



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2020 30 stp**

Fakultet for realfag og teknologi

## **Analyse av vibrasjonsegenskaper i eksisterende massivtredekker**

Analysis of vibrational properties in existing CLT floors

**Henning Jevne Bergskaug**

Byggeteknikk og arkitektur  
Fakultet for realfag og teknologi (REALTEK)



## Forord

Denne oppgaven representerer slutten på en femårs masterstudie i Byggeteknikk og arkitektur ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Prosjektarbeidet begynte høsten 2019, hvor valg av tema og problemstilling stod i fokus. Etter et møte med Ny Struktur ved deres kontorlokaler i Oslo, ble det tydelig at kartlegging av opplevde vibrasjoner i massivtredekker var et område med behov for forskning. Ved siden av skolearbeidet samme høst ble det planlagt nye møter og teststeder for vibrasjonsmålinger. Våren 2020 satte arbeidet i gang for fullt og har siden den gang bydd på både teoretiske og praktiske utfordringer. De praktiske utfordringene har i hovedtrekk gått på datainnhenting og reisevei for ikke å nevne tiltakene som fulgte Covid-19. Oppgaven har til tider vært utfordrende, men mest av alt har den siste tiden vært lærerik og meget spennende.

Jeg ønsker å rette en takk til veilederne mine ved REALTEK Themistoklis Tsalkatidis og Einar Nathan for god veiledning gjennom hele prosessen og opplæring av benyttet utstyr. En videre takk til Anders Nygård ved Ny Struktur som på mange måter står bak oppgavens problemstilling. Takk for en god introduksjon til temaet og et tidlig møte som gjorde våren mindre utfordrende.

Takk til kontaktpersoner ved respektive teststeder for tillatelse og tilrettelegging av gode arbeidsforhold. Takk til rektor Jørgen Bo Gundersen og driftsledere Martin og Arne ved Kongsvinger Ungdomsskole. Takk til Christian Hvass, Magnus Prestmo, Harald Sevaldsen, Thomas Skorpen og Espen Bogen ved Valle Wood. Takk for god støtte og hjelp gjennom hele perioden. En videre takk til Odd Anders Amdahl ved Ø. M. Fjeld for å sette meg i kontakt med gode prosjekter. Jeg vil avslutningsvis få takke medstudenter for all hjelp, samhold, motivasjon og faglige diskusjoner gjennom et helt studieløp. I tillegg må jeg få rekke en stor takk til familie, venner og ikke minst samboeren min Kristin, for all støtte de har gitt meg.

Dere har alle hatt stor betydning for oppgavens utvikling og gjennomføringsevne.

*Ås, 15. mai 2020*

*Henning Jevne Bergskaug*



## Sammendrag

Massivtredekker dimensjoneres med lengre spenn, mindre tykkelse og det benyttes sterkere og lettere materialer enn noen gang før. Som et resultat av dette ser man at vibrasjoner og svikt blir et viktig tema for diskusjon. Følelser er subjektivt som betyr at vibrasjoner i gulv for en person kan oppleves ugunstig, mens for en annen ikke merkes i det hele tatt. Det å finne en god metode for kartlegging og dokumentering av egenfrekvenser i eksisterende massivtredekker blir derfor viktig i tiden fremover.

For å imøtekomme utfordringene knyttet til bygg med store spennvidder, er det i denne oppgaven samlet inn massivtredekkers egenfrekvenser. Egenfrekvensen er målt opp mot krav stilt i forslag til eurokode 5, østerisk tillegg og en alternativ metode fra Hamm, Richter og Winter. Datainnsamlingen er gjort med akselerometre produsert av PCB Piezotronics Inc. og CatmanEasy programvare. Videre er dataene behandlet i The Jupyter Notebook (Python) og Excel. Etter en Fourier transformasjon er egenfrekvensene bestemt ved å lese av første harmoniske impuls med Peak Picking Method.

To krysslimte massivtredekker ved Valle Wood i Oslo og et hulromsdekke/kassedekke ved Kongsvinger ungdomsskole er analysert i denne oppgaven. Resultatene som ble samlet inn stemmer godt overens med tidligere forskning, fullskalaforsøk og egne forventninger. Laveste egenfrekvens funnet ved Valle Wood 1 er 8,33 Hz, laveste ved Valle Wood 2 er 5,54 Hz og laveste ved Kongsvinger ungdomsskole er 10,96 Hz. De høyfrekvente massivtredekkene ( $f > 8$  Hz) var godt innenfor sammenlignbare krav. Egenfrekvensen funnet ved Valle Wood 2 kategoriserer massivtredekket som lavfrekvent, og sammenlignet med akselerasjonskontrollen i forslag til ny eurokode 5 anses også dette dekket som tilfredsstillende.

## Abstract

Wooden floors are designed with longer spans, less thickness as well as with the usage of stronger and lighter materials than ever before. As a result, one sees that vibrations and springiness becomes more important. Emotions are subjective, meaning that vibrations in floors can feel uncomfortable for one person and comfortable for another. A good method for surveying natural frequencies in existing CLT-floors, therefore becomes important in the time to come.

To face the challenges that follows the design of long-span structures in wood, this project gathers floor elements natural frequencies. The frequencies are compared to recommended values from a new chapter in Eurocode 5, Austrian annex and an alternative method from Hamm, Richter and Winter. The gathering of information has been done with accelerometers produced by PCB Piezotronics Inc. and CatmanEasy software. The data itself has been processed in The Jupyter Notebook (Python) an Excel. After a Fourier transformation the natural frequency is determined by the first harmonic response and Peak Picking Method.

Two cross-laminated elements at Valle Wood in Oslo and a box-based element at Kongsvinger is analyzed in this project. The results of the data processing are coherent with other research, full scale measurements and my own expectations. The lowest natural frequency found at Valle Wood 1 is 8,33 Hz, the lowest av Valle Wood 2 is 5,54 Hz and the lowest at Kongsvinger is 10,96 Hz. Both high frequency floors ( $f > 8$  Hz) are on the safe side of compared standards. The frequency found at Valle Wood 2 categorizes the floor as low frequent and compared to the acceleration control in the new eurocode 5, the floor is satisfying.

## Konsekvenser av Covid-19

Våren 2020 har gått inn i historien som perioden da verden ble satt på vent. Den 30. januar 2020 erklærte WHO (World Health Organization) utbruddet av Covid-19 som en “alvorlig hendelse av betydning for internasjonal folkehelse”. 12. mars ble utbruddet erklært en pandemi og kl. 1200 samme dag ble NMBU stengt. Alle studenter og ansatte fikk beskjed om å holde seg hjemme inntil tidligst 14. april. Utfordringene oppstod i det de planlagte undersøkelsene måtte skrinlegges ettersom skolene landet over stengte. Foruten Kongsvinger ungdomsskole og Valle Wood, var Prinsdal, Gjennestad og Lillemoen skole avtalt og godtatt for videre målinger. Utover disse lokalene var Bjørkelangen, Flesberg og Ydalir skole avtaler vi arbeidet med. Dette resulterte i at omfanget av oppgaven ble kraftig redusert og vi fikk dessverre ikke datasettet til å skape det statistiske grunnlaget vi håpte på. Den behandlede dataen gir en god indikasjon, men det er vanskelig å si om frekvensene kartlagt er median eller i yttergrense. Egenskapene beskriver det eksakte massivtredekket, men er ikke representativt for annet enn seg selv da øvrige undersøkelser ikke lot seg gjennomføre. Ettersom en gjenåpning av nevnte skoler ikke ble realiteten før frist for innlevering av gradsoppgaven, ble konsekvensene at følgende målsettinger ikke lot seg gjennomføre eller måtte justeres.

### Hovedmål:

Undersøke egenfrekvenser i eksisterende massivtredekker med den hensikt å skape et statistisk grunnlag for anbefaling til dimensjoneringskrav.

### Delmål:

- a) Undersøke akseptabel kombinasjon av egenfrekvens og akselerasjon eller hastighet.
- b) Vurdere metoden for å kartlegge eksisterende massivtredekkers egenfrekvens.
- c) Vurdere behovet for et konsekvent aktivitetsnivå for å måle egenfrekvens.
- d) Undersøke om MyFrequency App er nøyaktig nok til å benyttes som måleinstrument for massivtredekkers egenfrekvens.
- e) Vurdere om romtemperatur og fuktinnhold i treverket påvirker vibrasjonsegenskaper.
- f) Undersøke om montering av festemidler i gipsplater kontra treverk innehar betydning for innsamling av egenfrekvens.
- g) Vurdere om akselerometerets plassering på massivtredekket har betydning for innsamling av egenfrekvens.





# Innholdsfortegnelse

<b>Forord</b> .....	<b>II</b>
<b>Sammendrag</b> .....	<b>IV</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>V</b>
<b>Konsekvenser av Covid-19</b> .....	<b>VI</b>
<b>Innholdsfortegnelse</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Figurliste</b> .....	<b>XII</b>
<b>Tabelliste</b> .....	<b>XV</b>
<b>Forkortelser</b> .....	<b>XVIII</b>
<b>1 Innledning</b> .....	<b>1</b>
1.1 <i>Bakgrunn</i> .....	1
1.2 <i>Problemstilling og målgruppe</i> .....	2
1.2.1 <i>Bakgrunn for problemstilling</i> .....	2
1.3 <i>Målsetting</i> .....	2
1.3.1 <i>Hovedmål</i> .....	2
1.3.2 <i>Delmål</i> .....	3
1.4 <i>Avgrensninger</i> .....	3
<b>2 Teori</b> .....	<b>4</b>
2.1 <i>Treverk</i> .....	4
2.2 <i>Treverkets egenskaper</i> .....	4
2.2.1 <i>Oppbygning og struktur</i> .....	4
2.2.2 <i>Materialsymmetri</i> .....	5
2.2.3 <i>Deformasjon</i> .....	6
2.2.4 <i>Elastisk og plastisk deformasjon</i> .....	6
2.3 <i>Massivtre</i> .....	7
2.3.1 <i>Krysslagte elementer</i> .....	7
2.3.2 <i>Kantstilte elementer</i> .....	8
2.3.3 <i>Hulromselementer</i> .....	8
2.3.4 <i>Stivhet og styrke</i> .....	8
2.3.5 <i>Skjærpåvirkning</i> .....	9
2.3.6 <i>Dimensjonsstabilitet</i> .....	9

2.3.7 Montasje.....	10
2.4 Samvirke.....	10
2.4.1 Samvirke mellom tre og betong.....	11
2.5 Vibrasjon.....	11
2.5.1 Kontinuerlige og diskrete systemer.....	12
2.5.2 SDOF og MDOF.....	12
2.5.3 Frekvens.....	13
2.5.4 Egenfrekvenser.....	13
2.5.5 Impulslast fra gående personer.....	14
2.5.6 Transient og Steady State respons.....	14
2.5.7 Høyfrekvente og lavfrekvente gulv.....	15
2.5.8 Akselerasjon.....	15
2.5.9 Opplevde vibrasjoner.....	16
2.5.10 Demping.....	16
2.5.11 Harmoniske svingninger.....	17
2.6 Vibrasjonsberegning.....	18
2.6.1 Eurokode 5.....	18
2.6.2 Østerrikes nasjonale tillegg (NA).....	19
2.6.3 Patricia Hamm, Antje Richter og Stefan Winter.....	20
2.6.4 Forslag til ny eurokode 5 (EC5).....	21
2.7 Målemetoder og databehandling.....	22
2.7.1 Catman data aquisition software.....	22
2.7.2 The Jupyter Notebook.....	22
2.7.3 Akselerometer.....	23
2.7.4 MyFrequency App.....	24
2.7.5 Fuktmåler.....	24
<b>3 Metode.....</b>	<b>25</b>
3.1 Laboratorietester.....	25
3.1.1 Oppsett.....	25
3.1.2 Kalibrering av akselerometre.....	26
3.1.3 Innstillinger i CatmanEasy.....	26
3.1.4 Analyse.....	27
3.2 Testobjekter.....	28
3.2.1 Kongsvinger ungdomsskole (KUSK).....	29
3.2.2 Valle Wood 1.....	32
3.2.3 Valle Wood 2.....	35

3.3	<i>Behandlingsmetode</i> .....	37
3.3.1	Behandling av datasett .....	37
3.3.2	Bearbeidelse av resultater.....	37
<b>4</b>	<b>Resultater</b> .....	<b>38</b>
4.1	<i>Kongsvinger ungdomsskole</i> .....	38
4.1.1	Utvalgt data behandlet i perioden.....	38
4.1.2	Massivtredekkets egenfrekvenser.....	40
4.1.3	Sammenfatning av data fra KUSK .....	43
4.2	<i>Valle Wood 1</i> .....	44
4.2.1	Utvalgt data behandlet i perioden.....	44
4.2.2	Massivtredekkets egenfrekvenser.....	46
4.2.3	Sammenfatning av data fra VW1 .....	48
4.3	<i>Valle Wood 2</i> .....	49
4.3.1	Utvalgt data behandlet i perioden.....	49
4.3.2	Massivtredekkets egenfrekvenser.....	51
4.3.3	Sammenfatning av data fra VW2 .....	52
<b>5</b>	<b>Diskusjon</b> .....	<b>53</b>
5.1	<i>Forberedelser</i> .....	53
5.1.1	Akselerasjonstester .....	53
5.1.2	Databehandling.....	53
5.2	<i>Undersøkelse på Kongsvinger ungdomsskole</i> .....	54
5.2.1	Utførelse.....	54
5.2.2	Statistisk sikkerhet.....	55
5.2.3	Kontroll .....	55
5.2.4	Klimadata .....	55
5.3	<i>Undersøkelse på Valle Wood 1</i> .....	56
5.3.1	Utførelse.....	56
5.3.2	Statistisk sikkerhet.....	57
5.3.3	Kontroll .....	57
5.3.4	Klimadata .....	57
5.4	<i>Undersøkelse på Valle Wood 2</i> .....	58
5.4.1	Utførelse.....	58
5.4.2	Statistisk sikkerhet.....	59
5.4.3	Kontroll .....	59
5.4.4	Klimadata .....	59

5.5 Generelt.....	60
5.5.1 Aktivitetsnivå.....	60
5.5.2 Dokumentasjonsmetode .....	60
5.5.3 Oppsummering av resultater.....	60
<b>6 Konklusjon.....</b>	<b>61</b>
<b>7 Vurdering av feilkilder .....</b>	<b>63</b>
7.1 Aktivitetsnivå.....	63
7.2 Måleutstyr .....	63
7.3 Undersøkelser.....	63
7.4 Databehandling.....	63
<b>8 Videre arbeid.....</b>	<b>64</b>
<b>Referanser .....</b>	<b>65</b>
<b>Vedlegg A: Python-script.....</b>	<b>68</b>
<b>Vedlegg B1: Innsamlet akselerasjon.....</b>	<b>72</b>
<b>Vedlegg B2: Innsamlet RMS-akselerasjon .....</b>	<b>78</b>
<b>Vedlegg B3: Fourier transformasjon.....</b>	<b>84</b>

## Figurliste

Figur 1: Ulike materialsymmetrier (Bodig & Jayne, 1993). .....	5
Figur 2: Maksimal krymping i lengderetning, tangentiell retning og radiell retning (Tronstad, 2013).....	5
Figur 3: Poisson's effekt på en stav under en-aksial spenning (Bodig & Jayne, 1993).....	6
Figur 4: Fra venstre mot høyre, krysslagte elementer, kantstilte elementer og hulromselementer (kassedekker) (Tretetknisk., 2006a). .....	7
Figur 5: Krysslagt element (Tretetknisk., 2006a).....	7
Figur 6: Kantstilt element (Tretetknisk., 2006a). .....	8
Figur 7: Hulromselement (kassedekke) (Tretetknisk., 2006a). .....	8
Figur 8: Skjærdeformasjoner i et krysslagt massivtrelement (Mestek et al., 2008). .....	9
Figur 9: Samvirkegrader (Lukaszewska, 2009). .....	10
Figur 10: Eksempel på menneskeskapt vibrasjon i gulv (SteelConstruction.info, 2020). .....	11
Figur 11: Illustrasjon av et SDOF-system(Smith et al., 2009).....	12
Figur 12: Svingeformer for en fritt opplagt bjelke (Smith et al., 2009). .....	13
Figur 13: Begge figurer har en transient del, men (a) viser en mindre transient del i motsetning til (b), hvor den transiente delen er større. Både (a) og (b) har lik steady-state respons (Smith et al., 2009).....	14
Figur 14: Impulsrespons (Smith et al., 2009).....	15
Figur 15: Generell responsfunksjon (Smith et al., 2009). .....	16
Figur 16: Illustrasjon av første, andre og tredje harmoniske (Chen et al., 2014).....	17
Figur 17: Oversiktskart for verifikasjon av vibrasjonsegenskaper til gulv i tre (Hamm et al., 2010).....	20
Figur 18: Transformasjon fra tids- til frekvensdomenet(DiCola, 2018). .....	22
Figur 19: PCB Piezotronics, 393B12 (Piezotronics, 2020).....	23
Figur 20: Skjermdump av MyFrequency App i bruk (APPtodate, 2020). .....	24
Figur 21: Fuktmåler fra Biltema (Biltema, 2020). .....	24
Figur 22: Testoppsett av sensorer på et kantstilt massivtredekke (Privat). .....	25
Figur 23: Oppkobling av sensorer til forsterkere og måleinstrumentet QuantumX MX840B (Privat).....	26
Figur 24: Skjermdump av sensorinnstillinger i CatmanEasy, hvor sensitivitetsfaktoren er lagt inn.....	26

Figur 25: Skjermdump av CatmanEasy. Akselerasjon i øverste vindu, live FFT i nederste (privat).....	27
Figur 26: Kongsvinger ungdomsskole (Privat).....	29
Figur 27: Undersøkt massivtredekke markert i rødt (Korbøl, K.A - ØMFjeld).....	29
Figur 28: Massivtredekke under konstruksjon (Korbøl, K. A - ØMFjeld).....	29
Figur 29: Oppkobling over systemhimling (privat).....	30
Figur 30: Opplegg kassedekke/HSQ til venstre og opplegg kassedekke/yttervegg til høyre (Korbøl, K. A – ØMFjeld).....	30
Figur 31: Dimensjoner på målt dekke og plassering av sensorer (egen illustrasjon).....	31
Figur 32: Temperaturdata 3. etasje til venstre og 2. etasje til høyre.....	31
Figur 33: Valle Wood (Privat).....	32
Figur 34: Plantegning Valle Wood 7. etasje. Massivtredekket ligger i området markert med blå firkant (Oslo, 2016).....	32
Figur 35: Oppkobling av utstyr over kabelbro, fire akselerometre i lengderetning (privat)....	33
Figur 36: Dimensjoner på dekket og valgt plassering av sensorer (Privat illustrasjon).....	33
Figur 37: Fuktprosent undersøkt ved markerte områder (privat illustrasjon).....	34
Figur 38: Plantegning Valle Wood 6. etasje. Massivtredekket ligger i området markert med blå firkant (Oslo, 2016).....	35
Figur 39: Oppkobling av akselerometre over kabelbro i åpent kontorlandskap (privat).....	35
Figur 40: Dimensjoner på dekket og valgt plassering av sensorer (privat illustrasjon).....	36
Figur 41: Innsamlet akselerasjon fra samtlige syv sensorer – Dag 1 (Python).....	38
Figur 42: Akselerasjon fra tidsrom med mye aktivitet – Kl. 14:00 – 15:00 (Python).....	38
Figur 43: «Root mean square»-akselerasjon for tidsrom med mye aktivitet – Kl. 14:00 – 15:00 (Python).....	39
Figur 44: FFT-analyse av tidsrom med mye aktivitet – Kl. 14:10 – 14:20 (Python).....	39
Figur 45: Innhentede egenfrekvenser fra dag 1 opp mot ulike krav.....	40
Figur 46: Innhentede egenfrekvenser fra dag 2 opp mot ulike krav.....	40
Figur 47: Innhentede egenfrekvenser fra dag 3 opp mot ulike krav.....	41
Figur 48: Innhentede egenfrekvenser fra dag 4 opp mot ulike krav.....	41
Figur 49: Innhentede egenfrekvenser fra dag 5 opp mot ulike krav.....	42
Figur 50: Innhentede egenfrekvenser fra dag 6 opp mot ulike krav.....	42
Figur 51: Innsamlet akselerasjon fra samtlige fire sensorer – Dag 2 (Python).....	44
Figur 52: Akselerasjon fra tidsrom med mye aktivitet – Kl. 14:30 – 15:00 (Python).....	44

