyvyyttä, massa painuu kristallia vasten. Kristalli on kytketty virtapiiriin, mikä mittaa syntyvän jännitteen. Jänniteen kasvu on suoraan verrannollinen siihen kohdistuvaan paineeseen. Kun massa on

tiedossa, voidaan laskea jännitteen suuruus tietylle kiihtyvyydelle. (APT International, Inc. 2021.)

Etuna pietsosähköisissä kiihtyvyyssantureissa on sen rakenteen yksinkertaisuus, mikä tekee siitä hyvin kestävä. Niissä on laajin taajuusalue kaikista anturityypeistä. Pietsosähköiset anturit ovat yleisimpiä ja käyttökohteita ovat esimerkiksi koneiden ja laakereiden värinämittaukset, navigointilaitteet, iskutestit ja seismiset mittaukset. (APT International, Inc. 2021.)

3.7.2 Pietsoresistiivinen kiihtyvyyssanturi

Pietsoresistiivinen anturi toimii lähes samalla tavalla kuin pietsosähköinen, mutta resistiivisessä puristettavan materiaalin resistanssi muuttuu. Resistanssin muuttuminen on suhteessa kiihtyvyyteen. Näissä antureissa on erittäin suuri kaistaajuus ja matala herkkyys. (Hanly 2021.)

Pietsoresistiiviset anturit soveltuvat parhaiten impulssimaisiin mittauksiin, missä kiihtyvyydet ja taajuudet ovat hyvin suuria. Niitä käytetään autojen törmäystestien ja aseiden testauksissa. (Hanly 2021.)

3.7.3 Kapasitiivinen MEMS-anturi

Kapasitiiviset anturit valmistetaan yleisesti MEMS-teknologialla. Yleensä puhutaan vain MEMS-antureista, vaikka MEMS-teknologialla voidaan valmistaa muunkin mallisia antureita. MEMS on lyhenne englanninkielisestä nimestä Micro Electro Mechanical Systems. Suomenkielinen termi on mikrosysteemi. (Hanly 2021.)

Kapasitiiviset MEMS-anturit ovat hyvin pieniä kokoisia ja halpoja valmistaa. Niitä on helppo integroida elektroniikkaan ja esimerkiksi puhelimissa käytetään niitä. Anturin toiminta perustuu pienten levyjen liikkumiseen ja niiden välisen

kapasitiivisuuden muuttumiseen (Jost 2019). Anturit soveltuvat parhaiten matalien taajuuksien ja kiihtyvyyksien mittaamiseen (Hanly 2021).

4 Mittausmenetelmät

4.1 Käytettävät kiihtyvyyssanturit

Värähtelymittauksissa käytettiin kolmea BeanAir:n BeanDevice WILLOW X-Inc langatonta kiihtyvyyssanturia. Beanair on saksalainen yritys, joka valmistaa langattomia antureita esimerkiksi rakenteiden kunnon tarkkailuun, maanmittaukseen ja ympäristön tarkkailuun (BeanAir 2021b). Anturit toimivat WLAN yhteyden avulla. Ne käyttävät kiihtyvyyden yksikkönä on putoamiskiihtyvyyttä g. Yksi g vastaa 9.81 m/s^2 .

Valmistaja ilmoitti antureiden mittausalueeksi $\pm 2 \text{ g} \pm 1.25 \%$ tarkkuudella X ja Y akselien suuntaan ja $\pm 0.2 \%$ tarkkuudella Z akselin suuntaan. BeanAir:n mukaan anturein toiminta perustuu MEMS-teknologiaan. (BeanAir 2021, 6.) Toimeksiantaja oli asentanut anturit valmiiksi kohteeseen (kuva 2).



Kuva 2. Kiihtyvyyssanturi kohteessa.

4.2 Kiihtyvyyssanturi mittausten analysointi

Kiihtyvyyssanturit kertovat kiihtyvyyden suuruuden tietyllä aikahetkellä. Tallennettu mittaustieto voidaan esittää kuvaajalla, jossa vaaka-akselilla on aika ja pystyakselilla on kiihtyvyyden arvot eli kuvaajassa näkyvät kiihtyvyydet ajan funktiona. Tällöin kiihtyvyyden arvot on esitetty aikatasossa. Kuviossa 2 on esitetty kuvitteellisen anturin kiihtyvyyksmittauksia. Kyseistä kuvaajaa analysoimalla huomataan taajuuden ja amplitudin eli värähtelyn voimakkuuden käyvän korkeammalla mittauksen puolivälissä. Todellisuudessa kerätyssä tiedossa voi olla paljon kohinaa ja useampia taajuuksia päällekkäin, ettei aikatasossa olevasta kuvaajasta pystytä selvittämään muuta, kuin kiihtyvyyksien suuruudet. Jotta kuvaajasta näkisi mittauksessa esiintyvät taajuudet, on tieto muutettava taajuustasoon.

Tiedon esittämiseksi taajuustasolla tarvitaan Fourierin-muunnosta. Fourierin-muunnosta käytetään signaaleissa esiintyvien taajuuksien analysointiin. Muunnoksessa signaali jaetaan taajuuskomponentteihin ja niiden suhteellinen voimakkuus määritetään. Jos signaalissa on harmonisia taajuuksia, ne näkyvät kaaviossa piikkeinä. Tietokoneella laskettaessa käytetään nopeaa Fourierin-

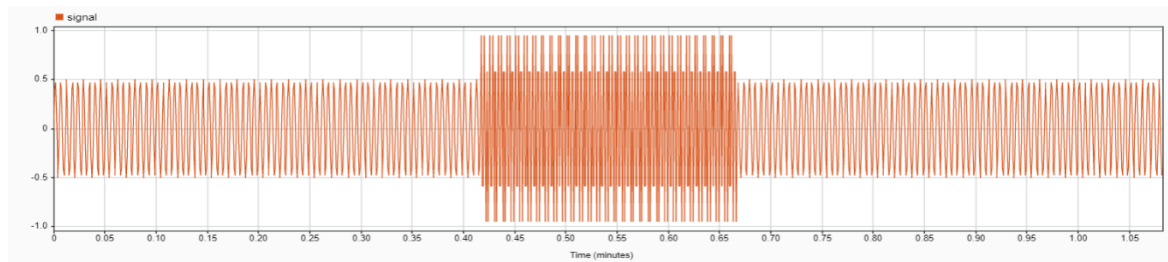
muunnosta, mikä on englanniksi fast Fourier transform ja lyhennettynä FFT. FFT on nopeampi laskenta algoritmi diskreetistä Fourierin-muunnoksesta, mikä on englanniksi discrete Fourier transform ja lyhennettynä DFT. Diskreetti muunnos tarkoittaa, että analysoitavassa signaalissa on äärellinen määrä arvoja. Myös diskreetin muunnoksen lopputuloksena on äärellinen määrä arvoja. (Tervo 2001, 5–6.) Tarkemmin funktioon ja sen toimintaan ei tässä yhteydessä ole tarvetta mennä. Mainittakoon vain, että diskreetissä Fourierin-muunnoksessa tarvitaan N potenssin kertolaskua, $N(N - 1)$ yhteenlaskua ja Neperin luvun korottamista kompleksiin potenssiin, mitkä vaativat paljon laskentakapasiteettia. N tarkoittaa signaalista otettujen näytteiden määrää. Eli jos signaalin näytteistystaajuus on 100 Hz ja näytteiden ottoaika on 10 sekuntia, tulee signaali koostumaan 1000 näytteestä. FFT:ssä signaali jaetaan useaan kertaan aina kahteen osaan, mikä laskee laskentaan kuluvaan aikaan merkittävästi. Tästä syystä signaalin tulee koostua kahden kokonaislukupotenssin määrästä näytteitä. (Tervo 2001, 9.) Suhde, jolla FFT vähentää laskenta-aikaa DFT:hen verrattuna, voidaan laskea likimäärin kaavalla 1 (Allen ym. 1999, 217). Eli, jos signaali koostuu 2^{20} määrästä näytteitä ja FFT:llä laskentaan kuluisi aikaa kymmenen minuuttia, DFT:llä laskentaan menisi vuosi (Allen ym. 1999, 217).

$$\frac{FFT}{DFT} \sim \frac{N \log_2 N}{N^2} \quad (1)$$

missä

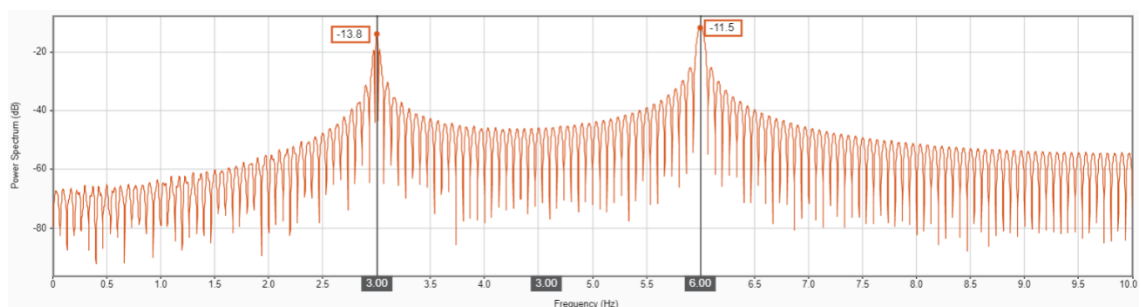
N = näytteiden lukumäärä

Tässä työssä kiihtyvyyssmittausten analysointiin käytetään MathWorks:n kehittämää MATLAB ohjelmistoa ja siihen sisään rakennettua signaalien analysointityökalua. MathWorks on yhdysvaltalainen matemaattisten laskentaohjelmistojen kehittäjä. MATLAB on ohjelmointi alusta, joka on suunniteltu tietojen analysointiin sekä systeemien ja tuotteiden suunnitteluun. Ohjelmaa käytetään MATLAB:n ohjelmointi kielellä. (MathWorks 2021.) Signaalin analysointityökalua käytetään perinteisemmän ohjelman tapaan vedä ja pudota tyylillä ilman kirjoitettuja komentoja. Työkalulla mittausten esittäminen aikatasossa (kuvio 2), vertailu ja taajuustasossa tarkastelu oli huomattavasti sujuvampaa verrattuna Exceliin.

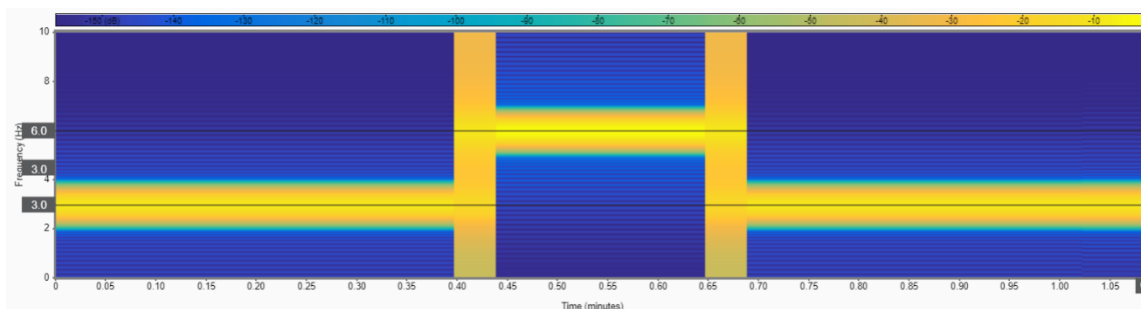


Kuvio 2. Esimerkki signaali, missä taajuus vaihtuu 3 Hz:stä 6 Hz:iin ja takaisin 3 Hz:iin, esitetty aikatasossa MATLAB:lla

Signaalin muuttamiseksi taajuustasoon (kuvio 3) MATLAB suorittaa tehosppektri arvion Welchin metodilla. Siinä jaetaan aikatasossa oleva signaali pienempiin liittäin oleviin osiin. Jokaiselle osalle suoritetaan FFT ja lopuksi lasketaan tulokista keskiarvo. Oletus asetuksina on limittäisyys 50 % eli seuraava osa alkaa aina edellisen puolivälistä ja osien pituus on koko mittauksen pituus jaettuna 128:lla. Oletusasetuksia käytettiin analysoinnissa sillä ne toimivat riittävän hyvin. Kuviossa 3 nähdään huippuina 3 Hz ja 6 Hz eli esimerkki signaali koostuu kyseisistä taajuuksista. Koska Welchin metodissa mittaus on jaettu osiin ja jokaisesta on tehty oma taajuusanalyysi, voidaan tulokset esittää spektrogrammilla (kuvio 4). Siinä vaaka-akselilla on aika, pystyakselilla taajuus ja esiintyvä taajuuden voimakkuus eli taajuustason huipun korkeus esitetään muuttuvalla värillä. Etuna spektrogrammissa on se, että voidaan määrittää missä mittauksen ajankohdassa on mikäkin taajuus tapahtunut. Kuten kuviosta 4 nähdään, signaalin taajuus on ollut alussa ja lopussa 3 Hz:ä mutta puolivälissä taajuus on käynyt 6 Hz:ssä. Kuviossa 4 näkyvät keltaiset palkit taajuuden vaihtuessa johtuvat tavasta, millä esimerkkisignaali luotiin.



Kuvio 3. Esimerkki signaali muutettuna taajuustasoon MATLAB:lla

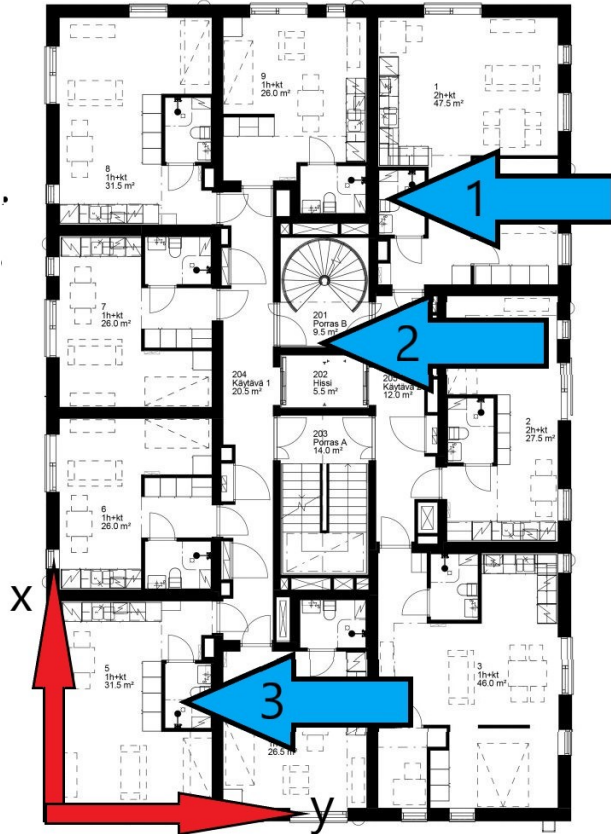


Kuvio 4. Esimerkki signaali muutettu spektrogrammiksi MATLAB:lla.

4.3 Antureiden sijainti ja käyttö

Kiihtyvyyssanturit on asennettu kerrostalon ullakolle välikaton rakenteisiin. Anturit on numeroitu yhdestä kolmeen ja niihin tullaan viittaamaan kyseisillä numeroilla. Kaikki anturit ovat asennettuna samansuuntaisesti siten, että X-akseli on rakennuksen pidemmän sivun suunnassa ja Y-akseli lyhyen sivun. Kuvasta 2 nähdään anturien paikat ja akselien suunnat pohjapiirroksen nähdessä.

Antureita käytettiin toimeksiantajalta lainaan saadulla kannettavalla tietokoneella. Koneelle oli asennettu Beanair:n BeanScape ohjelmisto millä käynnistetään serveri johon anturit yhdistyvät. Serverin oli oltava päällä koko mittauksien suorittamisen ajan, minkä takia tietokoneen tuli olla ullakolla koko mittauksen ajan. Ohjelmistolla määritettiin mittauksessa käytettävät näytteenottotaajuudet ja mittauksien kestot anturi kohtaisesti. Alin näytteenottotaajuus oli 1 Hz ja ylin 2000 Hz. Mittauksen kestolle oli rajoitteena anturien sisäisen muistin määrä. Valmistajan esitteen mukaan antureihin voi tallentaa jopa 5000000 näytepistettä mutta mittauksia tehtäessä anturien muisti täyttyi noin 770000 näytteellä.



Kuva 1. Antureiden sijainnit (Kuva: Arcadia Oy Arkkitehtitoimisto).

4.4 Mittauksissa huomioitavat asiat

Kiihtyvyyssmittauksia suunnitellessa piti ottaa huomioon erinäisiä asioita. Yhtenä isoimpana asiana oli ajoittaa mittauksen ajankohta mahdollisimman tuuliselle päivälle, jolloin rakennuksen heiluminen olisi todennäköisintä.

Sähän liittyen tuli myös valita sääasema mahdollisimman läheltä kohdetta, minkä tuulihavaintoja verrataan kiihtyvyyssmittauksien kanssa. Lähimpänä olisi ollut epävirallinen sääasema Kuhasalon jätevedenpuhdistamolla, mutta tuulisten päivien alkaessa heidän havaintonsa lakkasivat tallentumasta. Sääasemaksi valikoitui sen sijaan Tuiskavanluoto, mikä sijaitsee Pyhäselällä 7 km kerrostalosta lounaaseen (kuva 3). Tuiskavanluodon havaintoihin pääsee käsiksi Ilmatieteen laitoksen verkkosivuilta. Havainnoista ilmenee tuulen suunta, tuulen nopeus ja puuskien nopeus.

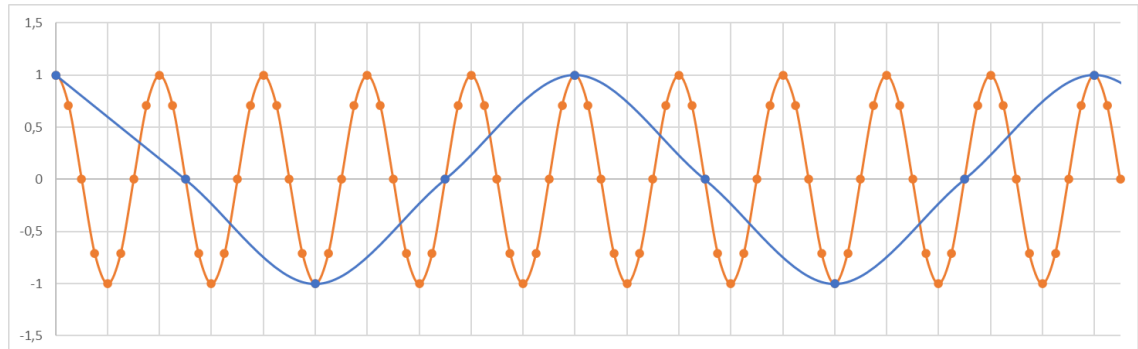


Kuva 2. Tuiskavanluodon sijainti ja etäisyys kohteesta (Kuva: Maanmittauslaitos).

Toisena huomioitavana asiana oli mahdolliset häiriöt ja mittauksen kohina. Häiriöitä voi tulla, jonkin laitteen käynnistyessä ja niin aiheuttaen värähtelyjä. Värähtelyt voivat sotkea mittaukset, jos niiden taajuudet ovat päällekkäin rakennuksen ominaisvärähtelytaajuuden kanssa. Kerrostalon ullakolla on IV-konehuone mikä voi aiheuttaa värähtelyjä ja yksi antureista on kiinnitetty aivan hissikuilun viereen mistä hissillä liikkuessa välittyy värähtelyjä anturille.

Huomioitavaa oli myös näytteenottoaajuuden valinta. Suurin vaikuttava tekijä tässä on taajuuksien laskostuminen. Laskostumisen välttämiseksi näytteenottoaajuuden tulee olla vähintään kaksi kertaa suurempi, kuin oletettu mittauksessa ilmenevä taajuus (Kotelnikov 1933, Lüken 1999, 2 mukaan). Jos näytteenottoaajuus on liian pieni, mitattu taajuus vääristyy ja tulokseksi saadaan todellisuutta pienempi taajuus. Esimerkkinä kuvio 5, missä on kuvitteellinen signaali oranssilla

ja sinisellä liian matalalla näytteenottotaajuudella muodostettu vääristynyt signaali.



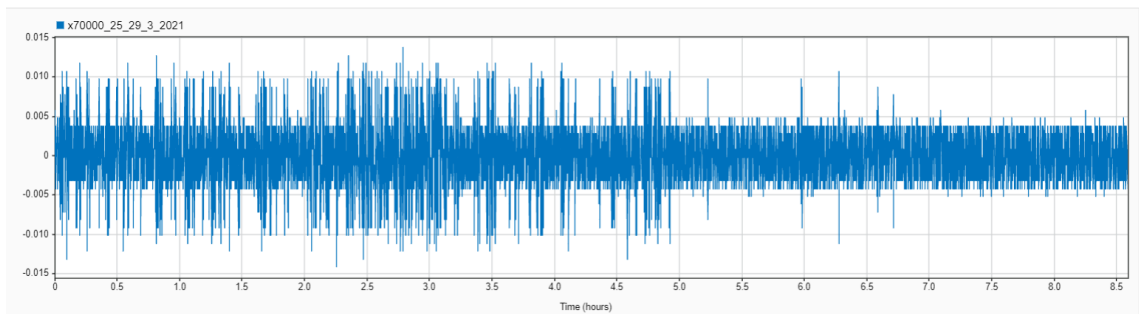
Kuvio 5. Laskostumisen esimerkki.