Figur 53: «Root mean square»-akselerasjon for tidsrom med mye aktivitet – Kl. 14:30 – 15:00 (Python).....	45
Figur 54: FFT-analyse av tidsrom med mye aktivitet – Kl. 14:30 – 14:35 (Python).....	45
Figur 55: Innhentede egenfrekvenser fra dag 1 opp mot ulike krav. ....	46
Figur 56: Innhentede egenfrekvenser fra dag 2 opp mot ulike krav. ....	46
Figur 57: Innhentede egenfrekvenser fra dag 3 opp mot ulike krav. ....	47
Figur 58: Skjermdump av en undersøkelse på Valle Wood 1 med MyFrequency App (Privat). .....	48
Figur 59: Innsamlet akselerasjon fra samtlige fire sensorer – Dag 1 (Python).....	49
Figur 60: Akselerasjon fra tidsrom med mye aktivitet – Kl. 09:10 – 09:20 (Python).....	49
Figur 61: «Root mean square»-akselerasjon for tidsrom med mye aktivitet – Kl. 09:10 – 09:20 (Python).....	50
Figur 62: FFT-analyse av tidsrom med mye aktivitet – Kl. 09:16 – 09:18 (Python).....	50
Figur 63: Innhentede egenfrekvenser fra dag 1 opp mot ulike krav. ....	51
Figur 64: Sammenligning av datasett fra kanal 1 til venstre og kanal 6 til høyre.....	54
Figur 65: Sammenligning av datasett fra kanal 0 til venstre og kanal 2 til høyre.....	56
Figur 66: Sammenligning av datasett fra kanal 0 til venstre og kanal 2 til høyre.....	58

## Tabelliste

Tabell 1: Root-mean-square akselerasjon for enkelte bølgeformer (Smith et al., 2009). .....	15
Tabell 2: Krav til egenfrekvens (StandardNorge, 2004b) .....	18
Tabell 3: Krav til egenfrekvens undersøttet alle fire sider = 6 Hz, to sider = 8 Hz (Nasjonalt Tillegg Eurokode 5 for Østerrike, 2014). .....	19
Tabell 4: Vibrasjonskrav (INTER-Paper 51-20-2: Development of a floor vibration design method for Eurocode 5, 2018).....	21
Tabell 5: Anbefalt valg av prestasjonsnivå hvor det skilles mellom A (Bolig) og B (Kontorbygg) (INTER-Paper 51-20-2: Development of a floor vibration design method for Eurocode 5, 2018). .....	21
Tabell 6: Klimadata i tilknytning massivtredekket, verdier er oppgitt i grader celsius (se Figur 32).....	43
Tabell 7: Målte akselerasjoner på Kongsvinger ungdomsskole, alle verdier oppgitt i $m/s^2$ . ...	43
Tabell 8: Målte rms-akselerasjoner på Kongsvinger ungdomsskole, alle verdier oppgitt i $m/s^2$ . .....	43
Tabell 9: Egenfrekvenser funnet ved FFT (Fast Fourier Transformation) og Peak Picking-Method på Kongsvinger ungdomsskole, alle verdier er oppgitt i Hz.....	43
Tabell 10: Temperatur i tilknytning massivtredekket, verdier er oppgitt i grader celsius (Drift Valle Wood). .....	48
Tabell 11: Målt fuktprosent ved bruk av biltemas fuktmåler, alle verdier oppgitt i %. .....	48
Tabell 12: Målte akselerasjoner på Valle Wood 1, alle verdier oppgitt i $m/s^2$ .....	48
Tabell 13: Målte rms-akselerasjoner på Valle Wood 1, alle verdier oppgitt i $m/s^2$ . .....	48
Tabell 14: Egenfrekvenser funnet ved FFT (Fast Fourier Transformation) og Peak Picking-Method på Valle Wood 1, alle verdier er oppgitt i Hz. ....	48
Tabell 15: Temperatur i tilknytning massivtredekket, verdier er oppgitt i grader celsius (se Figur X). .....	52
Tabell 16: Målt fuktprosent ved bruk av biltemas fuktmåler, alle verdier oppgitt i %. .....	52
Tabell 17: Målte akselerasjoner på Valle Wood 2, alle verdier oppgitt i $m/s^2$ .....	52
Tabell 18: Målte rms-akselerasjoner på Valle Wood 2, alle verdier oppgitt i $m/s^2$ .....	52
Tabell 19: Egenfrekvenser funnet ved FFT (Fast Fourier Transformation) og Peak Picking-Method på Valle Wood 2, alle verdier er oppgitt i Hz. ....	52
Tabell 20: Egenfrekvenser funnet ved MyFrequency App, alle verdier er oppgitt i Hz. ....	52



Tabell 21: Sammenligning av laveste målte egenfrekvens og median ved KUSK..... 55

Tabell 22: Sammenligning av laveste målte egenfrekvens og median ved VW1..... 57

Tabell 23: Sammenligning av laveste målte egenfrekvens og median ved VW2..... 59

Tabell 24: Oppsummering av resultater mot krav fra Kapittel 2.6 Vibrasjonsberegning. .... 60



## Forkortelser

Forkortelser som benyttes i denne oppgaven er listet alfabetisk.

<b>ASCII</b>	American Standard Code for Information Interchange
<b>BS</b>	British Standard
<b>CSV</b>	Comma Separated Values
<b>DAQ</b>	Data Acquisition ...
<b>EC</b>	Eurocode
<b>FE</b>	Finite Element
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transformation
<b>ISO</b>	International Organization Standardization
<b>KUSK</b>	Kongsvinger ungdomsskole
<b>MATLAB</b>	Matrix Laboratory
<b>MDOF</b>	Multiple Degree of Freedom
<b>NA</b>	National Annex
<b>NMBU</b>	Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
<b>NS</b>	Nasjonal Standard
<b>PDF</b>	Portable Document Format
<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>SDOF</b>	Single Degree of Freedom
<b>VDV</b>	Vibration Dose Values
<b>VW1</b>	Valle Wood 1
<b>VW2</b>	Valle Wood 2



# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

I moderne tid har klimaproblematikk blitt en stor trussel mot samfunnet. Byggeindustrien alene står for omtrent 15 % av Norges totale klimagassutslipp (Brekkehus, 2019). Herunder produksjon og transport av byggevarer, bygg og anleggsvirksomhet og drift av bygninger. For å senke byggeindustriens klimagassutslipp må det konstrueres bygninger hvor lite energi kreves til selve byggeprosessen. Her er lavutslippsmaterialer som tre et nøkkelord. Med en erstatning av CO<sub>2</sub>-rike materialer som stål og betong med tre, vil klimagassutslippene reduseres betraktelig. Sathre og O'Connor (2010) konkluderte med at dersom man velger tre fremfor andre materialer som stål og betong, vil omtrentlig besparelse være på 1,6t CO<sub>2</sub> per m<sup>3</sup> tre.

Krysslimt tre og hulromselementer er konstruksjoner som har utviklet bygging med treverk og gjort det enklere å bygge større. Det har etter hvert blitt oppført flere store bygninger i tre, og nye utfordringer dukker stadig opp. For massivtredekker med lange spenn er det ofte vibrasjon eller nedbøyning som er dimensjonerende. Vibrasjon i gulv som følge av impulslast fra gående personer har tidligere ikke vært en utfordring, men ettersom spennviddene blir lengre og elementene i seg selv blir lettere, oppstår det utfordringer rundt bruksgrensetilstand (Ji, 2005).

I denne oppgaven blir det kartlagt egenfrekvenser i massivtredekker for å gjøre videre undersøkelser mer effektive og med det skape et grunnlag for å kunne gi anbefalinger til dimensjoneringskrav. Et godt, statistisk grunnlag er viktig for å gjøre bruken av treverk mer anvendbart og konkurransedyktig i en tid preget av konstruksjoner i stål og betong. En økning i bruk av tre, vil på sikt vil redusere CO<sub>2</sub>-avtrykket betraktelig og bidra til en stor reduksjon i klimautslippene fra byggsektoren.

## 1.2 Problemstilling og målgruppe

Massivtredekker med egenfrekvens lavere enn 8 Hz anses i Norge som ikke tilfredsstillende, men dette er kun en anbefaling og et foreløpig krav stilt i EC5. En alternativ metode fremstilt av Hamm, Richter og Winter setter en absoluttgrense på 4,5 Hz. Ettersom det foreligger ulike vibrasjonskrav, er det nødvendig å få på plass en god metode for å dokumentere egenfrekvenser i eksisterende massivtredekker. I denne oppgaven kartlegges og dokumenteres egenfrekvenser ved bruk av akselerometre. Det ses videre på om metoden kan anbefales som fremgangsmåte for vibrasjonsundersøkelser av massivtregulv ved bygg som er i drift.

Oppgaven er rettet mot alle med interesse for trekonstruksjoner og det forventes kunnskapsnivå tilsvarende siste års masterstudent i bygg.

### 1.2.1 Bakgrunn for problemstilling

Bakgrunn for valg av problemstilling er at det i dagens regelverk ikke eksisterer klare retningslinjer hva gjelder vibrasjonsegenskaper i massivtredekker. En god metode for å dokumentere egenfrekvenser vil være essensielt for å kunne gi anbefalinger til fremtidige dimensjoneringskrav.

## 1.3 Målsetting

Målsettingen for denne oppgaven er å finne en god metode for å kartlegge massivtredekkers egenfrekvens ved bygg som er i drift, herunder skoler og kontorbygg. Med bygg i drift menes at brukerne benytter bygget som tiltenkt. Gulvelement passerer på kryss og tvers, utstyr skyves og flyttes rundt. Det vurderes derfor i tillegg hvor nødvendig det er med et konsekvent aktivitetsnivå for å måle egenfrekvens. I dag er det også mulig å laste ned en mobilapp (MyFrequency App) som bruker moderne telefoners akselerometer til å analysere frekvenser. Det er vurdert hvorvidt appen kan måle seg mot mer avansert utstyr og dermed benyttes som et måleverktøy i denne sammenheng. Det er også vurdert hvorvidt akselerometrets plassering har betydning for hvilken egenfrekvens som samles inn. Avslutningsvis er det gjort en kontroll for å vurdere om massivtredekket anses som tilfredsstillende eller ikke.

### 1.3.1 Hovedmål

Vurdere om undersøkelser av vibrasjonsegenskaper i massivtregulv ved bruk av akselerometre, er en god metode for kartlegging og dokumentering av egenfrekvenser hos bygg i drift.

### 1.3.2 Delmål

- a) Redegjøre for hvorvidt et konsekvent aktivitetsnivå er nødvendig for å måle egenfrekvens i eksisterende massivtregulv.
- b) Gjøre en vurdering av om MyFrequency App er nøyaktig nok til å måle egenfrekvens i eksisterende massivtregulv.
- c) Vurdere om akselerometerets plassering på massivtredekket har betydning for innsamling av egenfrekvens.
- d) Vurdere om massivtredekket har tilfredsstillende vibrasjonsegenskaper.

### 1.4 Avgrensninger

Følgende avgrensninger er gjort i denne oppgaven:

- Oppgaven ser utelukkende på massivtredekker i skoler og kontorbygg.
- Akselerasjon er kun målt via akselerometre.
- Det er ikke tatt hensyn til brukernes subjektive oppfatning av vibrasjon.
- Det er ikke tatt hensyn til at mennesker er forskjellige, med ulik vekt, ulike sko eller ulik gange. All aktivitet på massivtredekket er målt og analysert.

## 2 Teori

### 2.1 Treverk

Tre er et naturlig materiale som over millioner av år har formet, utviklet og optimalisert seg for å stå sterkt mot kravene naturen stiller. Gjennom tusenvis av år har det vært et av de viktigste materialene brukt av mennesker og med det hatt mange bruksområder. Verktøy, kunst, isolasjon, møbler i tillegg til konstruksjoner som boliger, broer og båter er alle områder hvor treverket blir brukt. Treet er enkelt å behandle, har gode mekaniske egenskaper og er tilgjengelig over stort sett hele verden (Dahl, 2009).

### 2.2 Treverkets egenskaper

I trær transporteres vann fra røttene til bladene. Dette skaper en mekanisk støtte og lagrer biokjemiske stoffer (Laboratory, 2010). Etersom trestammen skal motstå gravitasjonskrefter og bøyemomenter fra vind og snø, fører søken etter sollys til en høy styrke i lengderetning (Dahl, 2009). Dette er eksempler på egenskaper som lar seg utnytte i en industri hvor det stadig bygges mer i tre.

#### 2.2.1 Oppbygning og struktur

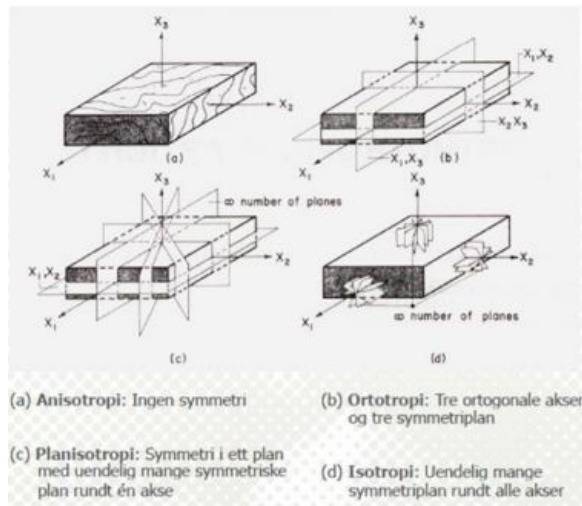
Et tre er i hovedsak bygd opp av cellulose, hemicellulose og lignin. For enkelhetsskyld kan vi si at cellulose og hemicellulose er bindingsverket i veden, mens ligninet hefter det hele sammen. Mengden av de kjemiske materialene, forskjeller i sammensetningen og ulikheter i cellestrukturen forteller oss noe om egenskapene til treverket. Herunder om materialet er mykt eller hardt, fleksibelt eller stivt, lett eller tungt. Ved å se nærmere på trets oppbygning, finner man gode emner til konstruksjonsvirke (Kucera, 1998).

Tidlig i vekstfasen er cellelumenet stort, mens sent i vekstfasen vil trakeidene dannes med tykkere vegger og mindre lumen. Dette er for å avslutte veksten og gi mekanisk styrke for å stabilisere årlig tilvekst (Kucera, 1998). Celleveggen består blant annet av cellulose. Cellulosen er sammensatt av en mengde glukosemolekyler bundet sammen på en bestemt måte. Veden består av hemicellulose i tillegg til cellulose. Hemicellulose består videre av enkle sukkerarter som danner lineære polysakkarider (Kucera, 1998). I all hovedsak er det hemicellulosen som binder ligninet og cellulosen sammen, og har med det stor påvirkning på treverkets egenskaper. Herunder komprimering, oppfukning og tørking (Laboratory, 2010).



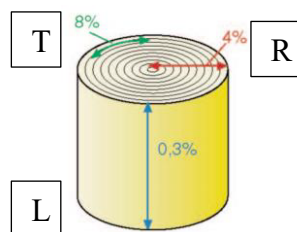
## 2.2.2 Materialsymmetri

Treet har forskjellige egenskaper i ulike retninger og kan derfor betegnes som et ortotropisk materiale (Figur 1). Ettersom materialegenskapene varierer så kraftig, klassifiseres materialer ut ifra symmetri og har betydning for hvordan spenninger og deformasjon beregnes.



Figur 1: Ulike materialsymmetrier (Bodig & Jayne, 1993).

Sett i forhold til årringene, skiller vi mellom lengderetning (L), radiell retning (R) og tangentiell retning (T) (Figur 2). Treets elastisitetsmodul, forholdet mellom fasthet og forlengelse, vil være mindre i radiell og tangentiell retning enn i lengderetning på grunn av cellenes utstrekning. Elastisitetsmodulen er igjen mindre i tangentiell enn i radiell retning på grunn av margstrålene:  $E_T \ll E_R \ll E_L$  (Bodig & Jayne, 1993).



Figur 2: Maksimal krymping i lengderetning, tangentiell retning og radiell retning (Tronstad, 2013).

Tre er et hygroskopisk materiale som betyr at det tar opp og avgir fuktighet fra den omgivende luften. Dette innebærer at treverket krymper og sveller forskjellig i de ulike retningene. Svelling eller krymping av treverk er et resultat av om vannet er bundet eller fritt i celleveggen. Fritt vann vil ikke påvirke svelling eller krymping, men dersom vannet er bundet vil dette føre til at avstanden mellom fibrillene blir større, og trevirke sveller ved fuktopptak. (Aarstad et al., 2008). Motsetningen er at trevirke krymper når fuktigheten reduseres. Krymping og svelling i de forskjellige retningene er også beskrevet i Figur 2.

### 2.2.3 Deformasjon

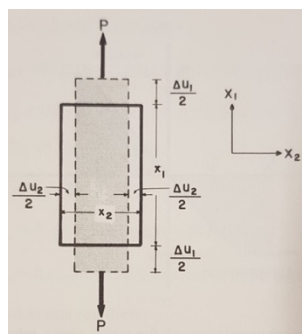
Forholdet mellom aktiv og passiv deformasjon beskrives av Poisson's tall (Figur 3). Deformasjon i samme retning som kraften kalles aktiv, og deformasjon normalt på kraften, kalles passiv. Aktive og passive deformasjoner er dermed motsetninger. Det vil si at når treverk utsettes for trykkspenning langs fibrene, komprimeres treet i kraftretningen samtidig som det utvides på tvers av fibrene. Den aktive deformasjonen representeres av kompresjon langs fibrene, hvor passiv deformasjon er utvidelsen på tvers av fibrene (Bodig & Jayne, 1993).

$$\nu_{ij} = \frac{-\gamma_{ij}}{\gamma_{ii}}$$

$\nu_{ij}$ : Poisson's tall

$\gamma_{ii}$ : Aktiv deformasjon

$\gamma_{ij}$ : Passiv deformasjon



Figur 3: Poisson's effekt på en stav under en-aksial spenning (Bodig & Jayne, 1993).

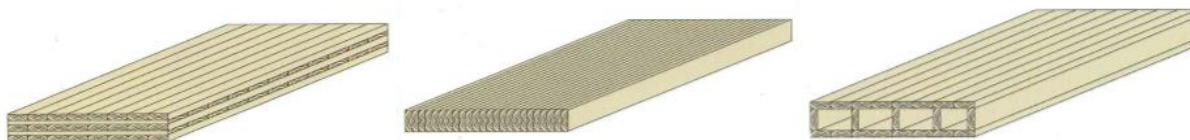
### 2.2.4 Elastisk og plastisk deformasjon

Når man utsetter treverk for en kraft, deformeres det plastisk og elastisk. Deformasjonen avhenger av hvor lang denne belastningen er. Det som kjennetegner elastisk deformasjon er at den vil oppstå med en gang en kraft påføres, for deretter å returnere med en gang kraften fjernes. For treverk betraktes en liten deformasjon som fullstendig elastisk dersom den er kortvarig og fuktigheten er konstant mens kraften er påført. En deformasjon karakteriseres som plastisk dersom den er permanent og deformasjonen ikke returneres når lasten fjernes. En mellomting av elastisk og plastisk deformasjon kalles forsinket elastisk deformasjon. Dette er en gradvis deformasjon som gradvis også går tilbake til utgangspunktet når lasten avtas. Så lenge en belastning er under elastisitetsgrensen, kan tre betraktes som et lineært elastisk materiale. Det betyr at Hook's lov er gjeldende, som beskriver en lineær relasjon mellom spenning og relativ deformasjon (Bodig & Jayne, 1993).

## 2.3 Massivtre

Massivtre er et begrep som i hovedtrekk omhandler elementer bygd opp av lameller (planker) satt sammen med lim, skruer, tredybler eller stålstag. Treteknisk (2006a) deler elementene inn i tre hovedkategorier (Figur 4):

- 1) Krysslagte elementer
- 2) Kantstilte elementer
- 3) Hulromselementer/Kassedekker

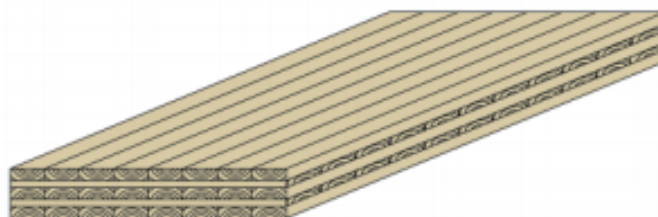


Figur 4: Fra venstre mot høyre, krysslagte elementer, kantstilte elementer og hulromselementer (kassedekker) (Treteknisk., 2006a).

Krysslagte elementer er den vanligste produksjonsmåten for massivtredekker, men i denne oppgaven er det gjort målinger på både krysslagte og hulromselementer.

### 2.3.1 Krysslagte elementer

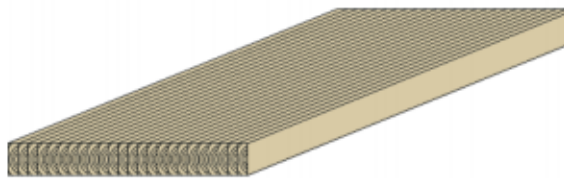
Krysslagte elementer (Figur 5) betegnes av lameller satt sammen av flere sjikt over hverandre, som oftest med 45° eller 90° vinkling mellom sjiktene. Denne typen element vil som oftest bestå av to eller flere lameller i spennretningen på elementet, med et eller flere lamellsjikt på tvers av spennretningen. Andre varianter består av flere lamellsjikt i samme retning for å øke kapasiteten i denne retningen. Krysslagte elementer kan i praksis bygges opp av så mange lamellsjikt som ønskelig. Antall lameller og dermed også tykkelsen på elementet varierer med elementets funksjon, men de vanligste oppbygningene består av 3, 5, 7 eller 9 lamellsjikt, vanligvis bundet sammen av lim eller tredybler. Fasthet, stivhet og krav til brannmotstand kan alle være dimensjonerende faktorer for oppbygningen av et krysslagt element. For å redusere bøyestivheten til elementet er det ikke uvanlig å blande fasthetsklasser, med typisk C24 eller C30 i yttersjiktene, og C18 eller C14 i innersjiktene (Treteknisk., 2006a).



Figur 5: Krysslagt element (Treteknisk., 2006a).

### 2.3.2 Kantstilte elementer

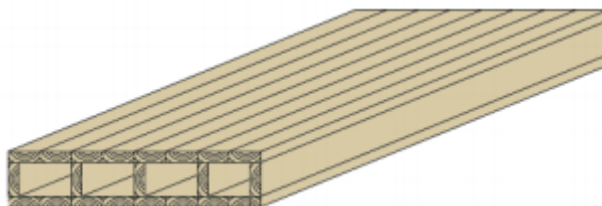
Kantstilte elementer (Figur 6) består av stående lameller sammenføydd med skruer, spiker, stålstag, tredybler eller lim. I motsetning til krysslagte elementer er det her vanlig å bruke samme fasthetsklasse for alle lamellene (Treteknisk., 2006a).



Figur 6: Kantstilt element (Treteknisk., 2006a).

### 2.3.3 Hulromselementer

Et hulromselement (Figur 7) finnes i flere varianter, herunder med kryssende og parallelle lameller. I denne oppgaven er det gjort analyser av et hulromselement med parallelle lameller, kalt kasseelementer. Felles for begge typer er at de ikke danner tverrsnitt som er massive, men andel treverk som benyttes er likevel så høyt at det klassifiseres som massivtre. Hulrommene fylles vanligvis med isolasjon eller brukes som kanal for tekniske installasjoner (Treteknisk., 2006a).



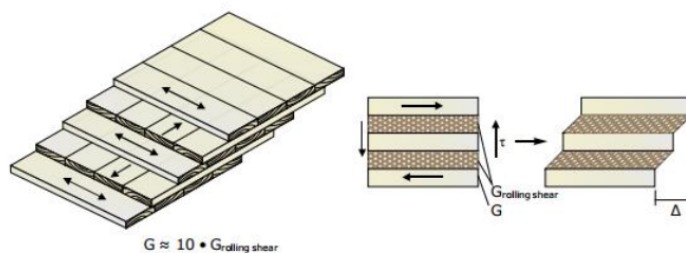
Figur 7: Hulromselement (kassedekke) (Treteknisk., 2006a).

### 2.3.4 Stivhet og styrke

Treverk har meget god styrke og stivhet i forhold til sin lave vekt. I motsetning til tradisjonelle trekonstruksjoner lar massivtre seg forme som skiver eller plater. På den måten blir krefter tatt opp normalt på eller i planet. Det betyr at et massivtreelement er meget effektivt når det kommer til å ta opp og fordele laster (Treteknisk., 2006b). Massivtreelementer kommer som nevnt i flere former og er bygd opp på forskjellige måter. Ved beregning av styrke og stivhet må det dermed tas hensyn til hvert enkelt sjikts E-modul. Dette er spesielt aktuelt i krysslagte elementer, hvor det er ulik tykkelse på inner- og yttersjiktene. Her vil yttersjiktene hovedsakelig bestemme styrken og stivheten til elementet, ettersom de ligger i lengderetning i tillegg til å ha en høyere fasthetsklasse. Ut ifra antall sjikt og tykkelse på sjiktene vil bøyestivheten på tvers av lengderetning utgjøre mellom 4 % og 40 % av bøyestivheten i lengderetning (Treteknisk., 2006b).

### 2.3.5 Skjærpåvirkning

Rulleskjær-styrke og stivhet er en form for belastning som i stor grad er dimensjonerende for krysslagte massivtreelementer (Gagnon & Pirvu, 2011). På grunn av treverkets anisotropi og elementets oppbygning er det de tverrgående sjiktene som utsettes for rulleskjær når elementet blir utsatt for en kraft vinkelrett på planet (Mestek et al., 2008). En overskridelse av rulleskjæret vil føre til at de tverrgående sjiktene sklir ut, som videre forårsaker lokale deformasjoner i elementet (Figur 8).



Figur 8: Skjærdeformasjoner i et krysslagt massivtreelement (Mestek et al., 2008).

### 2.3.6 Dimensjonsstabilitet

Treverk er som tidligere beskrevet et anisotrop materiale som sveller og krymper ulikt i forskjellige retninger. På grunn av fuktighetsendringer vil dimensjonsendringen vinkelrett på fiberretningen være større enn den er i parallellretningen. Ved å ha kryssende fiberretninger over kryssende sjikt vil man få en stivhet og styrke som begrenser endringen vinkelrett på elementet. Dette reduserer den totale dimensjonsendringen og gir et stabilt element. Ettersom elementet har en større stivhet og styrke i lengderetning, vil endringen her være minst. Beregningsmessig antas det at endringene i de ulike retningene er (Treteknisk., 2006b):

- 1) Lengderetning: 0,01 % per % fuktighetsendring.
- 2) Tverretning: 0,025 % per % fuktighetsendring.

Før produksjon av massivtreelementer tørkes treverket ned til å inneholde en fuktprosent på 8 % til 14 %. Dette betyr at dimensjonsendringene på grunn av fuktighet kun vil påvirkes av endringer i relativ fuktighet og omliggende luft. Resultatet av dette er at dimensjonsendringene vil være små fra et fuktighetsperspektiv (Treteknisk., 2006b).

### 2.3.7 Montasje

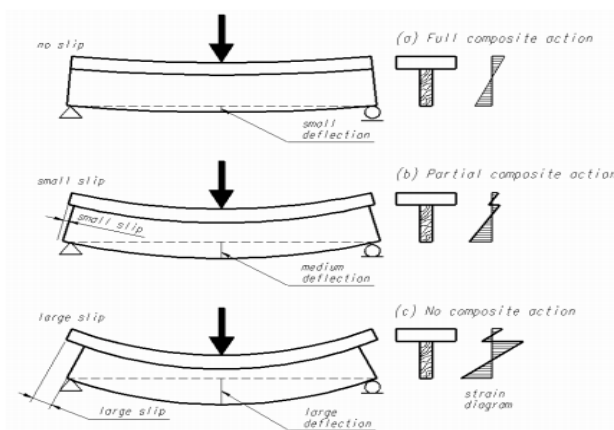
I hvilken grad montasjen er momentstiv i forbindelsen vil påvirke både vibrasjon og nedbøyning. Dette er interessant i forhold til å kartlegge egenfrekvenser. Selve monteringen av massivtreelementene på byggeplassen, er en rask og forholdsvis enkel prosess ettersom produksjon og tilpasninger er gjort på fabrikk. Ved hjelp av en kran heises elementene på plass og blir sammenføyd til større seksjoner. I tillegg til at montasjen går relativt problemfritt for seg, er treverk meget hyggelig å arbeide med. Dette fører blant annet til tid spart og rask fremgang i byggeprosjektet (Treteknisk., 2006c).

### 2.4 Samvirke

Et samvirkeelement beskrives som to eller flere elementer sammenføyd slik at det fremstår som ett enkelt element, hvor spenningsfordelingen er samlet når elementet belastes. Samvirkegraden kan ut ifra stivhet til forbinderen deles inn i tre kategorier (Figur 9):

- a) Fullstendig grad av samvirke
- b) Delvis grad av samvirke
- c) Ingen grad av samvirke

Tilfelle (a) og (c) anses som ekstremtilfeller. Ved fullstendig heft og samvirke mellom elementene vil det være en og samme nøytralakse og lik spenning mellom elementene. Elementene oppfører seg altså som ett enkelt element. Ingen grad av samvirke gir ingen overføring av horisontale krefter, to forskjellige nøytralakser og spenningen mellom elementene vil være ulik. Den praktiske løsningen på dette er et samvirkeelement som ligger et sted mellom disse ekstremtilfellene, med en delvis grad av samvirke. Denne kategorien innebærer noe bevegelse og en viss glidning mellom elementene, men de vil på grunn av en god skjærforbinder mer eller mindre oppføre seg som ett element (Lukaszewska, 2009).



Figur 9: Samvirkegrader (Lukaszewska, 2009).

### 2.4.1 Samvirke mellom tre og betong

Formålet med et samvirkeelement er å benytte seg av begge materialers egenskaper. På den måten forbedres elementets egenskaper i forhold til om materialene ble brukt hver for seg. Tanken bak et samvirke mellom tre og betong, er at treverket skal ta opp strekkraftene og betongen trykkraftene. Denne type samvirkedekke gir en høyere bøyekapasitet og stivhet, som vil føre til mindre nedbøyning og lavere vibrasjon (Lukaszewska, 2009). I denne oppgaven er det gjort analyser av massivtredekker hvor samvirkegraden mellom tre og betong er svært liten. Her er betongen kun en flytstøp for å oppnå høyere vekt, motvirke trinnlyd i tillegg til å gi en høyere brannmotstand (Lukaszewska, 2009).

### 2.5 Vibrasjon

Ved store spennvidder er det kravet om å unngå ubekvemme vibrasjoner som er dimensjonerende og ikke massivtredekkets bruddstyrke. Årsaken til dette er at en gulvkonstruksjon i treverk er å anse som lett dersom man sammenligner med konstruksjoner i stål og betong. Mennesker er forskjellige og opplevelsen av vibrasjoner er dermed subjektiv og kravene vanskelig å bestemme. En vibrasjon kan oppleves som sjenerende og ubehagelig for en person og ikke merkbar for en annen. Det man kan si noe om, er opplevde vibrasjoner. En vibrasjon karakteriseres som uakseptabel dersom svingningen er merkbar eller ikke dempes med en gang, i tillegg til å ha en tilstrekkelig lav frekvens. Den vanligste formen for vibrasjoner i kommersielle bygninger er menneskeskapt (Homb, 2008). Impulslasten fra mennesker i bevegelse er videre fokusområdet i denne oppgaven. Ettersom det er gjort undersøkelser ved en ungdomsskole og et kontorbygg, vil antall personer, aktivitetsnivå, vekt og skotyper med mer variere. Figur 10 fremstiller ulemper ved menneskeskapt vibrasjon på en innovativ og noe ekstrem måte.



Figur 10: Eksempel på menneskeskapt vibrasjon i gulv (SteelConstruction.info, 2020).

### 2.5.1 Kontinuerlige og diskrete systemer

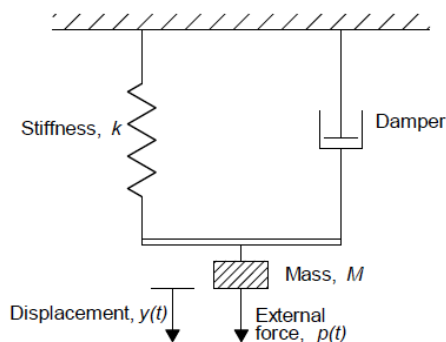
Enhver vibrasjon kan videre deles inn i en av to kategorier; kontinuerlige og diskrete systemer. Eksempelvis er en bygning over flere etasjer som er utsatt for en horisontal last ansett som et diskret system, mens en etasjeskiller anses som et kontinuerlig system. Et diskret system er produktet av en rekke uavhengige masser og er dermed enklere å beregne enn et kontinuerlig system. Et kontinuerlig system løses eksempelvis ved å konvertere det til et diskret problem, hvor den mest kjente metoden er finite element (FE) analyse (Smith et al., 2009). Et kontinuerlig system oppfører seg avhengig av stivheten til systemet, massen og hvilken type impulslast det er snakk om. Dette refereres til som systemets respons og omhandler akselerasjon og forskyvningshastighet som en funksjon av tid og posisjon. Formelen under beskriver responsen til et kontinuerlig system, men er ikke benyttet videre i oppgaven (Smith et al., 2009):

$$m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = F(x, t)$$

$m$	<i>distribuert masse</i>
$w$	<i>forskyvning som funksjon av <math>x, t</math></i>
$t$	<i>tid</i>
$EI$	<i>bøvestivhet</i>
$x$	<i>posisjon</i>
$F(x, t)$	<i>kraft</i>

### 2.5.2 SDOF og MDOF

Diskrete problemer deles inn i to kategorier: single-degree-of-freedom (SDOF) systemer og multi-degree-of-freedom (MDOF) systemer. SDOF systemer omhandler en enkelt masse og er dermed lett løsbart, for eksempel en etasjeskiller, mens MDOF systemer tar for seg flere masser sammenføydd på flere forskjellige måter, eksempelvis en fleretasjes bygning (Smith et al., 2009). Figur 11 er eksempel på et SDOF-system.



Figur 11: Illustrasjon av et SDOF-system (Smith et al., 2009).

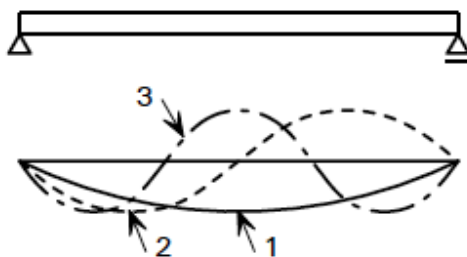


### 2.5.3 Frekvens

Et systems naturlige frekvens, målt i Hz ( $s^{-1}$ ), er en måte å måle ved hvilken hastighet et system svinger, altså hvilket antall sykluser systemet gjennomfører per sekund. Ser man på forholdet mellom lastens frekvens og systemets egenfrekvens, forteller det noe om effekten impulslasten har på systemet. Dersom egenfrekvensen er vesentlig mindre enn impulsfrekvensen oppdages ikke impulsen før frekvensen er borte. Påvirkningen er dermed liten. Ved motsatt tilfelle, altså når en egenfrekvens er mye høyere enn impulsfrekvensen, vil man få samme utfall. Systemet påvirkes ikke i særlig stor grad ettersom det vil oppføre seg som om det utsettes for en statisk, ikke dynamisk, last. Kritiske verdier oppstår når egenfrekvensen er tilnærmet lik impulsfrekvensen. Dette fenomenet kalles resonans og fører til store utsvingninger i konstruksjonen (Smith et al., 2009).

### 2.5.4 Egenfrekvenser

En egenfrekvens er en naturlig svingefrekvens for et element (Homb, 2007). Et kontinuerlig system har en rekke egenfrekvenser, hvor hver av disse har en tilhørende svingeform som tilsvarer systemets bølgeform ved maks nedbøyning. Fundamentalfrekvensen, den første svingeformen, vil alltid være den enkleste svingeformen. Figur 12 viser de tre første svingeformene ved en fritt opplagt bjelke.



Figur 12: Svingeformer for en fritt opplagt bjelke (Smith et al., 2009).

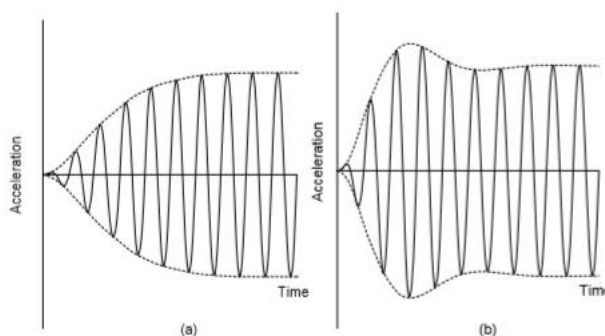
Systemets modale masse er et mål på hvor mye masse som inkluderes per svingeform, og dermed hvor mye kinetisk energi det er i systemet. Hver svingeform har sin egen modale masse og kan beskrives som en rekke diskrete SDOF (single degree of freedom) systemer som sier noe om hvor stort bidrag hver enkelt svingeform har på systemets respons. Det betyr at det vil kreve mye kinetisk energi for å sette i gang en svingeform med stor modal masse, som igjen vil ha en liten effekt på responsen til systemet (Smith et al., 2009).