4.5 Näytteenottotaajuuden valinta

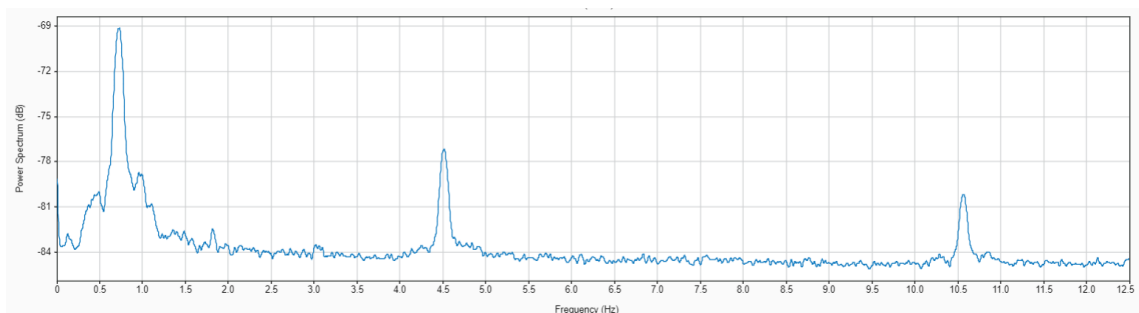
Laskostumisen välttämiseksi voisi käyttää korkeinta mahdollista näytteenottotaajuutta mutta rajallisen muistin takia se ei ole järkevää, sillä mittauksen kesto jää silloin lyhyeksi. Maksimi näytteiden määrän ollessa 770000, 2000 Hz:n näytteistyksellä voidaan tallentaa vain $770000/2000/60 \text{ min} = 6.4 \text{ min}$. Jos rakennus värähtelisi pyörreratailmiön tai laukkaamisen johdosta, Suomen Standardisoimisliitto SFS:n (2010,196) mukaan se värähtelisi molemmissa tapauksissa alimmalla ominaisvärähtelytaajuudellaan. Rakennuksen laskennalliset ominaistaajuudet ovat A-Insinööri Oy:n tekemän RFEM analyysin mukaan anturien Y suuntaan 1.129 Hz ja X suuntaan 1.583 Hz (Keskisalo & Rytönen 2021). Halutaan mahdollisimman pitkä mittauksen kesto, jotta voidaan varmemmin mitata siinä esiintyvät taajuudet. Pyritään käyttämään niin alhaista näytteenottotaajuutta, että korkeampien taajuuksien laskostuminen ei aiheuta ongelmia mittauksissa kiinnostavinta 1–2 Hz taajuusalueita.

Ensimmäisenä testissä oli 25 Hz:n näytteenottotaajuus. Mittaus suoritettiin 29.3.2021 kello 17.30 ja 30.3.2021 kello 1.30 välisenä aikana. Ensin tutkittiin anturin 2:n mittaukset, koska kyseinen anturi on kiinnitetty aivan hissikuilun viereen. Kuviossa 6 mittaukset X-akselin suuntaan. Siinä nähdään 4 milli-g:n taustakohina erottuvan 10 milli-g:n värähtelyjaksoja. Milli-g on g:n tuhannesosa, eli 1 milli-g on 0.001 g. 10 milli-g:n värähtely jaksot johtuvat hissien liikkumisesta. Kuviossa 7 on saman mittauksen taajuusspektri ja siitä huomataan hissien aiheuttavan

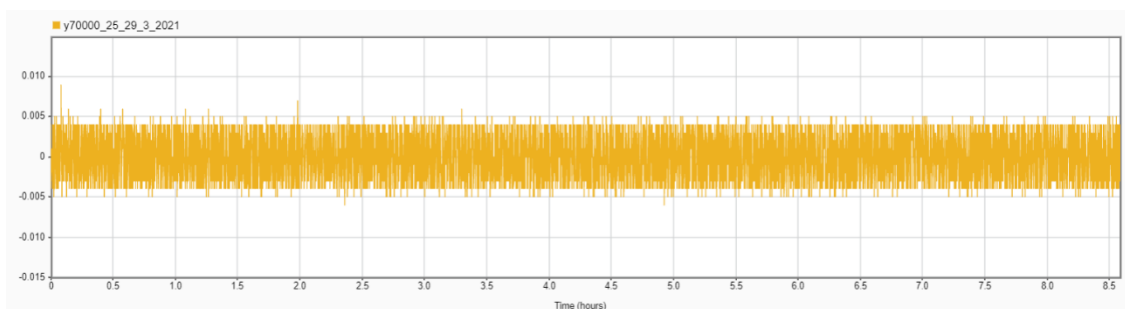
huiput taajuuksille 0.7 Hz, 4.5 Hz ja 10.5 Hz. Hissin värähtely siis sotkee rakennuksen ominaisvärähtelytaajuuden alueen. Y-akselin suuntaan hissi ei aiheuta värähtelyjä (kuvio 8). Todennäköisesti hissin moottorit pyörivät Y-akselin suunnan ympäri ja näin ollen värähtely tapahtuu vain X-akselin suunnassa. Samaan aikaan otettiin mittaukset myös antureilla 1 ja 3. Hissin aiheuttamat värähtelyt eivät välity niille antureille saakka. Testissä huomattiin jokaisen anturin mittauksessa olevan kohinaa ± 4 milli-g:n verran, minkä johdosta pienempien kiihtyvyyksien värähtelyjä ei pystytä aikatasosta erottamaan.



Kuvio 6. Anturin 2 mittaus X-akselin suunta 25 Hz näytteenottotaajuudella ajalta 29.3.2021 17.30–01.30.

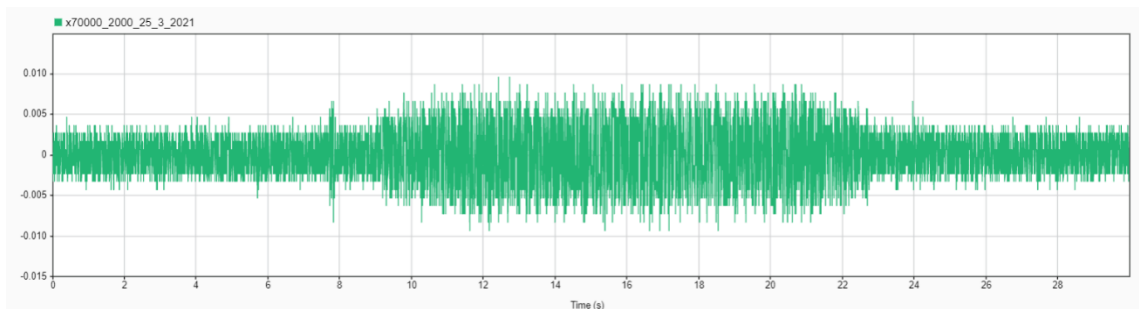


Kuvio 7. Taajuusspektri anturin 2 mittauksesta X-akselin suuntaan 25 Hz näytteenottotaajuudella ajalta 29.3.2021 17.30–01.30.

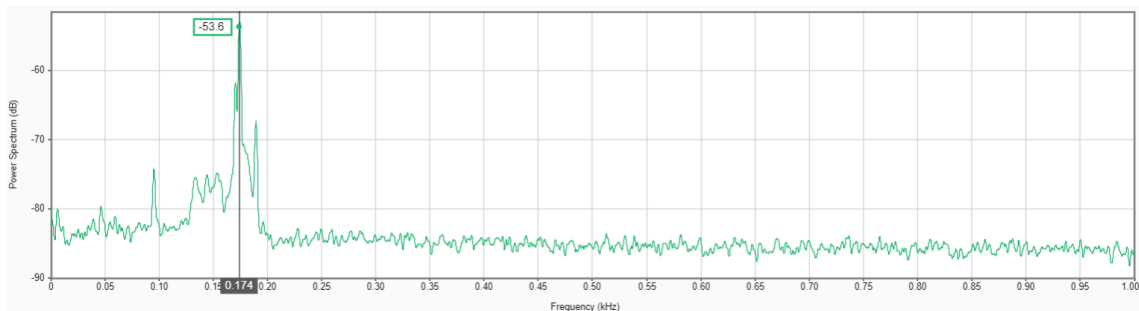


Kuvio 8. Anturin 2 mittaus Y-akselin suunta 25 Hz näytteenottotaajuudella ajalta 29.3.2021 17.30–01.30.

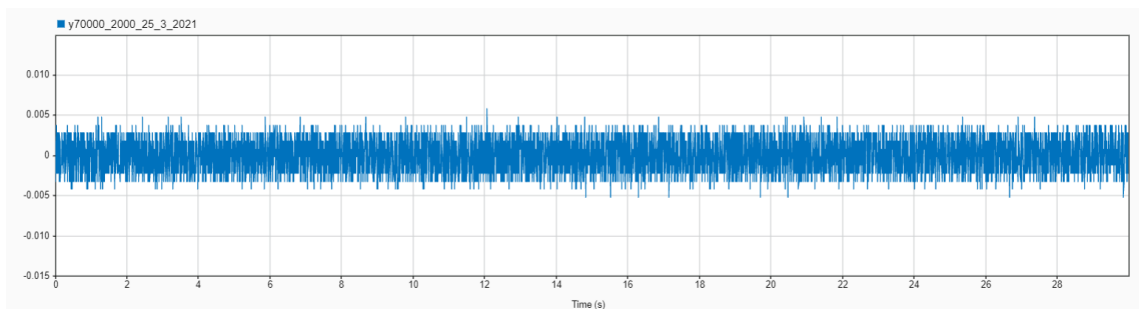
Hissin aiheuttamien värähtelyjen taajuuksien selvittämiseksi otettiin mittaus hissin ajon aikana 2000 Hz näytteenottotaajuudella (kuvio 9 ja 11). Kuviosta 10 nähdään että hissin värähtely tapahtuisi 174 Hz taajuudella. Eli 25 Hz näytteenottotaajuudella hissin taajuus laskostuu. Tämänkin mittauksen tulos voi olla laskostumista mutta 2000 Hz on korkein näytteenottotaajuus, joten sitä ei voi testata. Kuviosta 12 näkee, että hissin aiheuttaa myös värähtelyjä Y-akselin suunnassa. Värähtely ei kuitenkaan ole niin suurta, että se erottuisi aikatasossa taustakohinan alta (kuvio 11).



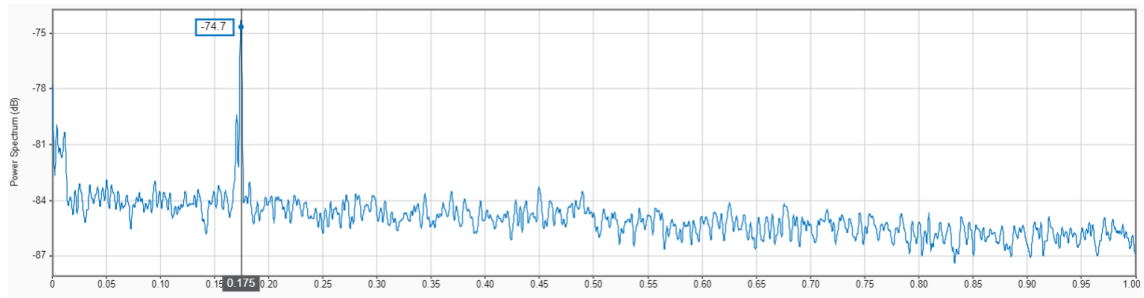
Kuvio 9. Anturin 2 mittaus X-akselin suunta 2000 Hz näytteenottotaajuudella hissin ajon aikana.



Kuvio 10. Taajuusspektri anturin 2 mittauksesta X-akselin suuntaan 2000 Hz näytteenottotaajuudella hissin ajon aikana.