### 2.5.5 Impulslast fra gående personer

En gående person forårsaker vibrasjoner ved impulslaster, og dersom frekvensen ligger innenfor fire ganger gangfrekvensen er det fare for resonans. Impulsfrekvensen ligger i området 1,5-2,5 Hz for en gående person, men et mer sannsynlig estimat er 1,8-2,2 Hz (Smith et al., 2009). Det er derfor å anta at det hos massivtredekker med en egenfrekvens lavere enn 7-10 Hz vil være en fare for resonans. Det frarådes massivtredekker, med minste, beregnede egenfrekvens lavere enn 8 Hz. Årsaken til dette er en manglende sammenheng med opplevd vibrasjon. Utover dette foreligger det en sannsynlighet at 2., 3., eller 4. harmoniske impulsen (svingeformen) av gangfrekvensen faller likt med massivtredekkets egenfrekvens. Utfallet av dette kan være store utsvingninger og egenskaper som oppleves som ugunstige (Homb, 2007). Prosjektering av nybygg er derfor utfordrende. I dag legger man til grunn at man har en kontinuerlig last, men en person som går over et gulv er ikke noe som pågår til enhver tid. Ganglasten kan derfor ikke anses som kontinuerlig, men VDV-verdier (vibration dose values) er en tilnærming som tar hensyn til denne variasjonen (Smith et al., 2009). Tilnærmingen bygger på BS 6472 (The British Standard) og ISO 10137 (International Organization for Standardization) og senker terskel for akseptabelt nivå ved sjeldnere forekomst av ganglast.

### 2.5.6 Transient og Steady State respons

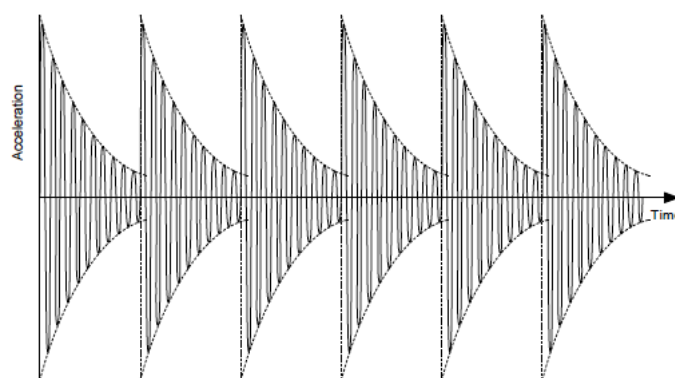
Når et system blir utsatt for en energiøkning, vil responsen ta en av to former vist i Figur 13. De to formene er transient og steady state. Transient tilstand forekommer før impulsen får satt seg i systemet og påfølgende får vi steady state etter at impulsen har etablert seg (Smith et al., 2009).



Figur 13: Begge figurer har en transient del, men (a) viser en mindre transient del i motsetning til (b), hvor den transiente delen er større. Både (a) og (b) har lik steady-state respons (Smith et al., 2009).

### 2.5.7 Høyfrekvente og lavfrekvente gulv

Systemer reagerer ulikt hva gjelder egenfrekvens og deles følgelig inn i to grupper: lavfrekvente og høyfrekvente gulv. Høyfrekvente gulv har en egenfrekvens høyere enn fire ganger gangfrekvens, og det vil dermed ikke være fare for resonans. Motsatt er lavfrekvente gulv i faresonen for resonans, ettersom disse gulvene har en egenfrekvens lavere enn fire ganger gangfrekvens. Impulsen fra en gående person på høyfrekvente gulv vil gradvis forsvinne før neste impuls kommer. Det betyr at den transiente delen av svingningen dominerer og man ser bort fra steady state. Systemets respons vil altså ikke anses som en kontinuerlig svingning, men som en rekke impulser, kalt impulsrespons (Figur 14).

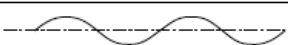
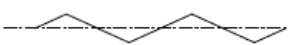
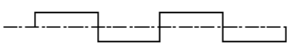


Figur 14: Impulsrespons (Smith et al., 2009).

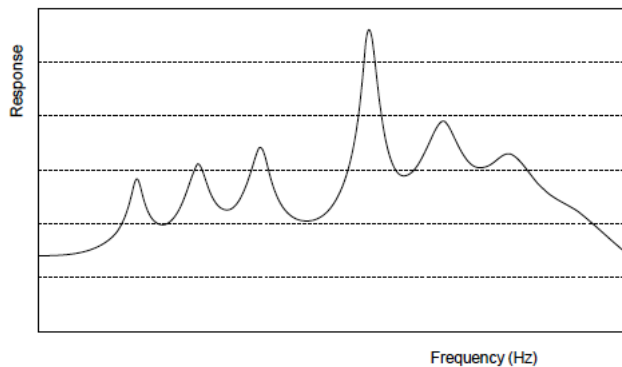
### 2.5.8 Akselerasjon

Et systems akselerasjon kan beskrives på mange måter, hvor den vanligste er å se til den største akselerasjonen,  $a_{\text{peak}}$ . Denne beskrivelsen forteller ingenting om hvor lenge konstruksjonen blir utsatt for akselerasjonen. Derfor ser man ofte til rms-akselerasjon,  $a_{\text{rms}}$ , root-mean-square, som tar tiden med i beregningen og representerer virkeligheten bedre (Smith et al., 2009). For å illustrere denne type akselerasjon, er  $a_{\text{rms}}$  for en sinuskurve, en triangulær bølge og en firkantet bølge beskrevet i Tabell 1.

Tabell 1: Root-mean-square akselerasjon for enkelte bølgeformer (Smith et al., 2009).

Waveform		$a_{\text{peak}}$	$a_{\text{rms}}$
 Sine	1	$1/\sqrt{2}$	
 Triangular	1	$1/\sqrt{3}$	
 Square	1	1	

Når et kontinuerlig systems steady state respons, uttrykt som  $a_{rms}$ , blir utsatt for en konstant kraft i området til eksiterende frekvenser vil responsen ta form som Figur 15. Som vist vil responsen fremstille en rekke topper, hvor hver enkelt topp samsvarer med systemets naturlige frekvenser.



Figur 15: Generell responsfunksjon (Smith et al., 2009).

### 2.5.9 Opplevde vibrasjoner

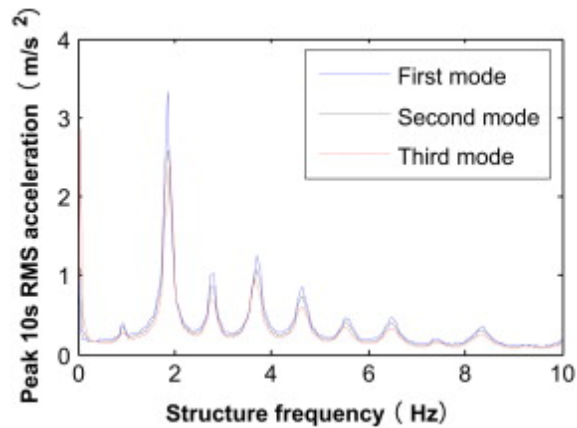
Det er vanskelig å si noe konkret om opplevde vibrasjoner ettersom en opplevelse er en subjektiv følelse og avhenger av flere faktorer. Svingninger kan ha samme amplitude, men forskjellig frekvens. Det kan gjøre at massivtredekket i et tilfelle kjennes ugunstig, mens svingningene i et annet tilfelle ikke merkes i det hele tatt. Personer vil f. eks. ha forskjellig oppfatning av hva som er ubehagelig, som gjør det ytterst komplisert å forme universelle krav (Homb, 2007). Smith, Hicks & Devine (2009) løser dette ved å foreslå ulike krav til forskjellige bygninger, hvor kroppens posisjon og aktivitetsnivå spiller en rolle.

### 2.5.10 Demping

Demping beskriver hvor fort energi fjernes fra et system og er årsaken til at vibrasjoner avtar og til slutt stopper opp. Hvor fort vibrasjonene avtar kalles dempingsraten til systemet, og sier noe om vibrasjonsegenskapene til dekket (Homb, 2007). Det snakkes om demping i dekket som en av to faktorer. Den ene faktoren tar for seg materialets dempingsegenskaper og den andre er knyttet til friksjon mellom elementene i konstruksjonen. Sistnevnte er den største delen, og det er derfor samvirket som gir størst fortjeneste når det kommer til demping. Utover konstruksjonen selv, brukes nyttelast til å absorbere energi og øke dempingen, men å finne dempingen til et system er vanskelig. Homb (2007) anbefaler at den bestemmes empirisk eller som et resultat av målinger.

### 2.5.11 Harmoniske svingninger

En harmonisk svingning, normalmodus eller normalsvingning til et system beskrives best som et mønster hvor alle deler av systemet har en sinusformet svingning med samme frekvens. Frekvensene til modusene er kjent som resonante eller naturlige svingninger. Ved gangfrekvens på ca. 2 Hz er det ikke utenkelig at andre, tredje, eller til og med fjerde harmoniske sammenfaller med massivtredekkets egenfrekvens (Figur 16) (Goncalves et al., 2019).



Figur 16: Illustrasjon av første, andre og tredje harmoniske (Chen et al., 2014).

## 2.6 Vibrasjonsberegning

Tider forandrer seg og bruken av treverk i konstruksjoner er i stadig utvikling. Kunnskapen rundt bruk av treverk er i tillegg mer omfattende, og nye bærende trekonstruksjoner kommer frem. Det har gjort at dagens regelverk ikke lenger møter vår tids behov. Det jobbes derfor med å forme et nytt regelverk som tar for seg dimensjonering av trekonstruksjoner (INTER-Paper 51-20-2: Development of a floor vibration design method for Eurocode 5, 2018). Nytt kapittel om vibrasjon i Eurokode 5 er forventet klart i løpet av året 2020 og skal gi tydelige retningslinjer for dimensjonering av massivtredekker.

Følgende standarder for beregning av vibrasjon er brukt som sammenligningsgrunnlag i denne oppgaven:

1. Eurokode 5 med østerisk tillegg
  - a. Understøttet to sider
  - b. Understøttet fire sider
2. Alternativ metode fra Hamm, Richter og Winter
3. Midlertidig forslag til nytt kapittel 9.3 i Eurokode 5

### 2.6.1 Eurokode 5

Ohlsson (2018) kontrollerte bruksgrensetilstand ved å se på egenfrekvens under punktlast og høyeste impulshastighet. Denne metoden er grunnlaget for nytt kapittel i Eurokode 5 og de reglene som er gjeldende i Norge. Standard Norge (2004b) er videre kilde i dette delkapitlet. Eurokode 5 viser til tre kriterier for verifisering av vibrasjonsegenskaper:

1. Egenfrekvens
2. Nedbøyning under 1 kN punktlast
3. Hastighet etter 1 Ns impuls

I denne oppgaven er det kun sjekket kriteriet om egenfrekvens (Tabell 2).

Tabell 2: Krav til egenfrekvens (StandardNorge, 2004b)

	Formel	Krav
Egenfrekvens	$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI_L}{m}} > f_{lim}$	$f_{lim} = 8 \text{ Hz}$

$m$  : masse per arealenhet [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]

$l$  : spennvidde [ $\text{m}$ ]

$EI_L$  : langsgående bøyestivhet [ $\text{Nm}^2/\text{m}$ ]

## 2.6.2 Østerrikes nasjonale tillegg (NA)

Østerrike ligger stadig lenger fremme enn øvrige europeiske land når det gjelder verifisering av massivtredekker. Det østeriske tillegget er brukt som utgangspunkt for Eurokode 5 (EC5), så disse er dermed noe like (*First drafts for a revised version of EN 1995-1-1, Eurocode 5, 2018*). I utkastet skiller man mellom tre klasser hva gjelder massivtredekker. Klasse 1 omfatter kontorlokaler, korte korridorer og gulv mellom leiligheter. Klasse 2 omfatter gulv i bolig innenfor samme enhet og klasse 3 omfatter gulv i rom hvor det ikke er varig opphold. Nasjonalt tillegg i eurokode 5 for Østerrike (2014) er videre brukt som kilde i dette delkapittelet.

I det østeriske tillegget er det tatt høyde for om massivtredekket er understøttet på to eller fire sider. Er dekket understøttet på to sider, neglisjeres sidestivheten og det beregnes etter øverste formel i Tabell 3. Er gulvet understøttet på fire sider, regnes sidestivheten inn og egenfrekvensen beregnes etter nederste formel i Tabell 3.

Tabell 3: Krav til egenfrekvens undersøttet alle fire sider = 6 Hz, to sider = 8 Hz (Nasjonalt Tillegg Eurokode 5 for Østerrike, 2014).

	Formel	Krav
Egenfrekvens	$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI_L}{m}} > f_{lim}$	$f_{lim} = 8 \text{ Hz} - \text{klasse 1}$
	$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI_L}{m} \sqrt{1 + \left(\frac{l}{B}\right)^4 \frac{EI_B}{EI_L}}} \geq f_{lim}$	$f_{lim} = 6 \text{ Hz} - \text{klasse 2}$

$m$  : gulvmasse [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]

$B$  : gulvbredde [ $\text{m}$ ]

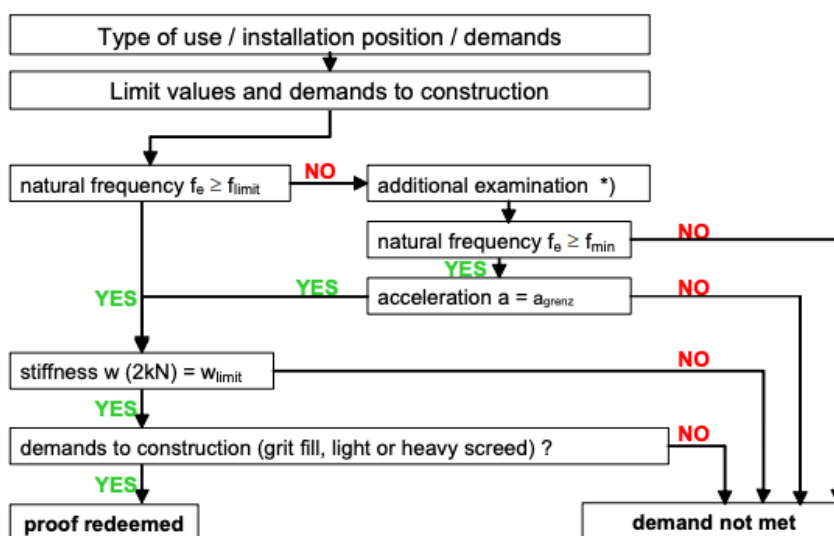
$l$  : spennvidde [ $\text{m}$ ]

$EI_L$  : bøyestivhet i lengderetning [ $\text{Nm}^2/\text{m}$ ]

$EI_B$  : bøyestivhet i bredderetning [ $\text{Nm}^2/\text{m}$ ]

### 2.6.3 Patricia Hamm, Antje Richter og Stefan Winter

På bakgrunn av at det fortsatt er knyttet usikkerhet til metoder for dimensjonering av massivtredekker, har det i denne oppgaven også blitt sammenlignet med en alternativ metode. Metoden er utarbeidet av Patricia Hamm, Antje Richter og Stefan Winter og er et resultat av undersøkelser gjort på ca. 50 bygninger og 100 gulv. Herunder på bygg i drift og elementer på laboratoriet. Av alle undersøkelsene ble 16 gjort på tre-betong kompositter og 38 på KL-tre. Resultatet ble brukt til å utforme en modell for beregning (Figur 17) (Hamm et al., 2010).



Figur 17: Oversiktskart for verifikasjon av vibrasjonsegenskaper til gulv i tre (Hamm et al., 2010).

Formler for beregning og krav til egenfrekvens er identiske som i den østeriske standarden (Tabell 3). Ved egenfrekvens under den absolutte grense på 4,5 Hz, blir ikke massivtredekket ansett som tilfredsstillende.

$$f_i \geq f_{lim}$$



## 2.6.4 Forslag til ny eurokode 5 (EC5)

Det gjøres oppmerksom på at formler og tabellverk fremdeles er under arbeid og at dette dermed ikke er et endelig forslag til ny EC5. Det blir i førsteutkastet til ny EC5 henvist til seks forskjellige prestasjonsnivåer. Grunnen til dette er av hensyn til ulike kulturer og ulike bruk. Det nasjonale tillegget eller ansvarlig prosjekterende bestemmer hvilket prestasjonsnivå som skal benyttes (*INTER-Paper 51-20-2: Development of a floor vibration design method for Eurocode 5*, 2018). Utkastet deler konstruksjoner inn i lavfrekvente og høyfrekvente gulv. For lavfrekvente gulv, hvor egenfrekvensen er lavere enn 8 Hz, stilles det krav til akselerasjon ( $a_{rms}$ ). Ved høyfrekvente gulv, hvor egenfrekvensen er større enn 8 Hz, anses gulvet som transient og det stilles krav til hastighet ( $v_{rms}$ ) (Tabell 4) (*First drafts for a revised version of EN 1995-1-1, Eurocode 5*, 2018). I denne oppgaven er kvalitetskriteriet for prestasjonsnivå I og II fra Tabell 5 lagt til grunn.

Tabell 4: Vibrasjonskrav (*INTER-Paper 51-20-2: Development of a floor vibration design method for Eurocode 5*, 2018).

Criteria	Floor performance levels					
	level I	level II	level III	level IV	level V	level VI
Stiffness criteria for all floors $w_{1kN}$ [mm] $\leq$	0,25		0,5	0,8	1,2	1,6
Response factor R	4	8	12, 16	16, 32	24, 64	32, 128
Frequency criteria for all floors $f_i$ [Hz] $\geq$	4,5					
Acceleration criteria for resonant vibration design situations $a_{rms}$ [ $m/s^2$ ] $\leq$	0,005 R					
Velocity criteria for transient vibration design situations $v_{rms}$ [m/s] $\leq$	0,0001 R <sub>i</sub>					

Tabell 5: Anbefalt valg av prestasjonsnivå hvor det skiller mellom A (Bolig) og B (Kontorbygg) (*INTER-Paper 51-20-2: Development of a floor vibration design method for Eurocode 5*, 2018).

Use category	Quality choice	Base choice	Economy choice
A (residential) multi-family block single family house	level I, II, III level I, II, III, IV	level IV level V	level V level VI
B (office)	level I, II	level III	level IV

## 2.7 Målemetoder og databehandling

Resultatene i denne oppgaven er fremstilt etter å ha benyttet flere forskjellige program og mye forskjellig utstyr. Dette kapittelet forklarer de enkelte verktøyene nærmere.

### 2.7.1 Catman data aquisition software

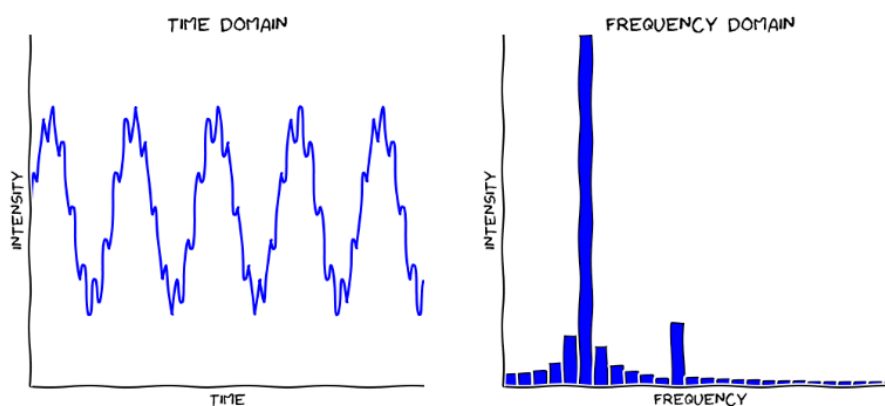
Catman data aquisition software (DAQ) er en programvare som enkelt lar deg samle inn, analysere, visualisere og behandle måledata. I denne oppgaven ble det benyttet CatmanEasy, som er best for visualisering av måledata (HBM, 2020).

### 2.7.2 The Jupyter Notebook

I denne oppgaven ble The Jupyter Notebook benyttet som programmeringsverktøy til behandling av data. Dette er et åpent, gratis kodespråk via nettleseren. Programmet tillater interaktiv databehandling på flere språk (Jupyter, 2020).

#### 2.7.2.1 Fourier transformasjon

Komplekse bølgeformer kan ses på som sinusbølger med ulike faser, amplituder og frekvenser. Innebygd Fourier transformasjon i The Jupyter Notebook omformer signalet og gir informasjon om hvilke frekvenser den enkelte sinusbølgen i signalet har (Figur 18) (DiCola, 2018). I denne oppgaven er resultatet av transformasjonen en vibrasjonsamplitude, som gjør det mulig å undersøke systemets vibrasjonsegenskaper ved Peak Picking Method.



Figur 18: Transformasjon fra tids- til frekvensdomenet(DiCola, 2018).

### 2.7.2.2 Peak Picking Method

Ved begge måter å bearbeide dataene på ble egenfrekvensen til dekket bestemt ved Peak Picking Method. Metoden går ut på å lokalt estimere enkle SDOF-systemers egenfrekvenser. Ideen er at responsen til systemet går til det ekstreme ved systemets egenfrekvens. Dersom det antas at egenfrekvensene er separert så godt at det lar seg gjøre å analysere én egenfrekvens av gangen, kan man også benytte metoden på MDOF-systemer (Enríquez-Zárate et al., 2019). Som vist i Kapittel 3 Metode, er egenfrekvensen altså funnet ved å lese av frekvensen på toppene til FFT-grafen.

### 2.7.3 Akselerometer

De piezoelektriske akselerometrene benyttet i denne oppgaven er produsert av PCB Piezotronics Inc., og er en høysensitiv, keramisk sensor som måler akselerasjon. Modellen er 393B12 (Figur 19) og har en sensitivitet på  $10000 \text{ mV/g}$  eller  $1019,4 \text{ mV}/(\text{m/s}^2) \pm 10 \%$  (Piezotronics, 2020).



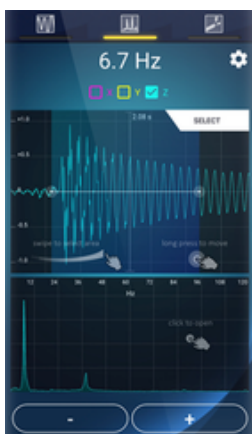
Figur 19: PCB Piezotronics, 393B12 (Piezotronics, 2020).

#### 2.7.3.1 Piezoelektrisk effekt

Piezoelektriske akselerasjonsmålere bruker den piezoelektriske effekten visse materialer har for å måle akselerasjon. Effekten er en endring i elektrisk polarisering når materialene utsettes for mekanisk spenning. I akselerometeret skjer det videre en konvertering av energi fra en form til en annen og ut kommer et elektrisk signal (AZoSensors, 2015).

### 2.7.4 MyFrequency App

MyFrequency App (Figur 20) er en applikasjon som lar deg lagre, måle og analysere vibrasjoner. Der profesjonelle akselerometre har en sensitivitet på ca. 10000 mV/g, har moderne mobiltelefoner kun en sensitivitet på ca. 200 mV/g. Selv om forskjellen er såpass omfattende, viser tester gjort av utvikler at avviket mellom profesjonelle akselerometre og mobil-målinger kun var på 1,1% (APPtodate, 2020). I denne oppgaven er applikasjonen brukt for å sammenligne resultatet med mer avanserte måleinstrumenter. Det er i tillegg sett på hvorvidt det er mulig å gjøre et grovt estimat på den faktiske egenfrekvensen til massivtredekket.



Figur 20: Skjermdump av MyFrequency App i bruk (APPtodate, 2020).

### 2.7.5 Fuktmåler

Fuktmåleren fra biltema (Figur 21) er et verktøy som måler fuktighet i treverk med nøyaktighet opp til 28 % fuktighet  $\pm$  2 % og over 28 % fuktighet  $\pm$  5 % (Biltema, 2020). I denne oppgaven er verktøyet brukt til å måle fuktinnhold i de undersøkte massivtredekkene, med hensikt å kunne vurdere om fuktinnhold påvirker vibrasjonsegenskaper.



Figur 21: Fuktmåler fra Biltema (Biltema, 2020).

## 3 Metode

Følgende utstyr og programvare er brukt i prosessen:

- CatmanEasy, versjon 5.3.1.34
- Piezoelektriske akselerasjonsmålere fra PCB Piezotronics Inc., modell: 393B12
- The Jupyter Notebook, versjon 6.0.2
- Microsoft Office Excel 2016
- MyFrequency App, versjon 2.1
  - o Samsung Galaxy S8+

### 3.1 Laborrietester

Kapittelet forklarer fremgangsmåten for å bli kjent med utstyret i laboriet før reelle undersøkelser.

#### 3.1.1 Oppsett

Figur 22 viser testoppsettet av akselerometrene i laboriet, med syv akselerometre på senterlinjen i langsgående retning og en på hver side midt på dekket. Merk at undersøkelsene på respektive teststeder bestod av et varierende antall sensorer. Grunnen til valgt plasseringen er gangtester utført av (Sedlacek et al., 2006).



Figur 22: Testoppsett av sensorer på et kantstilt massivtredekke (Privat).

Figur 23 viser hvordan akselerometrene via kabler er koblet til forsterkere og videre til måleinstrumentet QuantumX MX840B. Signalene transporteres via en nettverkskabel til en bærbar PC hvor dataene konverteres fra elektriske til fysiske verdier i CatmanEasy.



Figur 23: Oppkobling av sensorer til forsterkere og måleinstrumentet QuantumX MX840B (Privat).

### 3.1.2 Kalibrering av akselerometre

Akselerometrene benyttet i denne oppgaven måler spenningsendringer (volt). Det er derfor nødvendig å gjøre om fra volt til  $m/s^2$ . Denne kalibreringen ble gjort for hvert akselerometer i programmet CatmanEasy ved bruk av sensitivitetsfaktoren som ble oppgitt fra produsenten av utstyret. Under «sensorinnstillinger» ble hvert akselerometer tildelt respektiv sensitivitetsfaktor og bedt om å gjøre om fra elektriske til fysiske verdier (Figur 21).



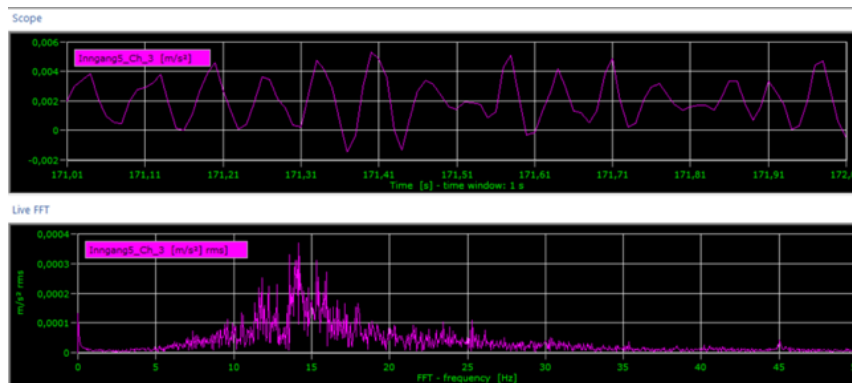
Figur 24: Skjermdump av sensorinnstillinger i CatmanEasy, hvor sensitivitetsfaktoren er lagt inn.

### 3.1.3 Innstillinger i CatmanEasy

I CatmanEasy ble samplingsraten satt til 100 Hz, som betyr at det ble lagret 100 verdier pr. sekund. Varighet på innsamlingene var alt fra seks til syv timer. Programmet ble stilt inn slik at akselerometrene målte gjennom en normal arbeidsdag og gjentok prosessen et ønsket antall dager.

### 3.1.4 Analyse

I CatmanEasy gjøres det en liveanalyse ved at en medstudent går over dekket slik at det er mulig å lese av akselerasjon og live FFT (Figur 24). Dette samsvarer ikke med realiteten, men gir en indikasjon på om utstyret og systemet er koblet opp korrekt. Under test ble det sett etter akselerasjoner i området  $0 \text{ [m/s}^2\text{]} - 0,1 \text{ [m/s}^2\text{]}$  og egenfrekvenser i området 10 Hz. Dette var et utgangspunkt etter å ha lest annen forskning, og viste seg i Kapittel 4 Resultater å være en god antakelse.



Figur 25: Skjermdump av CatmanEasy. Akselerasjon i øverste vindu, live FFT i nederste (privat).

## 3.2 Testobjekter

Dette kapitlet er skrevet for å gjennomgå prosessen ved respektivt teststed, i tillegg til å gi en innføring i de ulike prosjektene.

Det er i Kapittel 5 Resultat valgt å presentere et utvalg data som representerer den minste egenfrekvensen funnet ved respektivt målested. Øvrig data som ikke er presentert i resultatkapitlet, er å finne i Vedlegg B1: Innsamlet akselerasjon, Vedlegg B2: Innsamlet RMS-akselerasjon og Vedlegg B3: Fourier transformasjon. Ved Kongsvinger ungdomsskole er det gjort et så omfattende antall målinger at det kun velges å presentere data fra dag 1 i Vedlegg B. Øvrig data kan tilegnes ved forespørsel til forfatter av denne oppgaven.

Per testobjekt er det presentert:

- Totalt innsamlet akselerasjon over alle dager
- Akselerasjon over timen hvor minste egenfrekvens ble funnet
- RMS-akselerasjon over timen hvor minste egenfrekvens ble funnet
- FFT-graf over minuttene med størst aktivitet fra rms-akselerasjon
- Tabell med klimadata
- Akselerasjonstabell med største og minste verdi for alle dager
- RMS-akselerasjonstabell med største og minste verdi for alle dager
- FFT-tabell med største og minste egenfrekvens for alle dager
- Samtlige egenfrekvenser funnet



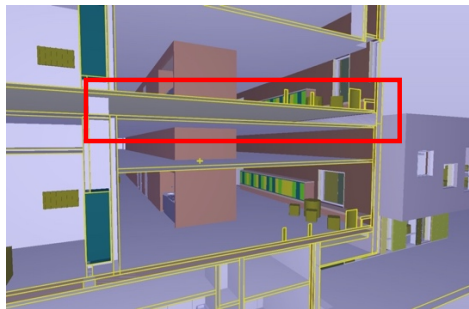
### 3.2.1 Kongsvinger ungdomsskole (KUSK)

Ved Kongsvinger ungdomsskole kommer impulslastene fra elever på trinnene 8. – 10. klasse, i tillegg til lærere og driftsansvarlige.



Figur 26: Kongsvinger ungdomsskole (Privat).

Skolen er i utgangspunktet prosjektert oppført med stål og betong, men underveis i byggeprosessen fikk kommunen øynene opp for massivtre og skolen ble omprosjektert. For å håndtere de store spennene som i utgangspunktet var tiltenkt betong/hulldekker, ble det benyttet kassedecker i massivtre (Woodcon, 2018). Figur 27 og 28 viser det undersøkte massivtredekket som ligger mellom 2. og 3. etasje.



Figur 27: Undersøkt massivtredekke markert i rødt (Korbøl, K.A - ØMFjeld).



Figur 28: Massivtredekke under konstruksjon (Korbøl, K. A - ØMFjeld).

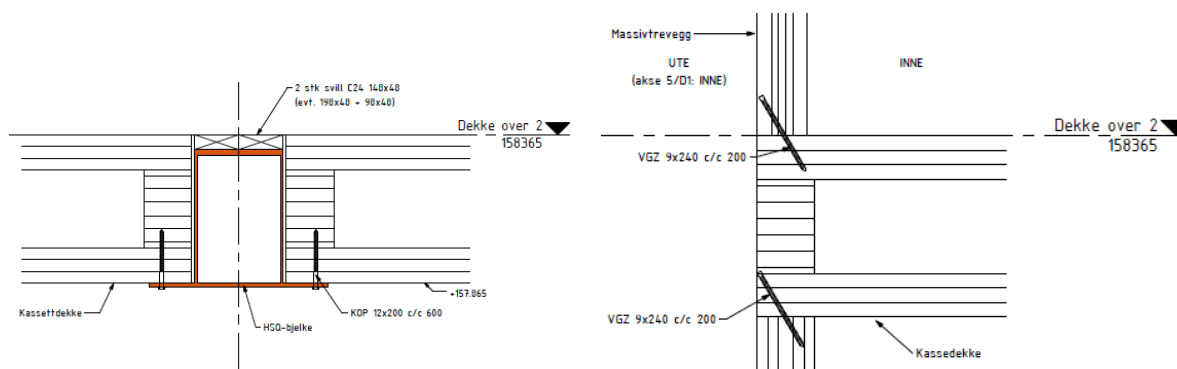
Som vist i Figur 29 ble alt av sensorer og datautstyr lagt over systemhimlingen. På den måten ble ikke selve målingene interessante for nysgjerrige ungdomsskoleelever.



Figur 29: Oppkobling over systemhimling (privat).

### 3.2.1.1 Undersøkt etasjeskiller

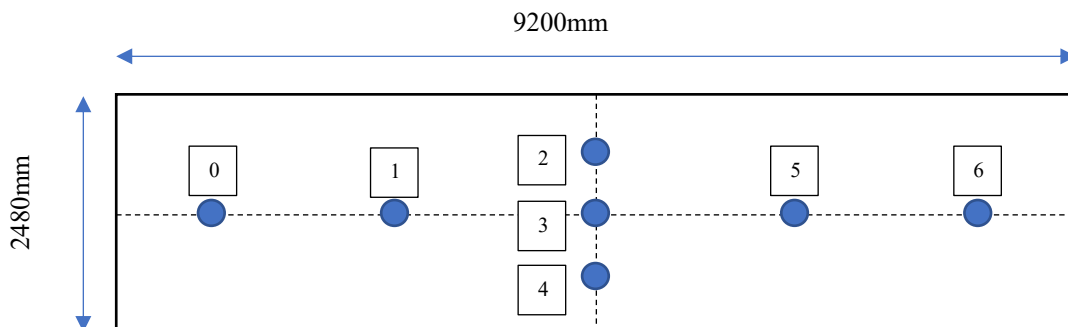
Etasjeskilleren er et hulromsdekke/kassedekke med spennvidde = 9200mm, tykkelse = 500mm og ca. bredde = 2480mm (Figur 31). Figur 30 viser opplagre og forbindelse kassedekke/yttervegg.



Figur 30: Opplegg kassedekke/HSQ til venstre og opplegg kassedekke/yttervegg til høyre (Korbøl, K. A – ØMFjeld).

### 3.2.1.2 Sensorplassering

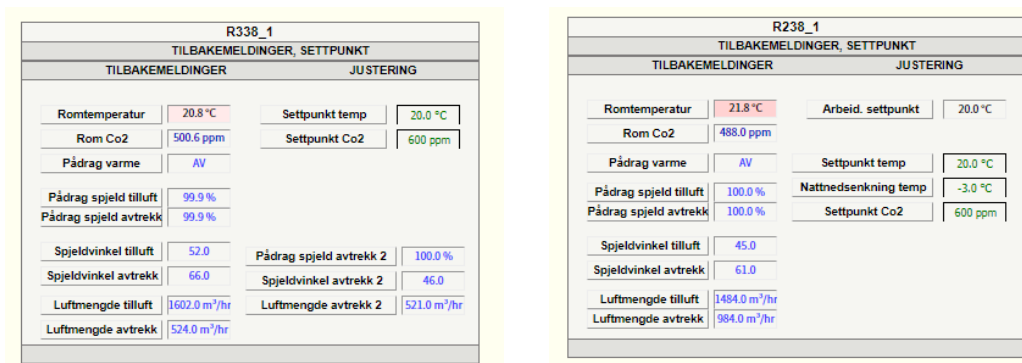
Plassering av akselerometrene er vanskelig å få langs senterlinjen av elementet ettersom det ligger gipsplater i underkant, i tillegg til kabelbruer og kanaler i himlingen. Akselerometrene er altså plassert etter beste evne, men noen avvik er å forvente. Figur 31 viser ønsket sensorplassering



Figur 31: Dimensjoner på målt dekke og plassering av sensorer (egen illustrasjon).

### 3.2.1.3 Klimadata

Etter forespørsel har driftsansvarlig ved Kongsvinger ungdomsskole opplyst om settpunkttemperaturer i etasjen under og over undersøkt massivtredekke (Figur 32). Dette er brukt for å se om temperaturen kan ha en påvirkning på innsamling av egenfrekvens.



Figur 32: Temperaturdata 3. etasje til venstre og 2. etasje til høyre.

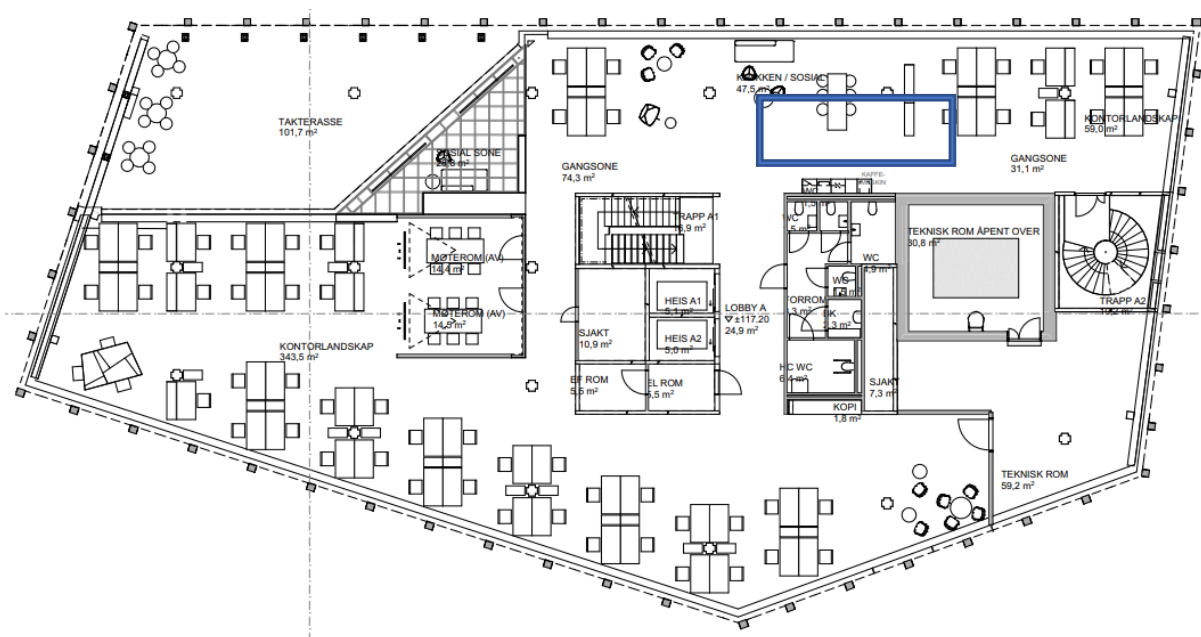
### 3.2.2 Valle Wood 1

Ved Valle Wood 1 kommer impulslastene fra voksne mennesker ved et av sosialområdene. Bygget er dimensjonert etter NS-EN 1990 og NS-EN - 1991-1-1-(1-6) (Seim, 2016).