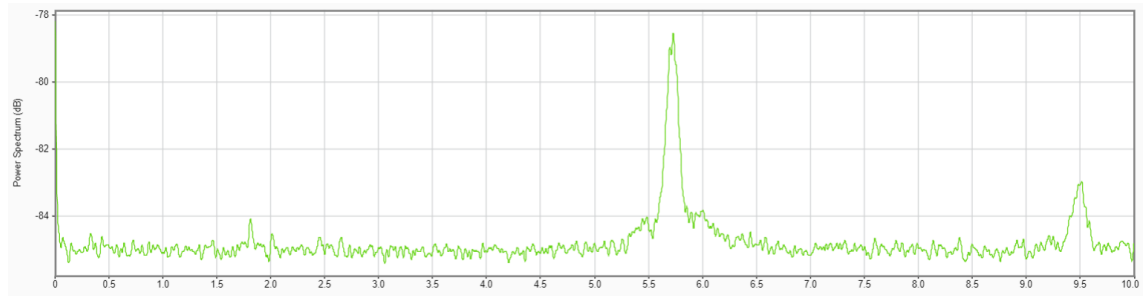


Kuvio 11. Anturin 2 mittaus Y-akselin suunta 2000 Hz näytteenottotaajuudella hissin ajon aikana.



Kuvio 12. Taajuusspektri anturin 2 mittauksesta Y-akselin suuntaan 2000 Hz näytteenottotaajuudella hissien ajon aikana.

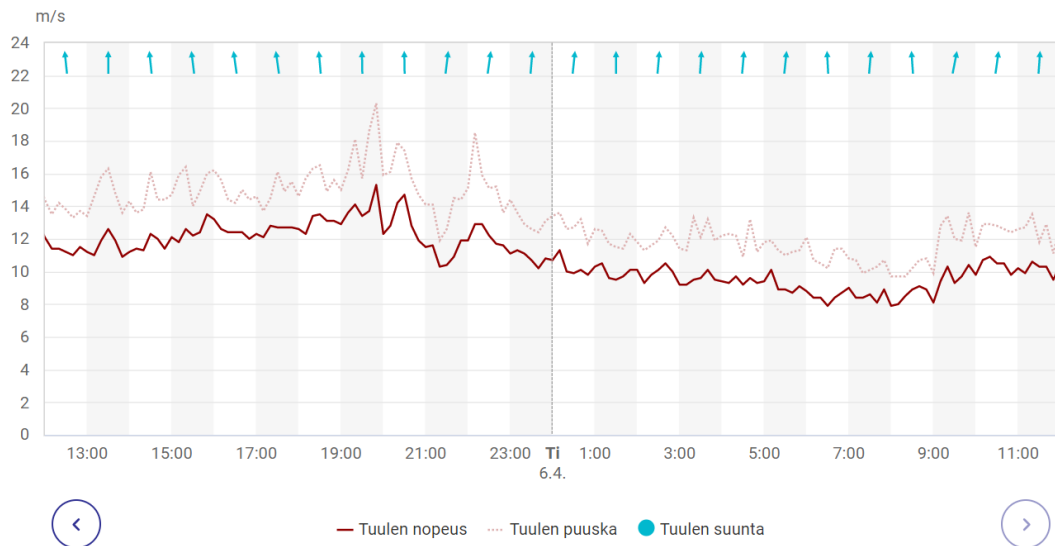
Koska hissien värähtelyn taajuuksia olivat laskostumisesta johtuvia 25 Hz näytteenottotaajuudella, testattiin seuraavaksi 20 Hz. Tällä taajuudella hissien taajuuksia laskostuu siten, ettei se aiheuta häiriöitä alle 5 Hz (kuvio 13). Tämä näytteenottotaajuus valikoitui käytettäväksi. Tällä taajuudella pystytään tallentamaan 10.5 tunnin ajan ja mittauksesta voidaan analysoida taajuuksia aina 10 Hz saakka. Mahdolliset rakennuksen värähtelyt alle 2 Hz taajuudella pitäisi silloin pystyä erottamaan signaalista.



Kuvio 13. Taajuusspektri anturin 2 mittauksesta X-akselin suuntaan 20 Hz näytteenottotaajuudella ajalta 4.4.2021 21.00–7.00.

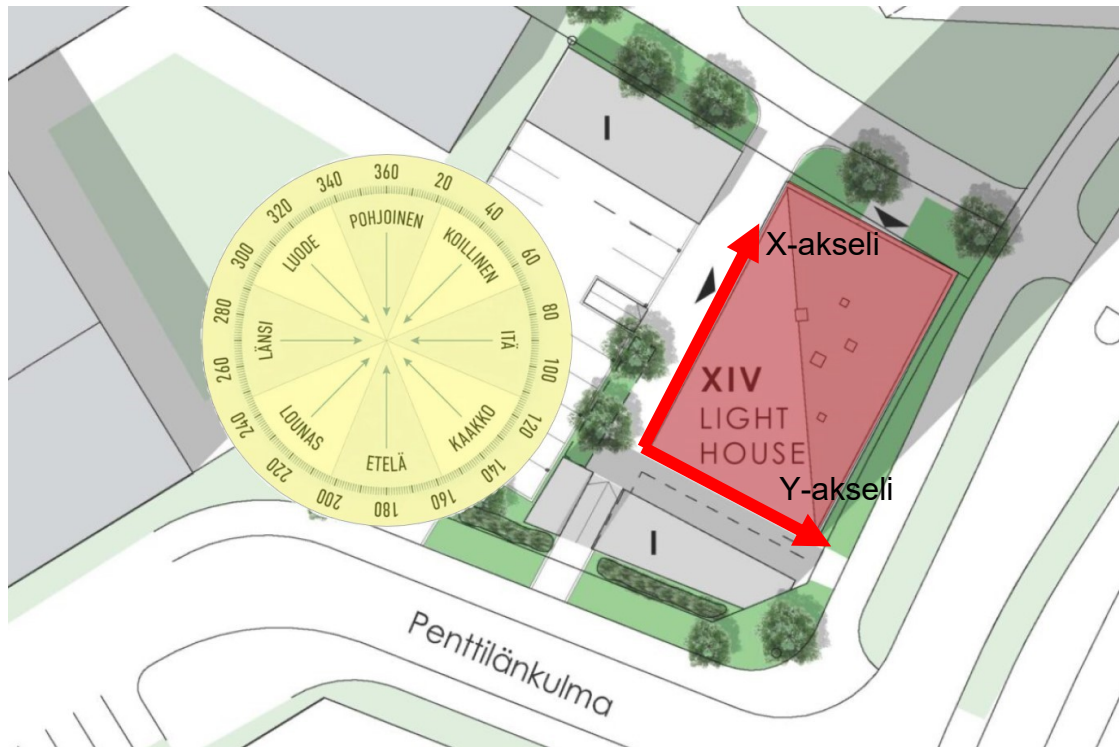
5 Mittausten tulokset

Mittauksia varten odotettiin mahdollisimman tuulista päivää. 5.4.2021 illaksi Ilmatieteenlaitos lupasi kovempaa tuulta ja kuvasta 4 nähdään Tuiskavanluodon havaintojen mukaan tuulen käyneen tuona päivänä korkeimmillaan 15 m/s ja puuskissa 20 m/s noin kello 20.00 aikaan. Mittaukset otettiin kello 15.00 ja 1.30 väliseltä ajalta. Tuuli on koko mittauksen ajan etelätuulta.



Kuva 3. Tuuli havainnot Tuiskavanluodolta 5.4.2021 12.00 - 6.4.2021 12.00 (Kuva: Ilmatieteen laitos).

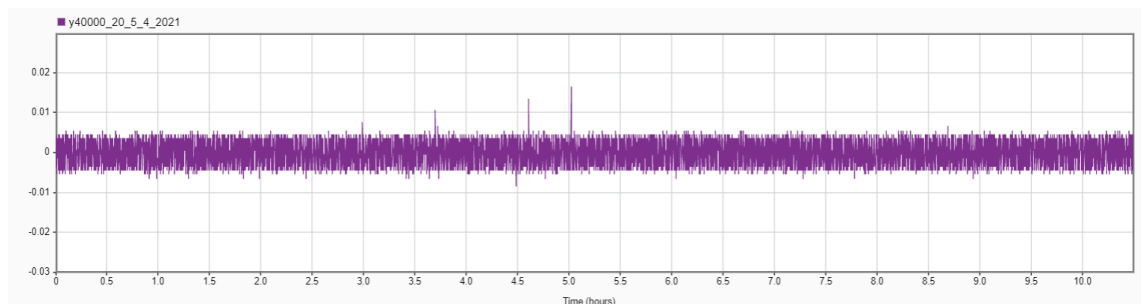
Kuvasta 5 nähdään kerrostalon ja antureiden akselien suunnat ilmansuuntiin nähden. Rakennuksen pidempi sivu eroaa pohjoissuunnasta noin 30 astetta. Voidaan silti ajatella antureiden X-akselin olevan tuulen suunnassa ja Y-akselin tuulen suuntaan nähden poikittain.



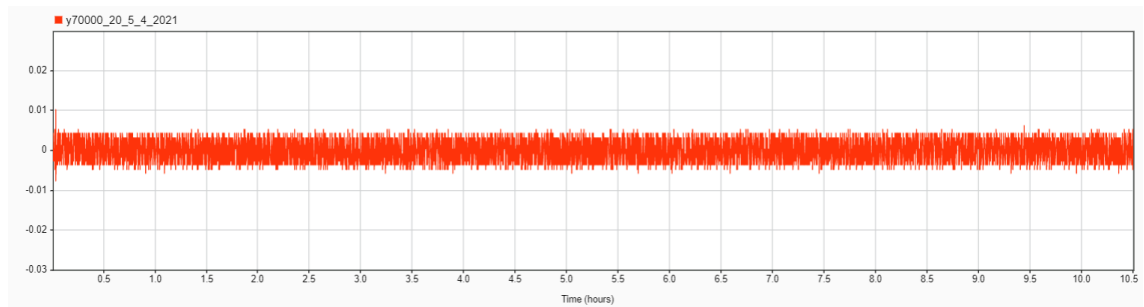
Kuva 4. Kerrostalo ja ilmansuunnat asteina (Kuva: Arcadia Arkkitehtitoimista, ilmansuuntakiekkö: Ilmatieteen laitos).

5.1 Y-suunta

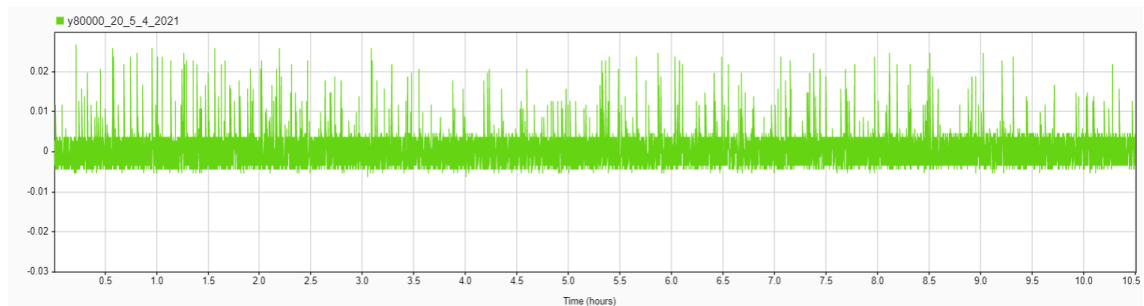
Kun tarkastellaan mittauksia Y-akselin suunnassa aikatasolla, ei pystytä erottamaan värähtelyjä taustakohinasta (kuviot 14, 15 ja 16). Anturi 3:n mittauksessa esiintyy noin 20 milli-g:n suuruisia piikkejä positiiviseen suuntaan koko mittauksen ajan. Piikkeihin tarkentamalla huomataan niiden tapahtuneen yhden näytteen aikana (kuvio 17). Todennäköisesti anturiin on kohdistunut iskumaisia voimia. Sama ilmiö esiintyi kyseisessä anturissa aiemmissakin testauksissa.