Figur 33: Valle Wood (Privat).

Valle Wood (Figur 33) er et kontorbygg oppført i massivtre på Valle, i Gamle Oslo. Undersøkt massivtredekke ligger mellom 6. og 7. etasje, med akselerometrene festet i taket under blå firkant markert på Figur 34. Massivtredekket ligger ved kjøkken/sosialsone og er lik i begge etasjer.



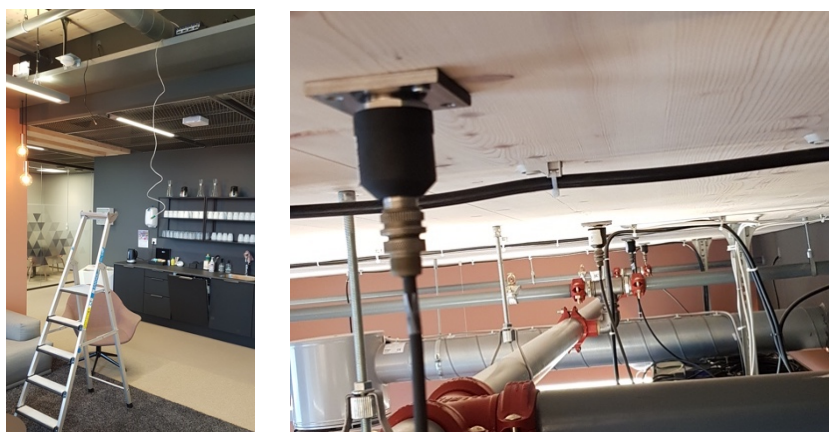
Figur 34: Plantegning Valle Wood 7. etasje. Massivtredekket ligger i området markert med blå firkant (Oslo, 2016).

### 3.2.2.1 Undersøkt etasjeskiller

Undersøkt element er en etasjeskiller i krysslagt massivtre, opplagt på vegg (Oslo, 2016).

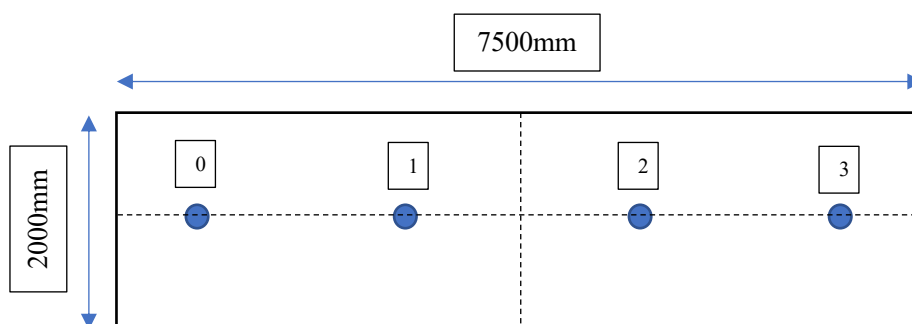
### 3.2.2.2 Sensorplassering

Fire akselerometre er etter ønske plassert i lengderetning over kabelbroen ettersom massivtreet er synlig og eventuelle skader/skruehull fra fester måtte skjules mest mulig. Figur 35 viser oppkobling av utstyret over kabelbroen.



Figur 35: Oppkobling av utstyr over kabelbro, fire akselerometre i lengderetning (privat).

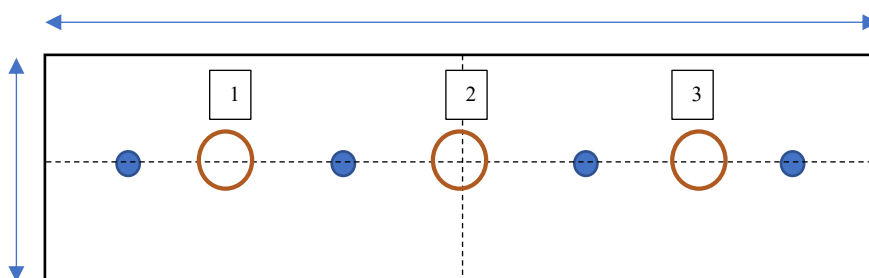
Akselerometrene er plassert tilnærmet lik Figur 36, men ettersom alt utstyr skulle plasseres over kabelbroen ble det ikke like nøyaktig som ønsket.



Figur 36: Dimensjoner på dekket og valgt plassering av sensorer (Privat illustrasjon).

### 3.2.2.3 Klimadata

Driftsansvarlig ved Valle Wood har opplyst om settpunkttemperaturer i etasjen under og over undersøkt massivtredekke (Tabell 10). Videre er fuktprosenten i massivtredekket målt ved bruk av en fuktmåler (Figur 19). Undersøkelser med fuktmåleren ble gjort på steder markert i Figur 37.



Figur 37: Fuktprosent undersøkt ved markerte områder (privat illustrasjon).

### 3.2.2.4 MyFrequency App

Applikasjonen ble lagt på gulvet i etasjen over ved tilsvarende punkter som i Figur 37. Målinger ble gjort tre ganger over en periode på 60 sekunder hver seg. Egenfrekvensen ble videre bestemt ved Peak Picking Method (2.7.3.2). Mobiltelefonen benyttet er en Samsung Galaxy S8+.

### 3.2.3 Valle Wood 2

Ved Valle Wood 2 kommer impulslastene fra voksne mennesker i et åpent kontorlandskap. Bygget er dimensjonert etter NS-EN 1990 og NS-EN - 1991-1-1-(1-6) (Seim, 2016).

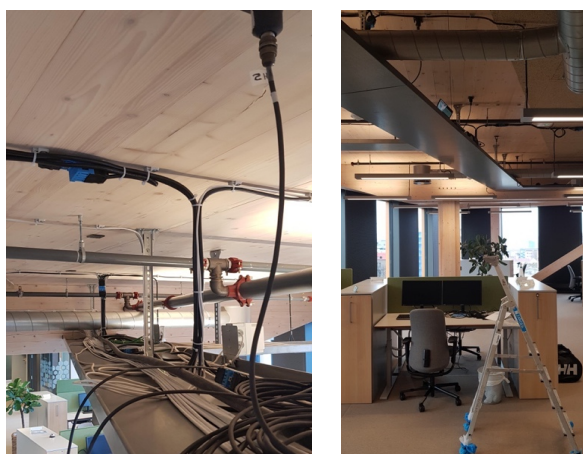
Undersøkt massivtredekke ligger mellom 5. og 6. etasje. Akselerometrene er festet i tak under blå firkant markert på Figur 38. Massivtredekket ligger i et åpent kontorlandskap og er lik i begge etasjer.



Figur 38: Plantegning Valle Wood 6. etasje. Massivtredekket ligger i området markert med blå firkant (Oslo, 2016).

#### 3.2.3.1 Undersøkt etasjeskiller

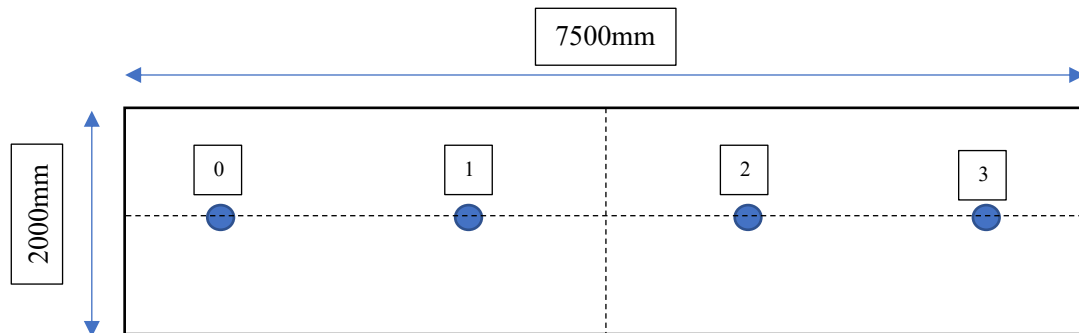
Undersøkt element er en etasjeskiller i krysslågt massivtre (Oslo, 2016). Figur 39 viser oppkobling av utstyr over kabelbro.



Figur 39: Oppkobling av akselerometre over kabelbro i åpent kontorlandskap (privat).

### 3.2.3.2 Sensorplassering

Akselerometrene er plassert tilnærmet lik Figur 40, men ettersom alt utstyr skulle plasseres over kabelbroen ble det ikke like nøyaktig som ønsket. Som vist i Figur 38 er akselerometrene plassert diagonalt, så avstandene vil heller ikke være like nøyaktig som i Figur 40.



Figur 40: Dimensjoner på dekket og valgt plassering av sensorer (privat illustrasjon).

### 3.2.3.3 Klimadata

Driftsansvarlig ved Valle Wood har opplyst om settpunkttemperaturer i etasjen over og under analysert massivtredekke (Tabell 15). Dette er brukt for å se om temperaturen påvirker innsamling av egenfrekvens. Videre er fuktprosenten i massivtredekket målt på tilsvarende steder som Valle Wood 1 (Figur 37) ved bruk av samme fuktmåler (Figur 19).



### 3.3 Behandlingsmetode

#### 3.3.1 Behandling av datasett

De fysiske verdiene behandles i programmeringsverktøyet The Jupyter Notebook. Dataene lagres i en ASCII-fil og leses inn i The Jupyter Notebook som en csv-fil (comma separated values), hvor matematiske operasjoner gir grafer som beskriver akselerasjon, rms-akselerasjon og egenfrekvens ved henholdsvis tids- og frekvens-rommet. Datascript for behandling av data finnes i Vedlegg A.

Ved behandling av innsamlet data med en frekvens på 100 Hz (100 målinger per sekund) ble det raskt tydelig at 2 520 000 målepunkter per dag, per sensor ble tidkrevende å behandle. Dataene ble behandlet time for time, i tillegg til en FFT-analyse over de minuttene med mest aktivitet per time. På bakgrunn av dette ble antall sensorer nedjustert fra syv på Kongsvinger til fire ved Valle Wood. Utover nedjustering av antall sensorer ble det kun gjort analyser av data hvor det var mye aktivitet. Rolige partier ble ikke analysert, med den hensikt å spare tid.

Data fra hvert akselerometer ble behandlet time for time ved å lese inn de 360 000 første verdiene, tilsvarende den første timen, de neste 360 000 verdiene for den andre timen osv. Dernest ble de 10 minuttene med mest aktivitet per time, sett ut ifra rms-akselerasjon, behandlet ved en FFT-analyse bygd inn i The Jupyter Notebook (Vedlegg A).

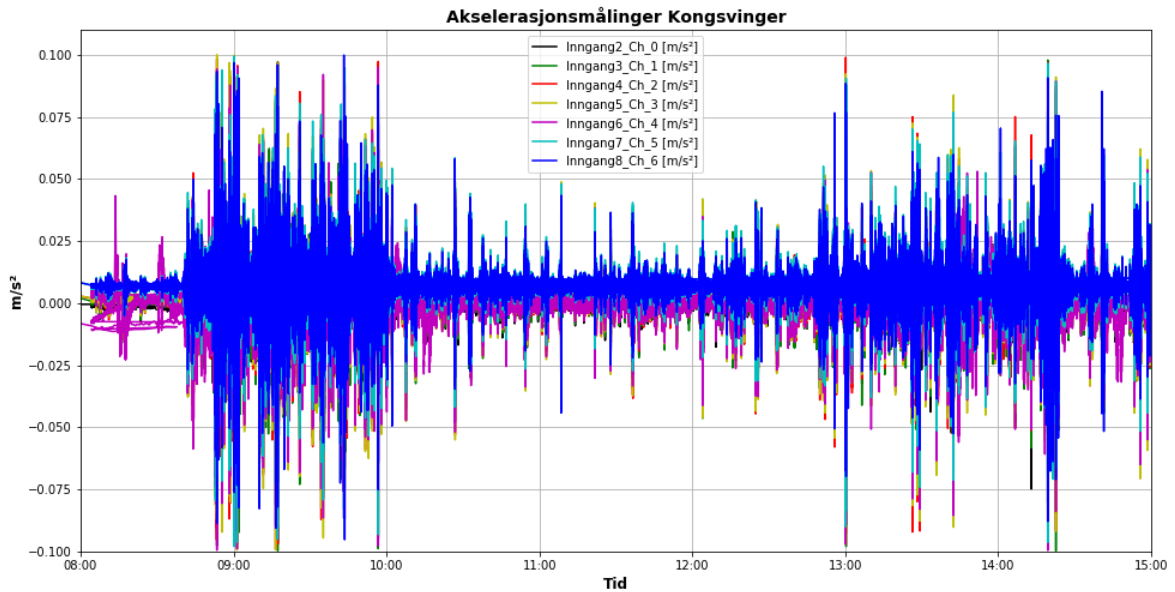
#### 3.3.2 Bearbeidelse av resultater

Ettersom akselerometre kun måler akselerasjon må verdiene bearbeides for å finne egenfrekvensen. Dette ble gjort på to måter. I første omgang ble det gjort en Fast Fourier Transformation (FFT) i CatmanEasy. Dette er en live-måling og kan ikke gjøres post innhenting av data. I denne oppgaven er live FFT i CatmanEasy brukt som en indikasjon på hvilken egenfrekvens dekket har. En databehandling i etterkant var nødvendig for å få et bedre statistisk grunnlag. Metoden brukt for å bearbeide dataene er derfor ved et script i The Jupyter Notebook (Vedlegg A). Videre er Peak Picking Method (2.7.3.2) benyttet for å bestemme massivtredekkets egenfrekvens.

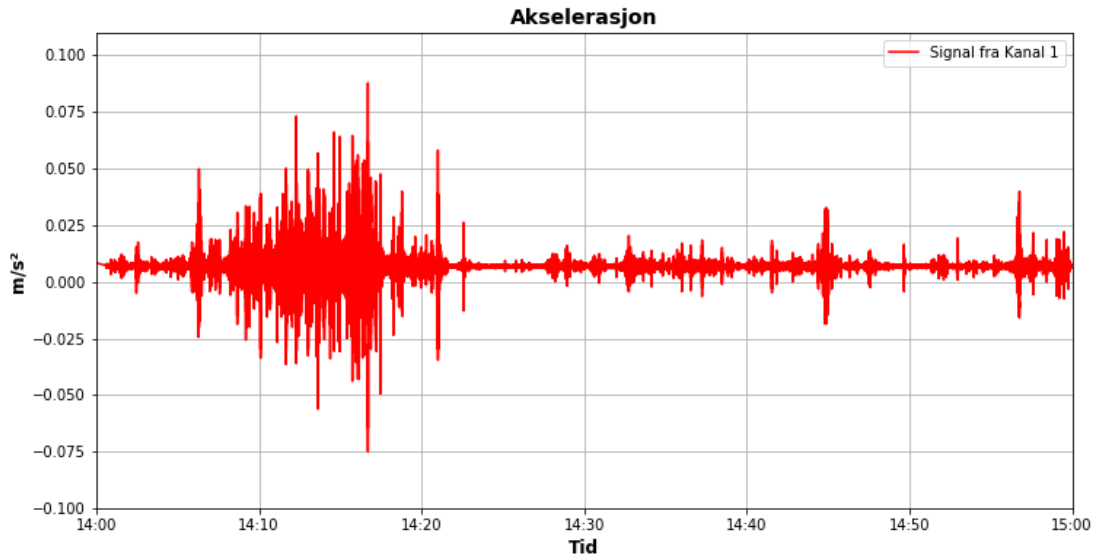
## 4 Resultater

### 4.1 Kongsvinger ungdomsskole

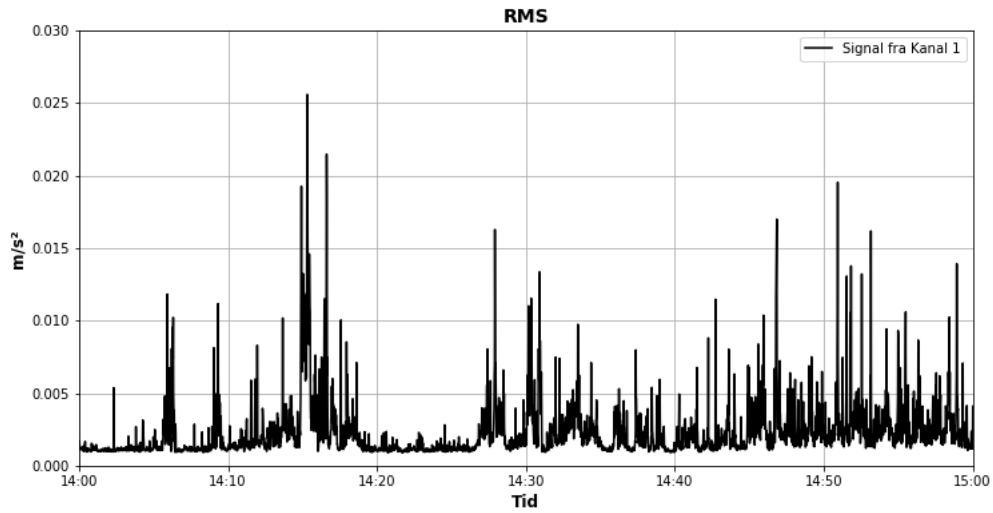
#### 4.1.1 Utvalgt data behandlet i perioden



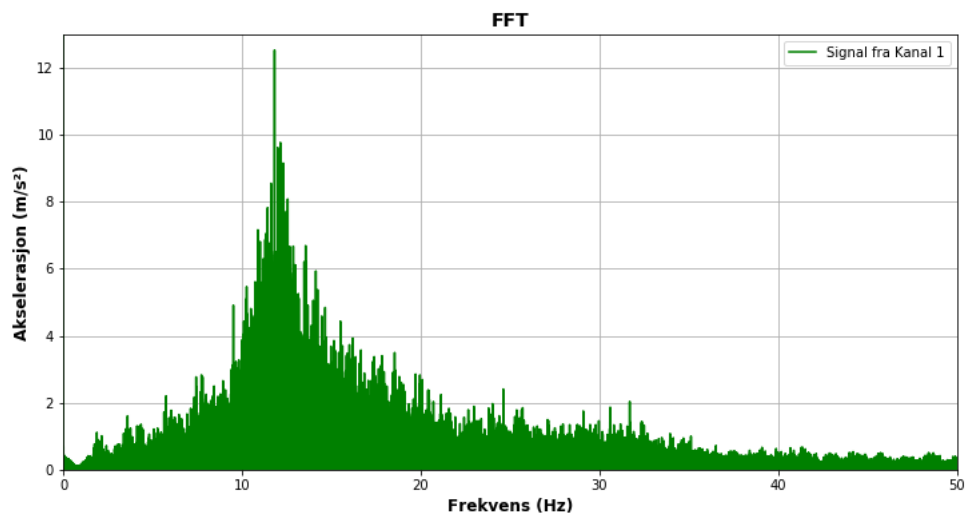
Figur 41: Innsamlet akselerasjon fra samtlige syv sensorer – Dag 1 (Python).



Figur 42: Akselerasjon fra tidsrom med mye aktivitet – Kl. 14:00 – 15:00 (Python).

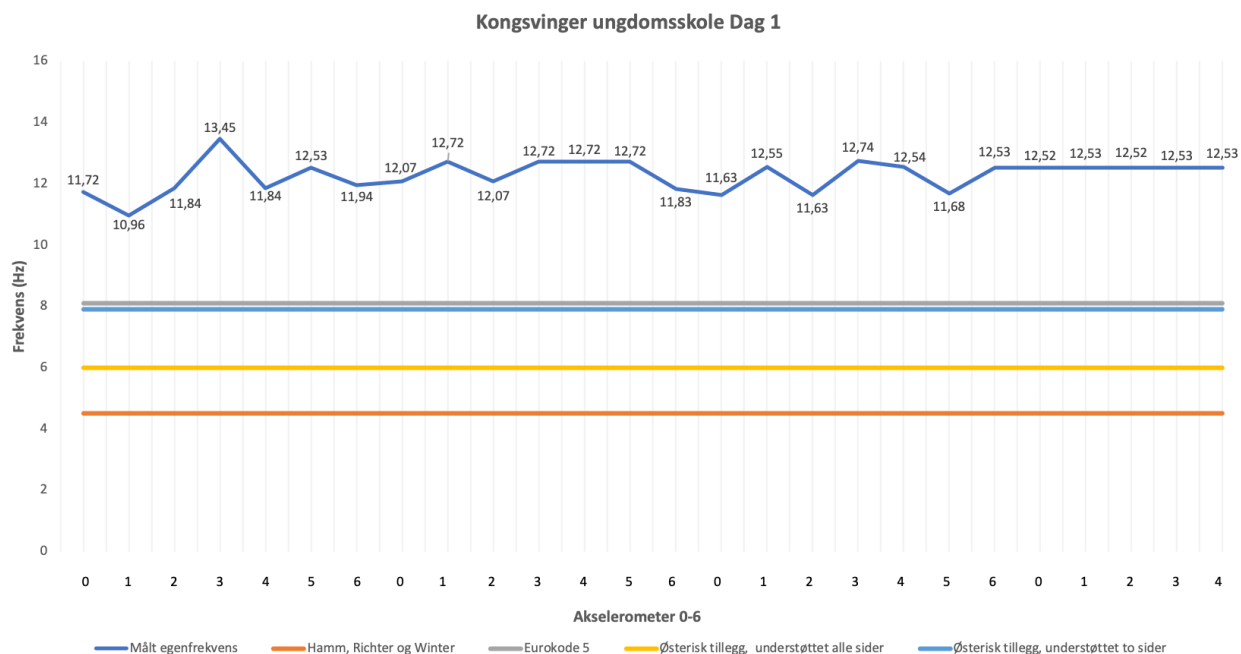


Figur 43: «Root mean square»-akselerasjon for tidsrom med mye aktivitet – Kl. 14:00 – 15:00 (Python).

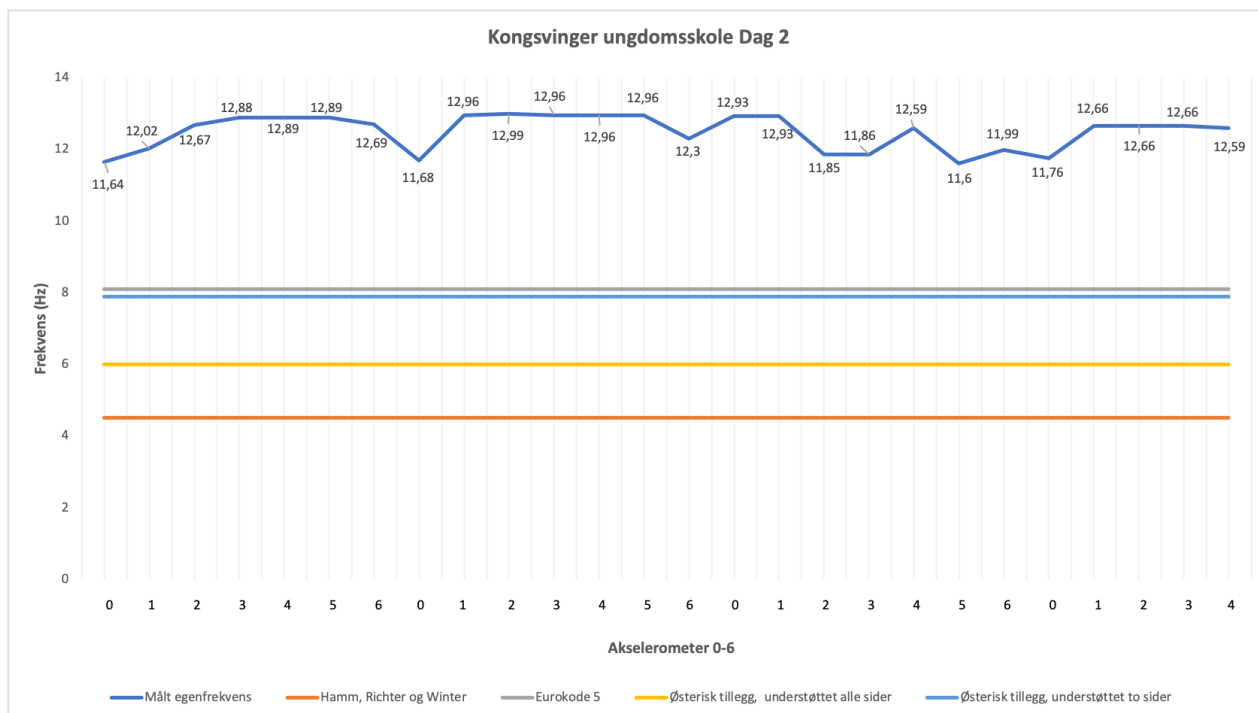


Figur 44: FFT-analyse av tidsrom med mye aktivitet – Kl. 14:10 – 14:20 (Python)

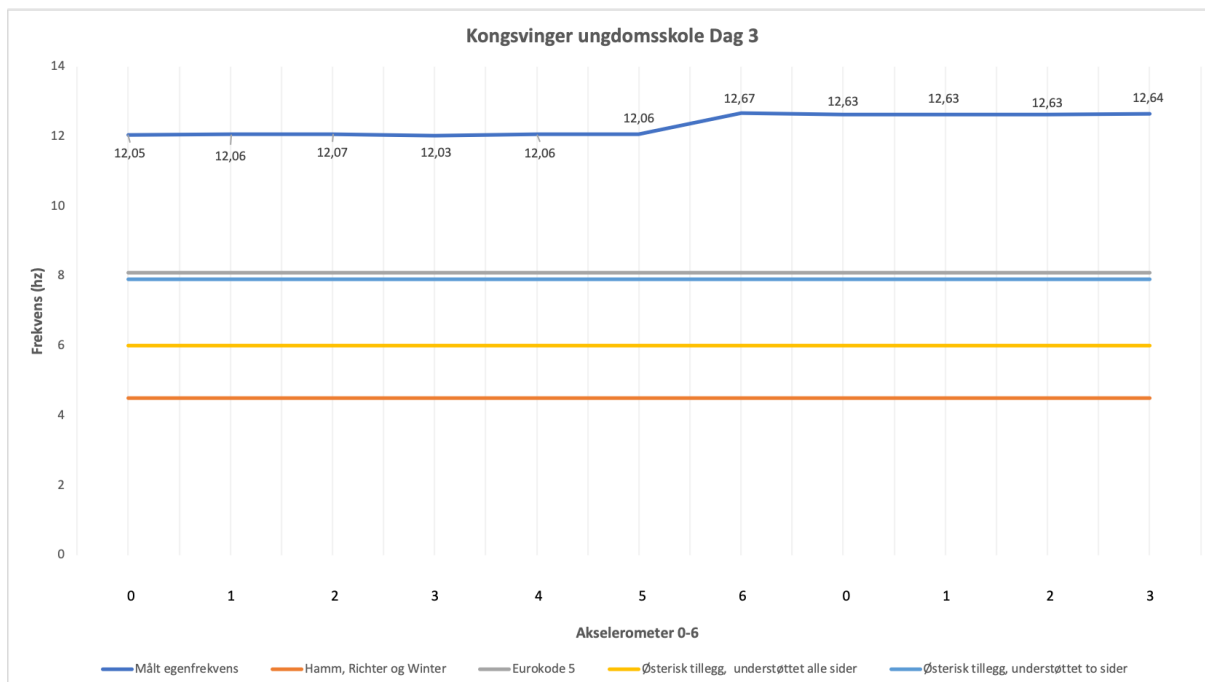
### 4.1.2 Massivtredekkets egenfrekvenser



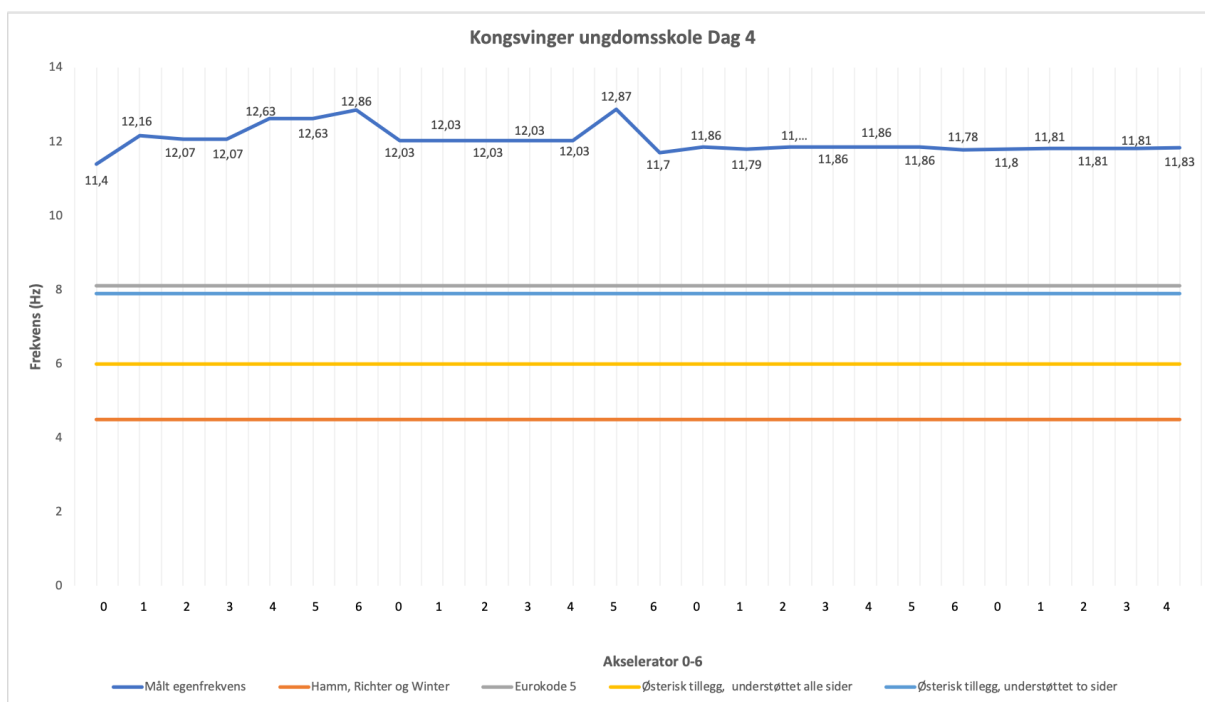
Figur 45: Innhentede egenfrekvenser fra dag 1 opp mot ulike krav.



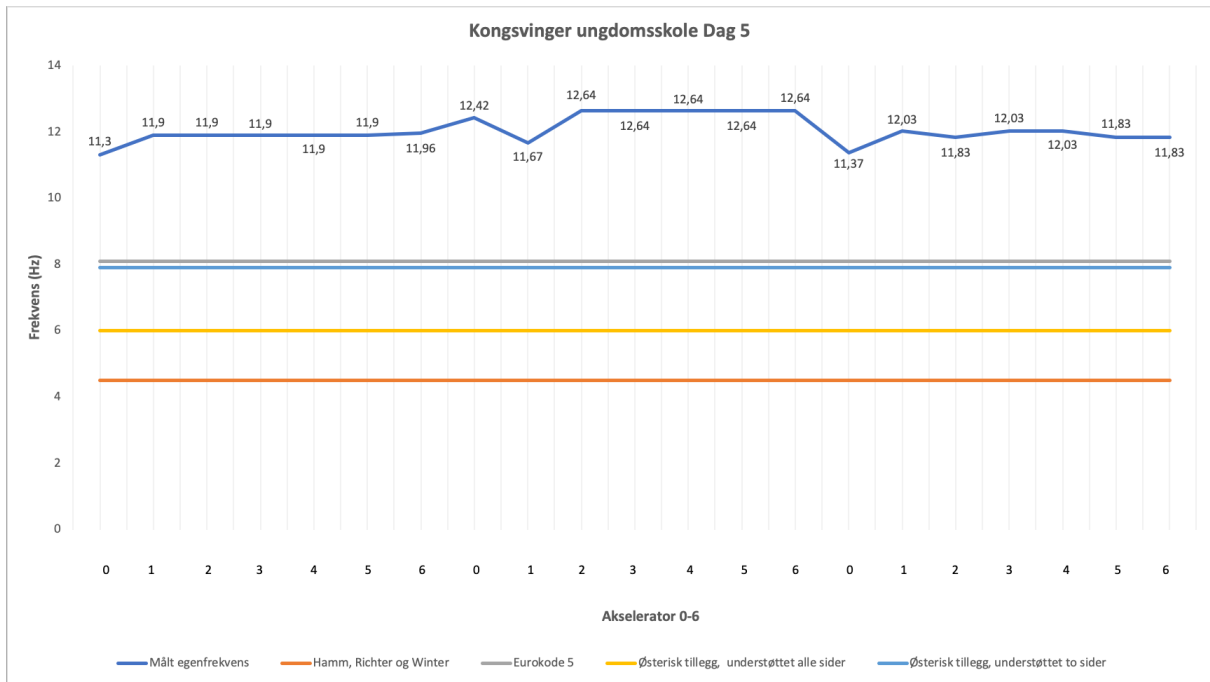
Figur 46: Innhentede egenfrekvenser fra dag 2 opp mot ulike krav.



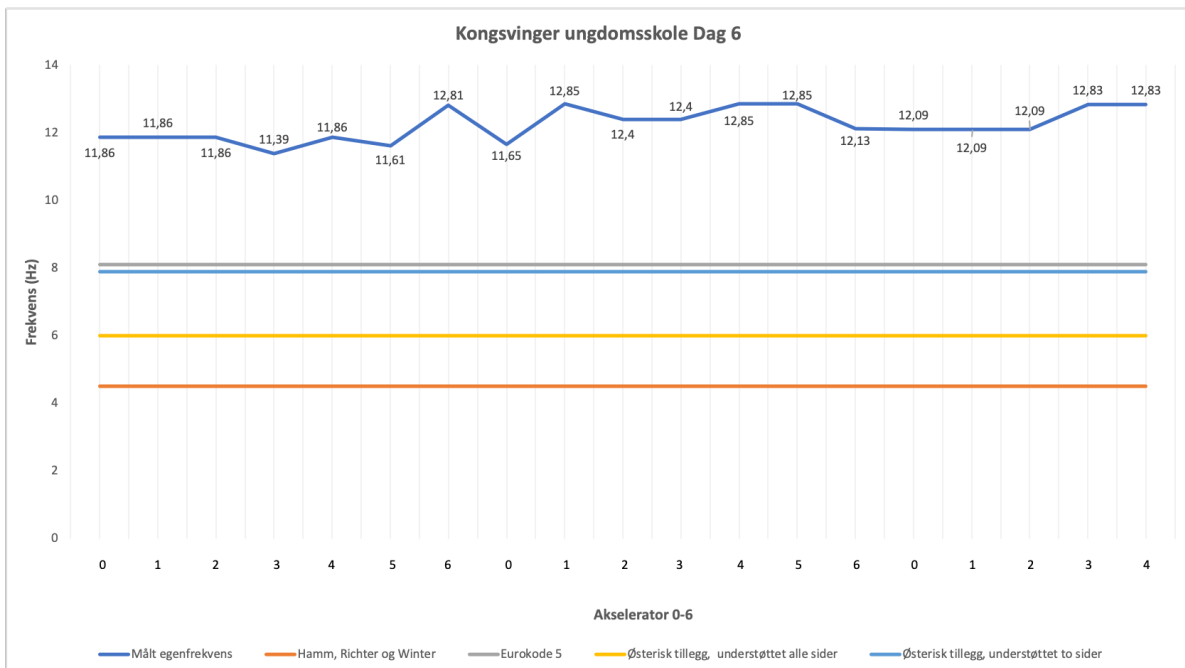
Figur 47: Innhentede egenfrekvenser fra dag 3 opp mot ulike krav.



Figur 48: Innhentede egenfrekvenser fra dag 4 opp mot ulike krav.



Figur 49: Innhentede egenfrekvenser fra dag 5 opp mot ulike krav.



Figur 50: Innhentede egenfrekvenser fra dag 6 opp mot ulike krav.

### 4.1.3 Sammenfatning av data fra KUSK

Tabell 6: Klimadata i tilknytning massivtredekket, verdier er oppgitt i grader celsius (se Figur 32).

	Etasje over	Etasje under
Temperatur målt i °C	20,8	21,8

Tabell 7: Målte akselerasjoner på Kongsvinger ungdomsskole, alle verdier oppgitt i  $m/s^2$ .

	Dag 1	Dag 2	Dag 3	Dag 4	Dag 5	Dag 6
Min.	0,03	0,03	0,045	0,032	0,054	0,045
Maks.	0,099	0,099	0,097	0,099	0,099	0,099

Tabell 8: Målte rms-akselerasjoner på Kongsvinger ungdomsskole, alle verdier oppgitt i  $m/s^2$ .