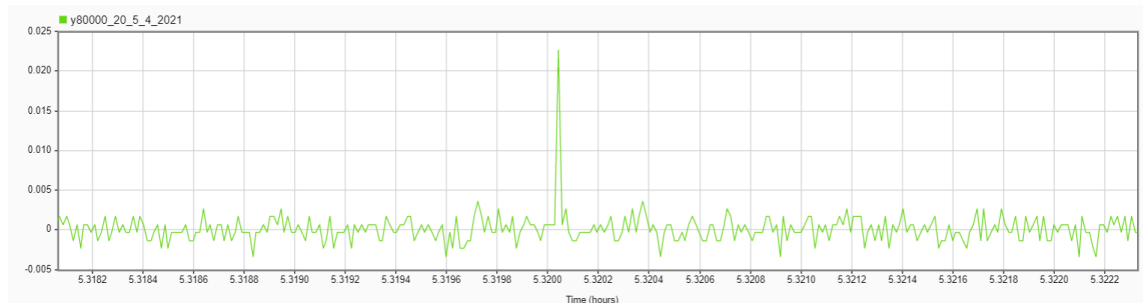
Kuvio 14. Anturin 1 mittaus Y-akselin suunta 20 Hz näytteenottotaajuudella ajalta 5.4.2021 15.00–1.30.



Kuvio 15. Anturin 2 mittaus Y-akselin suunta 20 Hz näytteenottotaajuudella ajalta 5.4.2021 15.00–1.30.

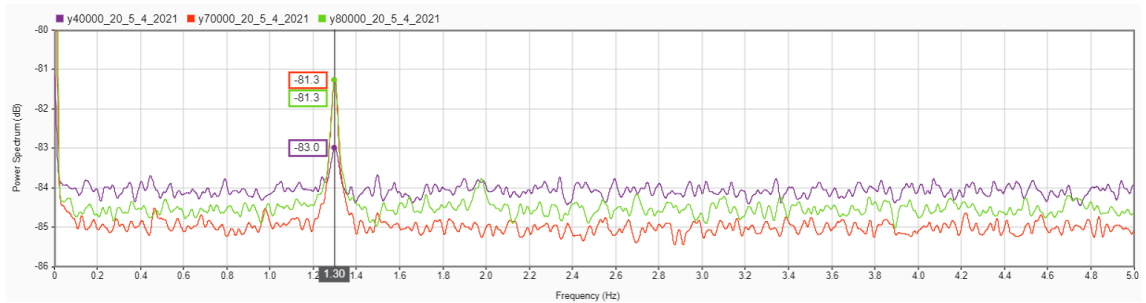


Kuvio 16. Anturin 3 mittaus Y-akselin suunta 20 Hz näytteenottotaajuudella ajalta 5.4.2021 15.00–1.30.



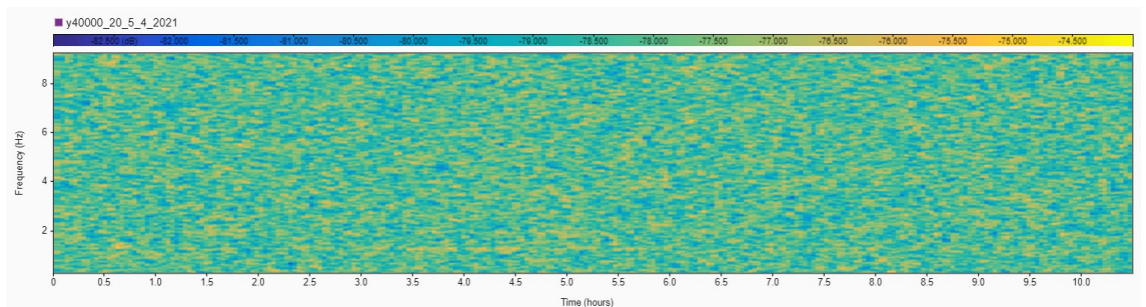
Kuvio 17. Anturi 3 tarkennettu yhteen mittauksessa esiintyvään piikkiin.

Taajuustasosta saadaan kuitenkin erotettua mittauksesta selkeät huiput kaikilta antureilta 1.3 Hz kohdalla (kuvio 18). Kuvasta nähdään myös, että anturi 1:n mittauksessa on edelleen eniten kohinaa, sillä käyrä on muilta osin korkeammalla. Anturissa 1 huippu on selkeästi muista antureista alempana. Anturien 2 ja 3 huiput ovat samalla korkeudella. Anturi 3:ssa on kuitenkin hieman enemmän tausta kohinaa verrattuna anturi 2:een.

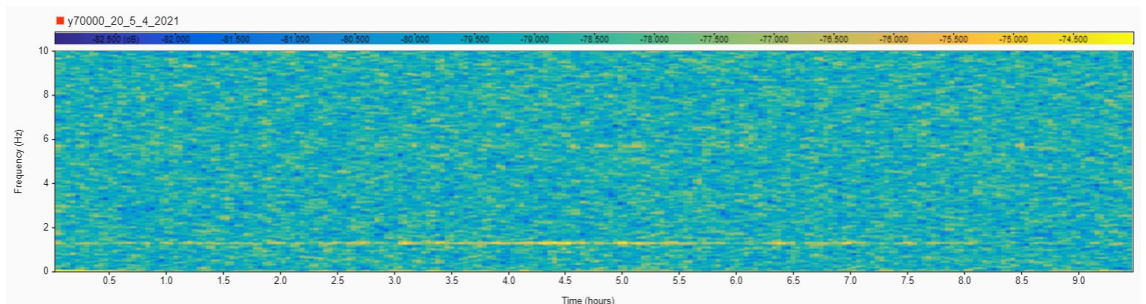


Kuvio 18. Antureiden 1 violetilla, 2 punaisella ja 3 vihreällä taajuusspektri Y-akselin suunnassa ajalta 5.4.2021 15.00–1.30.

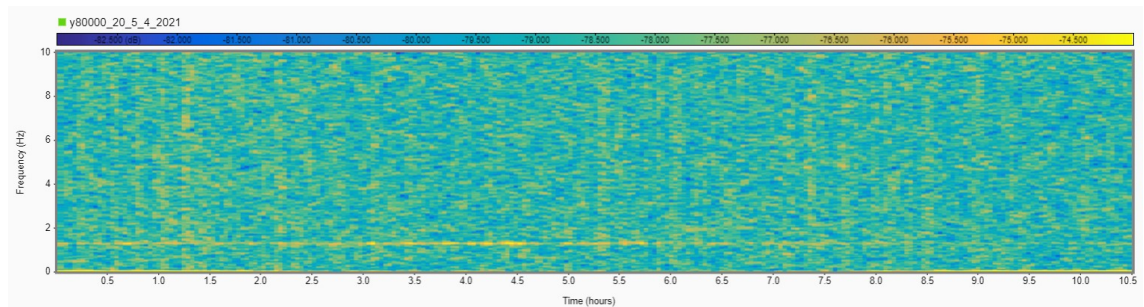
Anturi 1 spektrogrammista ei pystytä erottamaan 1.3 Hz:n taajuutta kohinan takia (kuvio 19). Kuitenkin anturien 2 ja 3 spektrogrammeista nähdään, että mittauksissa esiintyvä 1.3 Hz:n taajuus näkyy mittauksen alusta noin 8 tuntiin eli kello 23.00 asti (kuviot 20 ja 21). Verrattaessa tuulihavaintoihin tuulen nopeus on silloin tippunut alle 12 m:iin/s (kuva 4). Tuuli on käynyt alle 12 m/s myös kello 21.00 ja 22.00 välillä ja mittauksissa 6 tunnin kohdalla 1.3 Hz lakkaa erottumasta. Sama taajuus näyttää voimistuvan 3 tunnin eli kello 18.00 jälkeen ja olevan voimakaimmillaan 4.5 tunnin eli kello 19.30 kohdalla. Tuuli on alkanut hieman nousemaan 12 m:stä/s kello 18.00 jälkeen ja käynyt korkeimmillaan kello 19.30 ja 20.00 välillä yli 15 m/s ja 20 m/s puuskillla.



Kuvio 19. Anturi 1 mittauksen spektrogrammi Y-akselin suunta 20 Hz näytteenottotaajuudella ajalta 5.4.2021 15.00–1.30.



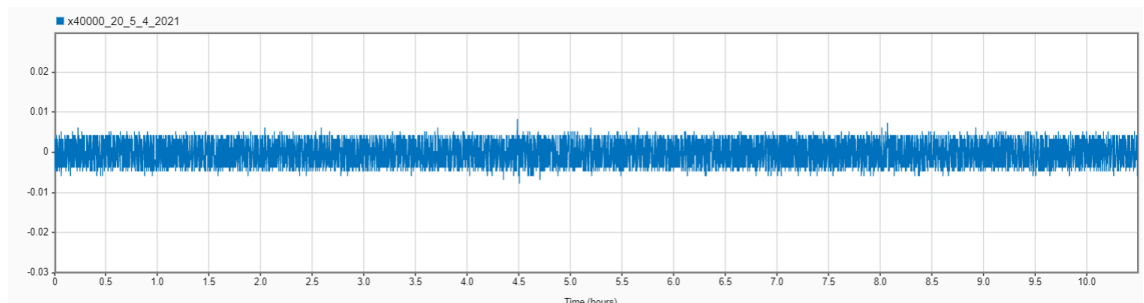
Kuvio 20. Anturi 2 mittauksen spektrogrammi Y-akselin suunta 20 Hz näytteenottotaajuudella ajalta 5.4.2021 15.00–1.30.



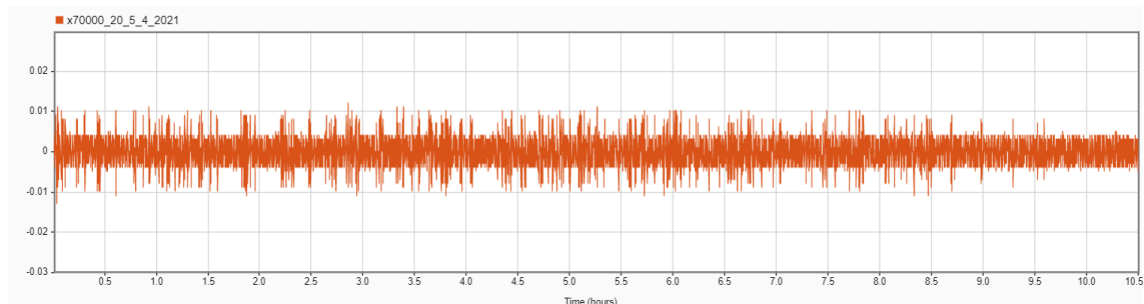
Kuvio 21. Anturi 3 mittauksen spektrogrammi Y-akselin suunta 20 Hz näytteenottotaajuudella ajalta 5.4.2021 15.00–1.30.

5.2 X-suunta

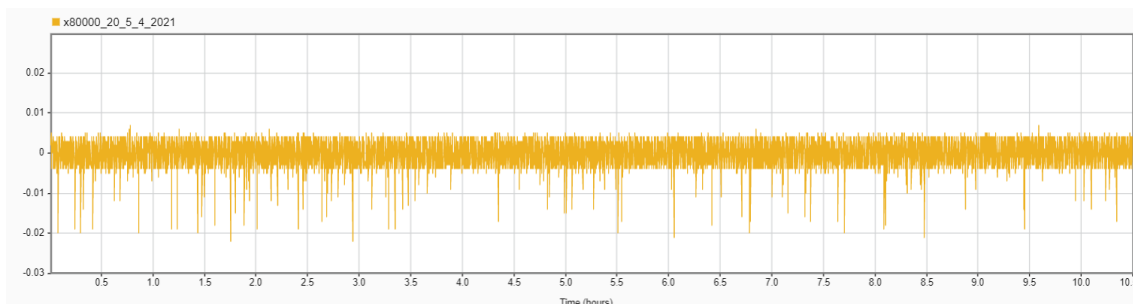
Kuvioista 22, 23 ja 24 nähdään, että aikatasossa X-suuntaan mittauksen tulokset ovat muuten samanlaisia kuin Y-suuntaan mutta anturi 2:n mittauksessa näkyy hissien liikkeistä aiheutuneita 10 milli-g suuruisia värähtelyjaksoja (kuvio 23). Samoja 20 milli-g:n suuruisia piikkejä mitkä näkyivät anturissa 3:ssa Y-suunnassa näkyvät myös X-suunnassa, mutta piikkejä on huomattavasti vähemmän. (kuvio 24). Muuten taustakohinan takia ei mittauksista erotu muita värähtelyjä.



Kuvio 22. Anturin 1 mittaus X-akselin suunta 20 Hz näytteenottotaajuudella ajalta 5.4.2021 15.00–1.30.

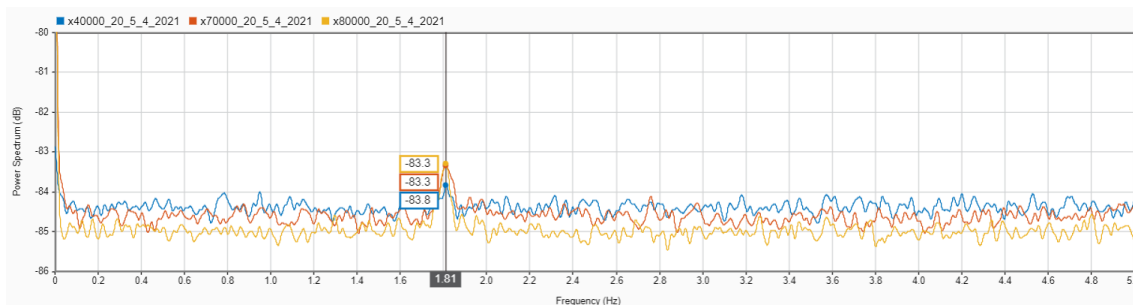


Kuvio 23. Anturin 2 mittaus X-akselin suunta 20 Hz näytteenottotaajuudella ajalta 5.4.2021 15.00–1.30.



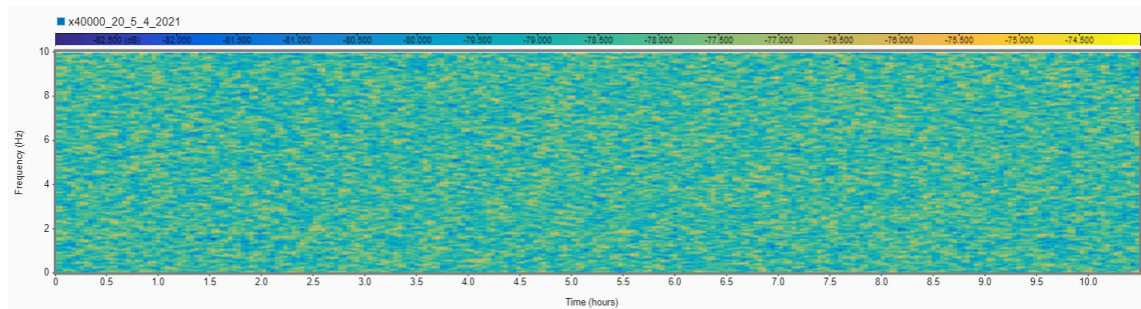
Kuvio 24. Anturin 3 mittaus X-akselin suunta 20 Hz näytteenottotaajuudella ajalta 5.4.2021 15.00–1.30.

Kuviossa 25 nähdään kuitenkin mittauksissa esiintyvän 1.81 Hz taajuus pois lukien anturi 1, missä on esiintynyt kohinaa jokaisessa mittauksessa. 1.81 Hz:n huippujen korkeudet ovat anturissa 2 ja 3 ovat samalla korkeudella mutta selvästi matalammalla, kuin Y-suunnan mittauksessa.

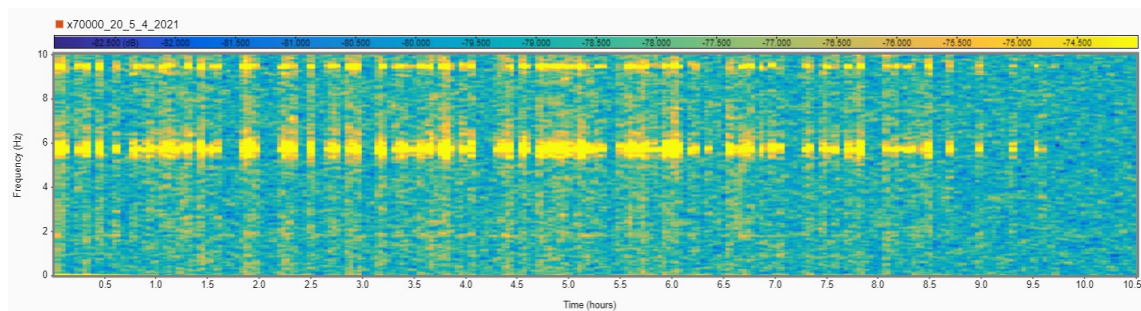


Kuvio 25. Antureiden 1 sinisellä, 2 punaisella ja 3 keltaisella taajuusspektri X-akselin suunnassa ajalta 5.4.2021 15.00–1.30.

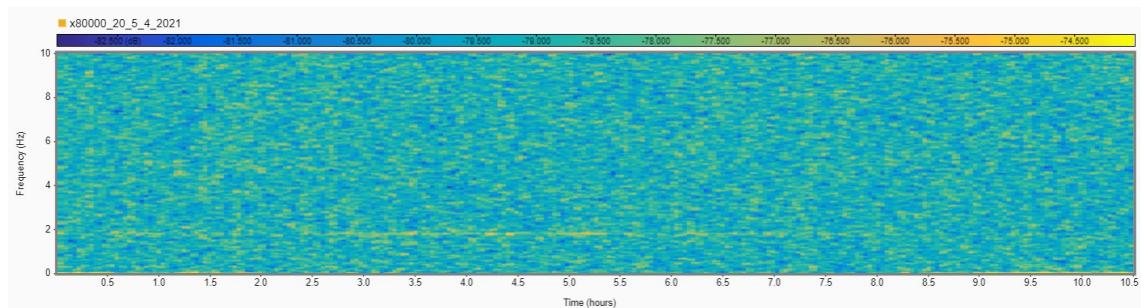
Spektrogrammeista Y-suunnan tapaan anturista 1 ei erotu taajuudet (kuvio 26). Antureiden 2 ja 3 spektrogrammeista voidaan kuitenkin erottaa 1.81 Hz mutta heikommin, kuin Y-suunnan mittauksista (kuviot 27 ja 28). Hissi aiheuttaa häiriötä anturi 2:een noin 6 Hz:n ja 9 Hz:n alueille, joista 6 Hz on voimakkaampi. Niiden takia 1.81 Hz erottuu vain sen ollessa vahvimmillaan. Voimakkaimmillaan taajuus on ollut 3.5 tunnin, 4 ja 4.5 tunnin välillä ja 5 ja 5.5 tunnin välillä. Vastaavina kellon aikoina tuulihavaintojen mukaan (kuva 4) kello 18.30 tuulen nopeus on noussut 12 m:stä/s vajaan 14 m:iin/s 16 m/s puuskilla Kello 19.00–19.30 tuulen nopeus on noussut 13 m:stä/s 14 m:iin/s ja puuskat ovat olleet 18 m/s. Kello 20.00 tuuli on ollut voimakkaimmillaan 15 m:ssä/s 20 m/s puuskilla ja 20.30 tuuli on ollut myös 15 m/s ja puuskat ovat olleet 18 m/s.



Kuvio 26. Anturi 1 mittauksen spektrogrammi X-akselin suunta 20 Hz näytteenottotaajuudella ajalta 5.4.2021 15.00–1.30.



Kuvio 27. Anturi 2 mittauksen spektrogrammi X-akselin suunta 20 Hz näytteenottotaajuudella ajalta 5.4.2021 15.00–1.30.



Kuvio 28. Anturi 3 mittauksen spektrogrammi X-akselin suunta 20 Hz näytteenottotaajuudella ajalta 5.4.2021 15.00–1.30.

6 Pohdinta

6.1 Tulosten tarkastelu

Cabras, Chapain, Longari, Mousaad & Zucca (2017, 4) kertovat artikkelissaan, että rakennuksissa syntyvät kiihtyvyydet saavat olla korkeimmillaan 4.03 ja 8.43 milli-g:n välillä, jotta asukkaille ei tulisi terveyshaittoja, kuten huonovointisuutta. Heidän mukaansa ihminen ei havaitse lainkaan alle 5 milli-g:n kiihtyvyyksiä. Tarkasteltaessa antureiden mittauksia aikatasossa ei havaita tuulesta aiheutuvia kiihtyvyyksiä, mitkä erottuisivat ± 4 milli-g:n taustakohinasta. Kerrostalo ei siis ole värähdellyt niin paljoa, että asukkaat olisivat voineet sitä havaita. Anturin 2 mittauksissa nähdään hissien aiheuttavan värähtelyjä 10 milli-g:n verran. Nämä värähtelyt eivät kuitenkaan välity muille antureille saakka. Oletettavasti vain hissi-kuilun rakenteet värähtelevät. Hissien aiheuttama värähtely ylittää ihmiselle havaittavan 5 milli-g:n (Cabras ym. 2017, 4) ja opinnäytetyön tekijä tunsi kädellään värinää koskettaessaan anturia hissien liikumisen aikana. Anturissa 3 ilmeni 20 milli-g:n suuruisia piikkejä mittauksen aikana mitkä voivat olla yhteydessä tuuleen. Ullakolla oltaessa puuskien aikaan oli kuultavissa katon rakenteiden natiinaa. Nämä pienet liikahdukset rakenteissa ovat voineet välittyä anturille. Ne eivät kuitenkaan sotkeneet anturin mittauksia.

Vaikka aikatasosta ei pystytä silmämääräisesti erottamaan värähtelyjä, tulokset muutettuna taajuustasoon alkavat antaa enemmän tietoa rakennuksen värähtelystä. Y-suuntaan kaikki anturit antavat mittauksessa esiintyväksi taajuudeksi 1.3 Hz (kuvio 18). A-Insinöörien tekemän RFEM laskennan mukaan rakennuksen ominaisvärähtelytaajuus on 1.129 Hz tuohon suuntaan (Keskisalo ja Rytönen 2021). Oletuksena oli, että jos rakennus alkaa värähtelemään tuulen johdosta värähtelisi se alimmalla ominaisvärähtelytaajuudellaan. Eroa mittauksen tuloksella ja laskennallisella on 0.171 Hz eli mittaus on 13.3 % laskennallista suurempi. X-suunnassa taajuustasosta nousee esiin 1.8 Hz:n taajuus (kuvio 25). Laskennallinen ominaisvärähtelytaajuus on 1.583 Hz (Keskisalo ja Rytönen 2021). Eroa mittauksen ja laskennan välillä on 0.227 Hz eli mittaus on 14.3 % laskentaa suurempi. Y-suunnan laskennallisen ja mittauksen suhteellinen ero

eroaa X-suunnan laskennallisen ja mittauksen suhteellisesta erosta 1 % verran. Vaikka mittaus ja laskenta eroavat, eroavat ne kuitenkin suhteellisen vähän ja ero on molemmissa suunnissa johdonmukainen. Tämän perusteella voidaan olettaa 1.3 Hz:n olevan rakennuksen ominaisvärähtelytaajuus Y-suuntaan ja 1.8 Hz X-suuntaan.

Spektrogrammeja (kuviot 19–21 ja 26–28) ja tuulihavaintoja (kuva 4) verrattaessa voidaan päätellä tuulen aiheuttavan rakennuksen värähtelyn. Kun tuulen nopeus on kasvanut, on kasvanut myös mittauksessa ominaistajuuden voimakkuus. Ilmenee myös, että rakennus alkaa värähtelemään vasta tuulen nopeuden ylittäessä 12 m/s. Y-suunta ei vaikuttaisi reagoivan niinkään puuskiin, mutta X-suunnassa värähtelyä on tapahtunut enemmän puuskien aikaan.

Taajuustasossa tuloksia tarkasteltaessa huomataan myös värähtelyn olevan voimakkaampaa Y-akselin suunnassa eli tuuleen suuntaan nähden poikittaisessa suunnassa ainakin etelätuulen aikaan. Tämä oli odotettavissa, koska tuulen aiheuttamissa värähtelyissä on yleistä värähtelyn amplitudin olevan suurempi tuulen suuntaan nähden poikittain (Steffen 2016, 21). Vaikuttavana tekijänä voi myös olla se, että rakennuksella on pienempi taivutusvastus Y-suunnassa. Taivutusvastus W on lujuusopissa käytettävä suure, mikä kertoo tietyn poikkileikkauksen omaavan kappaleen kykyä vastustaa taivutusta. Taivutusvastuksen laskeminen poikkileikkaukseltaan suorakulmiolle on esitetty kaavassa 2 (Valtanen 2016, 305) Kaavan mukaan taivutuksen suuntaisen sivun pituus on toisessa potenssissa. Jos suorakulmion lyhyempi sivu h on samassa suunnassa taivutuksen suunnan kanssa, taivutusvastus W on silloin pienempi verrattuna siihen, jos taivutuksen suunta olisi poikittaisen sivun b suuntaan.

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad (2)$$

missä

W = taivutusvastus, mm³

b = taivutuksen suuntaan poikittaisen sivun pituus, mm

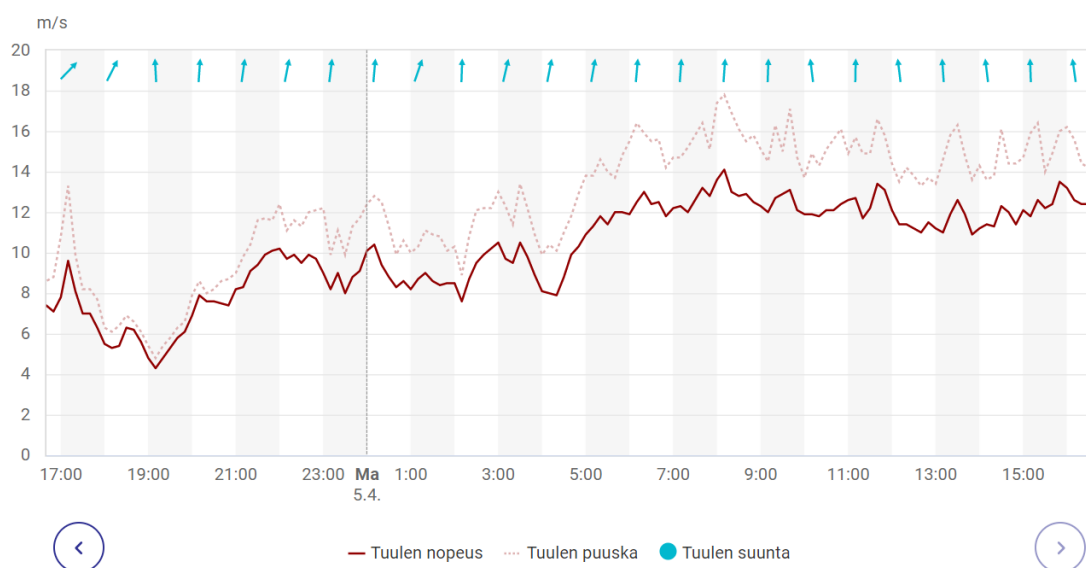
h = taivutuksen suuntaisen sivun pituus, mm

6.2 Mittausten luotettavuus

6.2.1 Laskostuminen

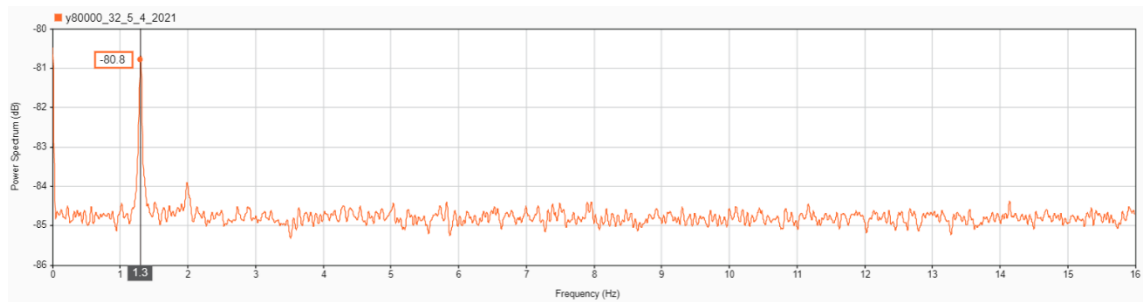
Jotta voidaan olla varmoja, ettei aiempien mittausten tulokset johdu laskostumisesta, otettiin aiemmin samana päivänä toinen mittaus 32 Hz näytteenottotaajuudella. Mittaus otettiin 5.4.2021 kello 8.30 ja 15.00 väliseltä ajalta. Tuona aikana tuuli pohjoiseen ja tuulen nopeus lähes koko ajan yli 12 m/s ja puuskat kävivät korkeimmillaan 18 m:ssä/s (kuva 6).

Tulosten varmentamiseksi riittää, että tarkastellaan vain yhden anturin mittauksia, koska anturit ovat samanlaisia ja kaikkien mittauksissa esiintyi täysin samat taajuudet. Tarkasteluun valittiin anturi 3, koska anturissa 1 on liikaa häiriötä ja anturi 2:n mittauksista sotkee hissien värähtely.

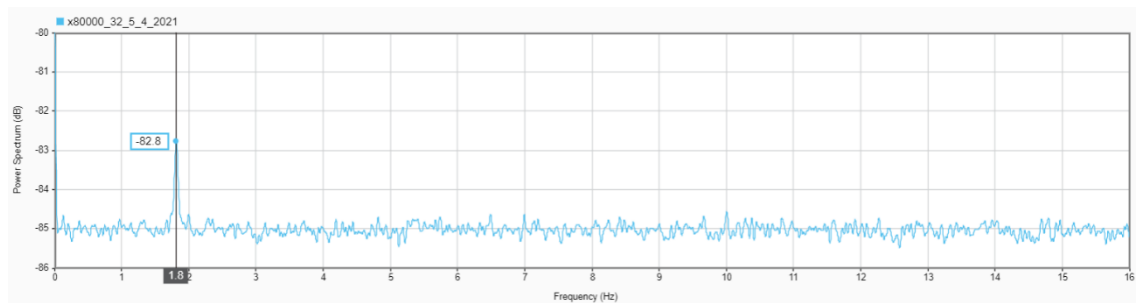


Kuva 5. Tuuli havainnot Tuiskavanluodolta 4.4.2021 17.00 - 5.4.2021 16.00 (Kuva: Ilmatieteen laitos).

Riittää, että tarkastellaan vain taajuustasoa. Jo aiemmin mainitussa mittauksessa kävi ilmi, että rakennus värähtelee yli 12 m/s tuulessa. Tuo kriteeri täyttyi mittauksen aikana, joten pelkän taajuuden selvittäminen riittää. Kuvioista 29 ja 30 nähdään, että Y-suunnassa selkeäksi huipuksi nousee 1.3 Hz ja X-suunnassa 1.8 Hz. Voidaan olettaa taajuuksien olevan todellisia eivätkä ne johdu laskostumisesta.



Kuvio 29. Anturin 3 mittauksen taajuusspektri Y-akselin suunnassa ajalta 5.4.2021 9.30–15.00.



Kuvio 30. Anturin 3 mittauksen taajuusspektri X-akselin suunnassa ajalta 5.4.2021 9.30–15.00.

6.2.2 Alimman ominaistaajuuden vertailu muihin kerrostaloihin

Mittauksista ja tuloksista kannattaa verrata vielä muiden vastaavanlaisten rakennusten kanssa. Näin voidaan varmentaa, ettei tieto laskennallisista ominaistaajuuksista ole aiheuttanut ennako-odotuksia mittauksia suunniteltaessa ja tulkittaessa, mikä voisi johtaa tulosten vinoumaan.

Taulukkoon 1 on koottu Lighthouse Joensuun lisäksi neljän muun puurunkoisen kerrostalon alimmat ominaistaajuudet. (Abrahamsen, Bjertnæs & Malo 2016, 420–421, Chang, Dietsch, Feldmann, Gräfe, Harris, Hein & Huang 2016, 3 ja 6). Alin ominaistaajuus tarkoittaa nimensä mukaan alinta taajuutta millä rakennus voi värähdellä. Lighthouse tapauksessa alin taajuus tapahtuu Y-suuntaan. Taulukon kerrostalot eivät ole rakenteiltaan täysin samanlaisia, mutta niistä saadaan suuntaa antavia taajuuksia. Huomataan, että matalammissa rakennuksissa ominaistaajuudet ovat korkeampia. Korkeammissa rakennuksissa eli Lighthouseella ja Treetillä ominaistaajuudet ovat alhaisempia.

Taulukko 1. Eri puukerrostalojen alimpia ominaistajuuksia

Rakennuksen nimi	Sijainti	Korkeus [m]	Alin ominaistajuus [Hz]
H8 - Puinen runko, betoninen ydin	Bad Aibling, Saksa	23,9	2,33
Lighthouse Joensuu	Joensuu, Suomi	48,0	1,3
Kampa - Puinen runko, puinen ydin	Aalen, Saksa	26,4	1,6
Life Cycle Tower One - Puinen runko, betoninen ydin	Dornbird, Itävalta	26,6	1,8
Treet - Puinen runko, betoni vahvikkeilla	Bergen, Norja	45,0	0,75

Treet-kerrostalossa on 14 kerrosta Lighthousea tavoin, ja se on korkeutensa puolestakin hyvin lähellä Lighthousea. Sen ominaistajuus on kuitenkin vielä selkeästi matalampi. Treet on koottu kolmesta moduulista, jotka ovat kiinnitetty toisiinsa betonista valettujen laattojen avulla. Betonilaatat ovat neljännen ja viidennen kerroksen ja yhdeksännen ja kymmenennen kerroksen välissä. Lisäksi kerrostalon katolle on valettu betonista laatat. Laatat ovat osa rakennuksen tukirakennetta mutta niiden pääasiallinen tehtävä on lisätä rakennuksen massaa, jolloin sen dynaamiset ominaisuudet paranevat. (Abrahamsen 2016, 408.) Näiden betonilaattojen takia on turvallista olettaa Treetin olevan Lighthousea huomattavasti raskaampi. Kaavassa 3 on esitetty yksinkertaistettu laskentakaava ominaistajuuden laskemiselle ulokkeelle, jonka päässä on yksi massa (Suomen Standardisoimisliitto SFS 2010, 236). Kaavassa suurin siirtymä taivutuksen suuntaan oman painon alla x_1 on jakajana. Jos kahden ulokkeen jäykkyydet ja pituudet ovat lähes samanlaisia, mutta toisen päässä on suurempi massa, on suuremman massan omaavan ulokkeen siirtymä suurempi. Tällöin sillä on matalampi ominaistajuus. Kaavan perusteella on loogista, että raskaammalla Treetillä on ominaistajuus matalampi verrattuna saman korkuiseen mutta kevyempään Lighthouseen.

$$n_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{x_1}} \quad (3)$$

missä

n_1 = ominaistajuus

g = maan vetovoiman kiihtyvyyys

x_1 = suurin siirtymä, joka syntyy, kun oma paino asetetaan vaikuttamaan värähtelyn suuntaan

Värähtelymittauksesta saadut taajuudet vaikuttavat järkeviltä verrattaessa muihin vastaaviin kerrostaloihin. Mittauksissa saatujen taajuuksien voidaan olettaa melko suurella luottamuksella tämänkin osalta olevan Lighthousen ominaistajuudet.

6.3 Kehitysehdotuksia

Antureiden sijoitteluun kannattaisi kiinnittää huomiota. Tulisi yrittää asentaa ne sellaisiin paikkoihin, missä niihin kohdistuisi mahdollisimman vähän häiriöitä. Esimerkiksi hissikuilun läheisyyteen ei kannata kiinnittää anturia, ellei halua tutkia hissien värähtelyjä. Antureilla voisi mitata vuorokauden kestävän testin, jotta nähtäisiin aiheuttaako minkään laitteen käynnistäminen häiriöitä. Sitten siirtää antureita, kunnes ne ovat häiriöttömissä paikoissa.

Mittausten ajankohta kannattaisi ajoittaa syksyn myrskyihin. Silloin voisi olla suurempi todennäköisyys saada mitattua korkeampia kiihtyvyyksiä, mitkä erottuisivat taustakohinasta. Myös tulisi ottaa mittauksia tuulen suunnan ollessa idässä tai lännessä. Silloin voitaisiin varmistaa, että värähtelee kerrostalo aina enemmän Y suunnassa tuulen suunnasta riippumatta. Värähtelyn syy voitaisiin silloin varmemmin rajata pyörreratailmiöön ja muihin aeroelastisiin epästabiliusilmiöihin, kuten laukkaamiseen.

6.4 Työn hyödyllisyyden arviointi

Toimeksiantajan kanssa päästiin sovittuihin tavoitteisiin opinnäytetyössä. Tavoitteissa oli melko paljon liikkumavaraa, sillä ei oltu täysin varmoja mitä tietoja kiihtyvyyssantureilla saa kerrostalosta. Uhkakuvana oli ennen mittauksen aloittamista se, jos tuuliolosuhteista tai antureiden toimimattomuudesta johtuen ei saisikaan mitään tuloksia. Näin ei kuitenkaan käynyt ja mittauksista selvisi rakennuksen ominaistajuudet.

Olisi ollut hienoa, jos rakennus olisi heilunut niin paljon, että tuloksista olisi saanut kiihtyvyyden suuruudet erottumaan antureiden mittausten taustakohinasta. Silloin olisi voinut tutkia rakennuksen käyttäytymistä vieläkin syvällisemmin.

Opinnäytetyöprosessin alussa ei oltu toimeksiantajan kanssa varmoja saadaanko aiheesta riittävän kattava kokonaisuus opinnäytetyöksi. Tämä huomioon ottaen molemmat osapuolet ovat tyytyväisiä lopputulokseen.

6.5 Ammatillinen kasvu

Opinnäytetyötä tehdessä koin kehittyneeni tiedon haussa ja sen kriittisessä arvioinnissa. Haastavinta työssä oli löytää tarvittavaa tietoa mittausten luotettavaa suorittamista varten. Rakennusten värähtelymittausten suorittamisesta löytyi yllättävän vähän tietoa.

Aihe oli minulle ennestään tuntematon ja otinkin sen vastaan mielenkiintoisena haasteena. Pidin siitä, että pääsin perehtymään oman alan ulkopuolisiin asioihin, kuten rakennusten värähtely ja signaalien käsittely. Oppimaani voin helposti käyttää myös konetekniikan puolella esimerkiksi laitteiden värähtelyyn liittyvissä asioissa.

Sain opinnäytetyön tekemisestä hyvät lähtökohdat työelämään konetekniikan insinöörinä. Olen paljon itsevarmempi ottamaan vastaan uusia ja haastavia tehtäviä, koska luotan itseeni siinä, että pystyn hankkimaan itsenäisesti luotettavaa tietoa.

Lähteet

- Abrahamsen, R. B., Bjertnæs, M. A., Malo, K. A. 2016. Some structural design issues of the 14-storey timber framed building “Treet” in Norway. Springer. <https://bit.ly/3eg7ITW>. 4.5.2021.
- Allen, R., McDougal, W.G., Tedesco, J.W. 1999. Structural Dynamics, Theory and Application. California. Addison Wesley Longman, Inc.
- APC International, Ltd. 2021. Piezo accelerometers. <https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/piezo-accelerometer.html>. 2.3.2021.
- BeanAir. 2021a. BeanDevice Willow X-Inc Datasheet. <https://www.bes-tech.com.au/wp-content/uploads/2019/09/WiLow-X-INC-ID-3375.pdf>. 8.4.2021.
- BeanAir. 2021b. Our Company. <https://www.beanair.com/beanair-company.php>. 28.4.2021.
- Cabras, L., Chapain, S., Longari, N., Mousaad Aly, A., Zucca, M. 2017. Structural Improvements for Tall Buildings under Wind Loads: Comparative Study. Hindawi. <https://downloads.hindawi.com/journals/sv/2017/2031248.pdf>. 4.5.2021.
- Chang, W., Dietsch, P., Feldmann, A., Gräfe, M., Harris, R., Hein, C., Huang, H. 2016. DYNAMIC PROPERTIES OF TALL TIMBER STRUCTURES UNDER WIND-INDUCED VIBRATION. World Conference on Timber Engineering. <https://bit.ly/3ukxLPE>. 4.5.2021.
- Dimension Engineering LLC. 2021. A beginner’s guide to accelerometers. <https://www.dimensionengineering.com/info/accelerometers>. 4.2.2021.
- Elbakheit, A. 2018. Wind-Induced Vibrations to Tall Buildings and Wind Turbines. IntechOpen. <https://bit.ly/2YMZBWv>. 5.2.2021.
- Fleicger, C. 2021. How Piezoelectricity Works. Autodesk. <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/piezoelectricity/>. 2.3.2021.
- Hanly, S. 2021. Accelerometers: Takin the Guess Work out of Accelerometer Selection. Endaq. <https://blog.endaq.com/accelerometer-selection>. 2.3.2021
- Jost, D. 2019. What is an accelerometer. Fierce Electronics. <https://www.fierceelectronics.com/sensors/what-accelerometer>. 12.3.2021.
- Keskisalo, M., Rytönen, P. 2021. Opinnäytetyö. miika.ikaheimonen@edu.karelia.fi. 22.3.2021.
- Klingenberg, L. 2005. Frequency Domain Using Excel. San Francisco State University School of Engineering. <http://online.sfsu.edu/jtai/downloads/ENGR%20302/Excel.FFT.pdf>. 23.2.2021.
- Klopfenstein, T. 2021. Accelerometer Basics. Sparkfun. <https://learn.sparkfun.com/tutorials/accelerometer-basics/all>. 3.2.2021.
- Lüke, H. 1999. The Origins of the Sampling Theorem. Aachen University of Technology. <http://www.hit.bme.hu/~papay/edu/Conv/pdf/origins.pdf>. 8.4.2021.
- MathWorks. 2021. What is MATLAB?. <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>. 21.4.2021.
- Pennala, E. 1999. Koneiden ja rakenteiden värähtely. Helsinki. Otatiето Puuinfo. 2020a. Monikerroslevy (CLT). <https://puuinfo.fi/puutieto/insinööriuotteet/monikerroslevy-clt/>. 26.4.2021.

- Puuinfo. 2020b. Viilupuu (LVL). <https://puuinfo.fi/puutieto/insinoorituotteet/viilupuu-lvl/>. 26.4.2021.
- Rao, S.S. 2011. Mechanical Vibrations, 5th Edition. Upper Saddle River. Prentice Hall.
- Sillanpää, T. 2019. Joensuun puinen Lighthouse kerää kansainvälistä huomiota. Projektiiutiset. <https://www.projektiiutiset.fi/joensuun-puinen-lighthouse-keraa-kansainvalista-huomiota/>. 12.4.2021.
- Smith, J.D. 1962. AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE AEROELASTIC INSTABILITY OF RECTANGULAR CYLINDERS. University of British Columbia. Pro gradu. <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/831/items/1.0105634>. 22.4.2021.
- Steffen, F. 2016. Wind-induced vibrations in high-rise buildings. Lund University. Pro gradu. <http://www.byggmek.lth.se/fileadmin/byggnadsmekanik/publications/tvsm5000/web5211.pdf>. 18.2.2021.
- Suomen standardisoimisliitto SFS. 2010. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1–4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. 5.2.2021.
- Tervo, J. 2001. Diskreettien signaalien analysointimenetelmiä. VTT. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2001/BVAL73-001057.pdf>. 22.2.2021.
- Valtanen, E. 2016. Tekniikan taulukkokirja. Jyväskylä. Genesis-Kirjat Oy.
- Vara, J. 2020. Lighthouse Joensuu. Puuinfo. <https://puuinfo.fi/arkkitehtuuri/asuinkerrostalot/lighthouse-joensuu/>. 12.4.2021.