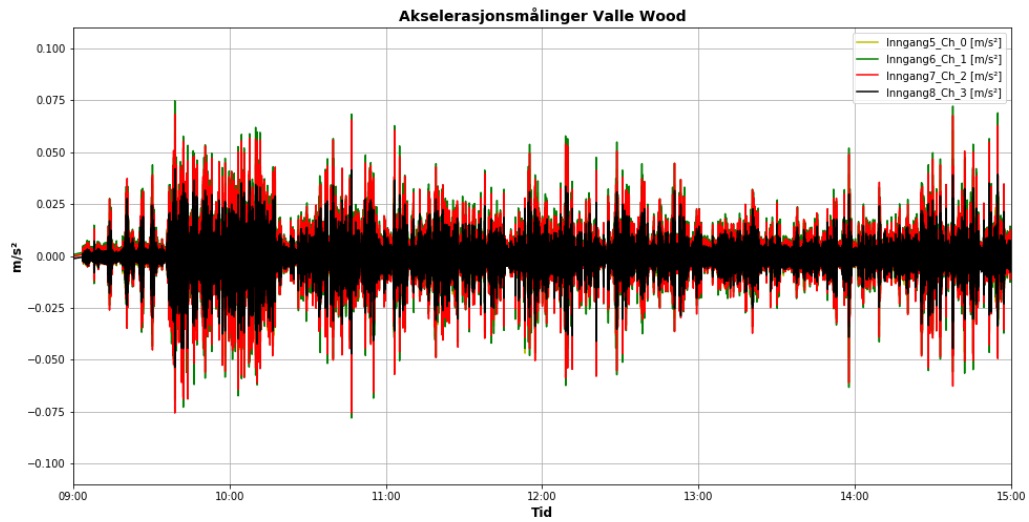
	Dag 1	Dag 2	Dag 3	Dag 4	Dag 5	Dag 6
Min.	0,012	0,012	0,011	0,007	0,019	0,017
Maks.	0,041	0,041	0,033	0,09	0,045	0,041

Tabell 9: Egenfrekvenser funnet ved FFT (Fast Fourier Transformation) og Peak Picking-Method på Kongsvinger ungdomsskole, alle verdier er oppgitt i Hz.

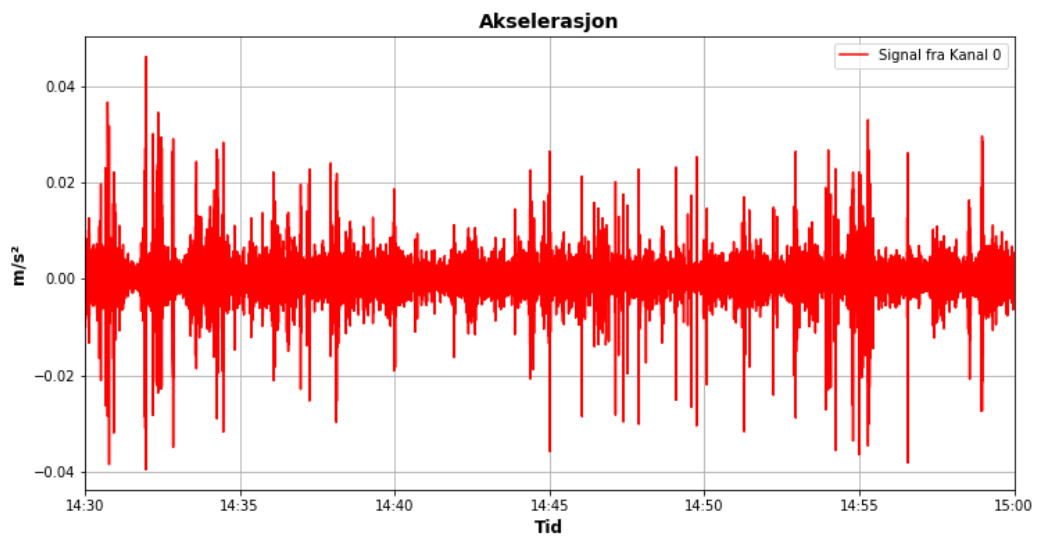
	Dag 1	Dag 2	Dag 3	Dag 4	Dag 5	Dag 6
Min.	10,96	11,60	12,03	11,40	11,30	11,39
Maks.	13,45	12,99	12,67	12,87	12,64	12,85

## 4.2 Valle Wood 1

### 4.2.1 Utvalgt data behandlet i perioden

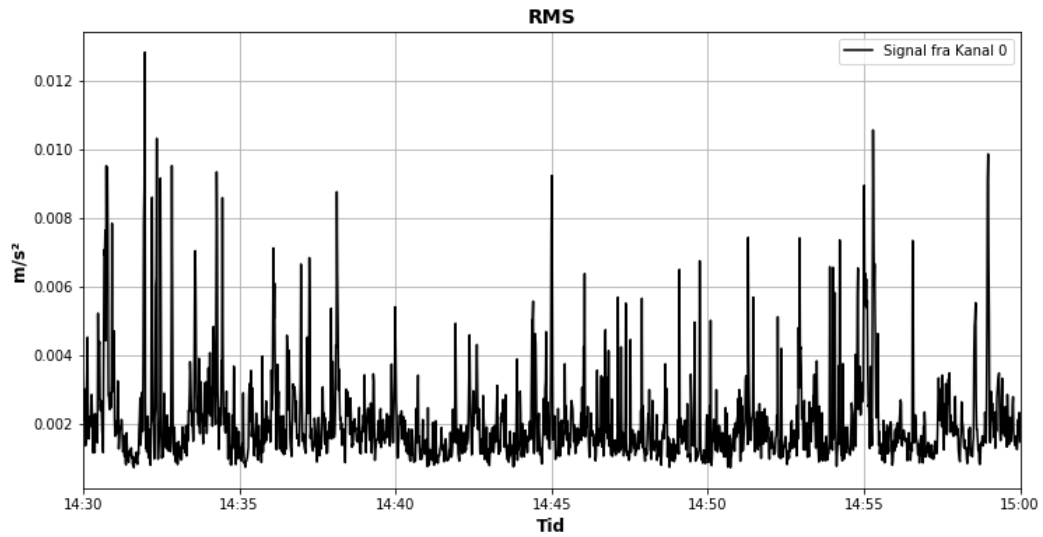


Figur 51: Innsamlet akselerasjon fra samtlige fire sensorer – Dag 2 (Python).

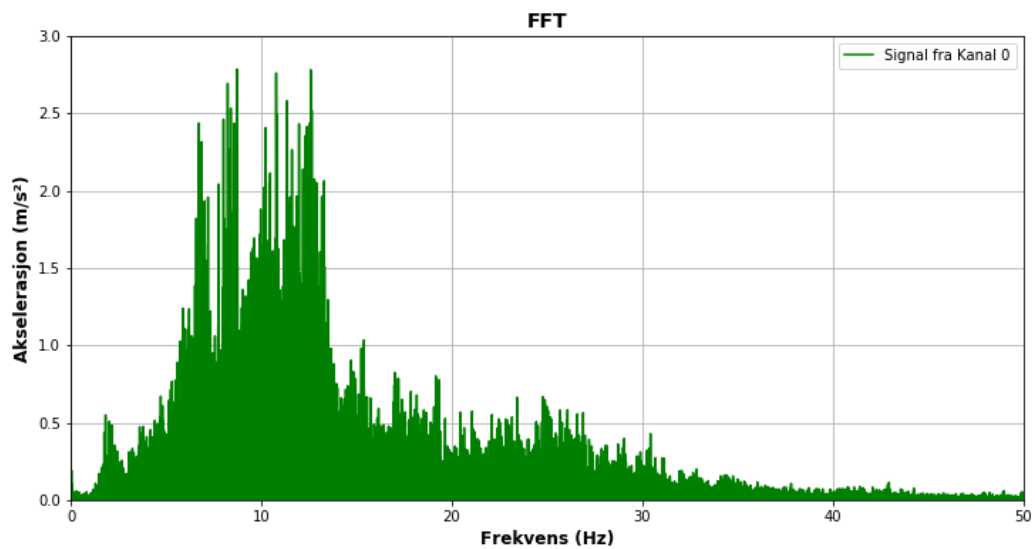


Figur 52: Akselerasjon fra tidsrom med mye aktivitet – Kl. 14:30 – 15:00 (Python).



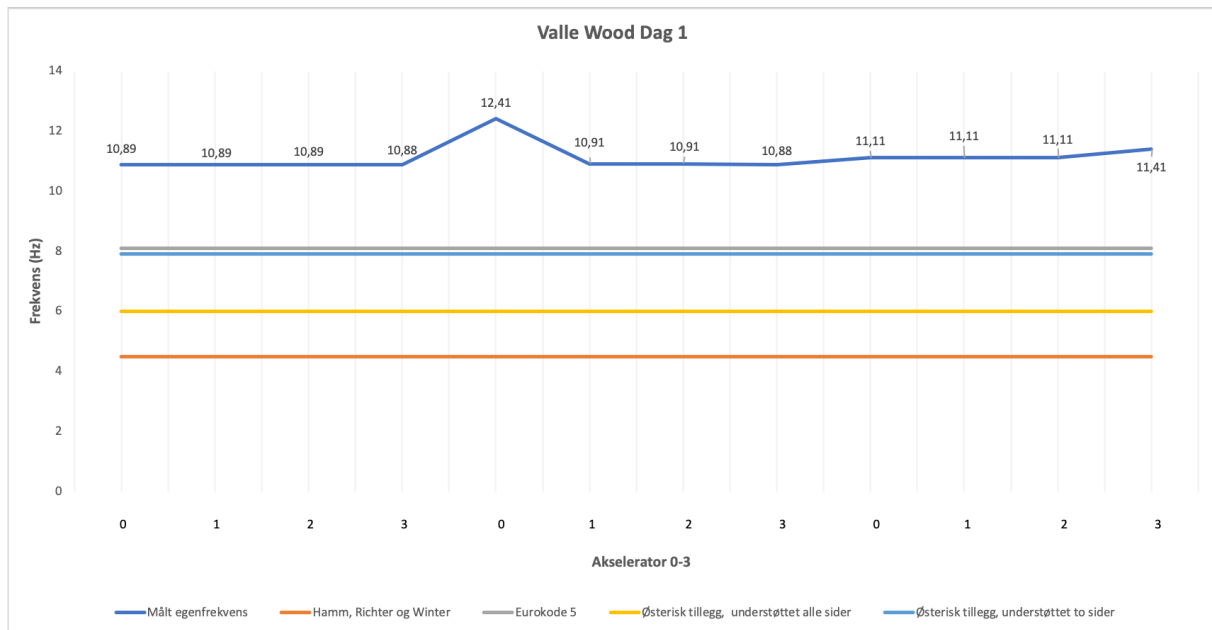


Figur 53: «Root mean square»-akselerasjon for tidsrom med mye aktivitet – Kl. 14:30 – 15:00 (Python).

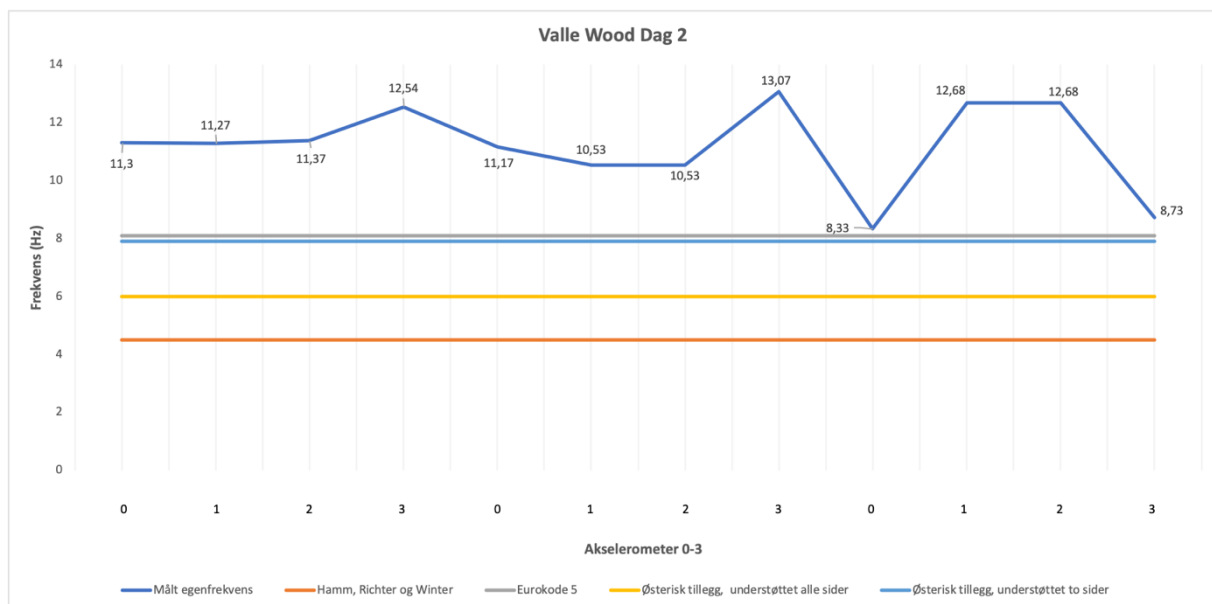


Figur 54: FFT-analyse av tidsrom med mye aktivitet – Kl. 14:30 – 14:35 (Python).

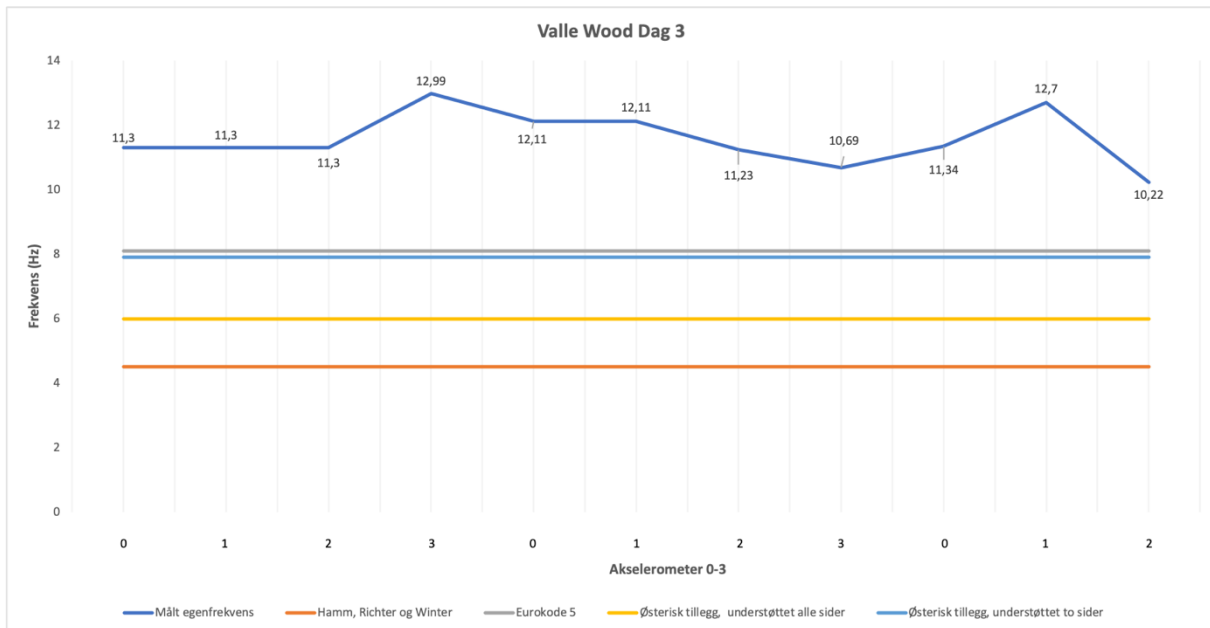
## 4.2.2 Massivtredekkets egenfrekvenser



Figur 55: Innhentede egenfrekvenser fra dag 1 opp mot ulike krav.



Figur 56: Innhentede egenfrekvenser fra dag 2 opp mot ulike krav.



Figur 57: Innhentede egenfrekvenser fra dag 3 opp mot ulike krav.

### 4.2.3 Sammenfatning av data fra VW1

Tabell 10: Temperatur i tilknytning massivtredekket, verdier er oppgitt i grader celsius (Drift Valle Wood).

	Etasje over	Etasje under
Temperatur	23	23

Tabell 11: Målt fuktprosent ved bruk av biltemas fuktmåler, alle verdier oppgitt i %.

	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3
Fuktprosent	13,5	16,3	15,3

Tabell 12: Målte akselerasjoner på Valle Wood 1, alle verdier oppgitt i  $m/s^2$ .

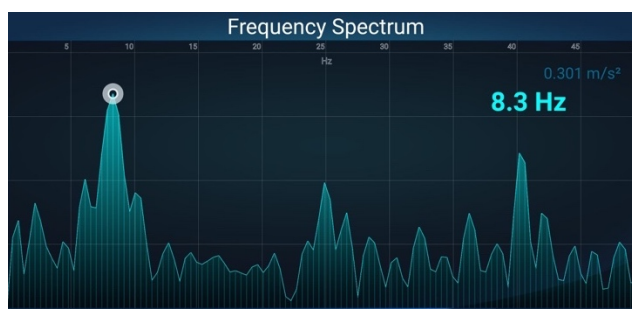
	Dag 1	Dag 2	Dag 3
Min.	0,03	0,033	0,032
Maks.	0,087	0,075	0,075

Tabell 13: Målte rms-akselerasjoner på Valle Wood 1, alle verdier oppgitt i  $m/s^2$ .

	Dag 1	Dag 2	Dag 3
Min.	0,0099	0,01	0,01
Maks.	0,033	0,024	0,022

Tabell 14: Egenfrekvenser funnet ved FFT (Fast Fourier Transformation) og Peak Picking-Method på Valle Wood 1, alle verdier er oppgitt i Hz.

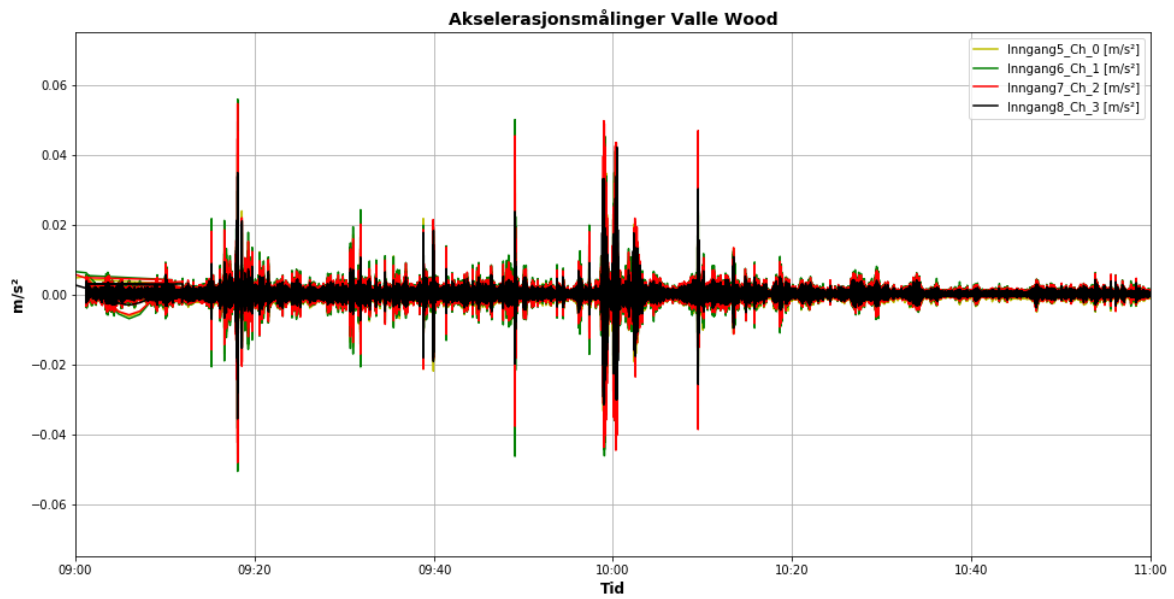
	Dag 1	Dag 2	Dag 3
Min.	10,88	8,33	10,22
Maks.	12,41	12,68	12,99



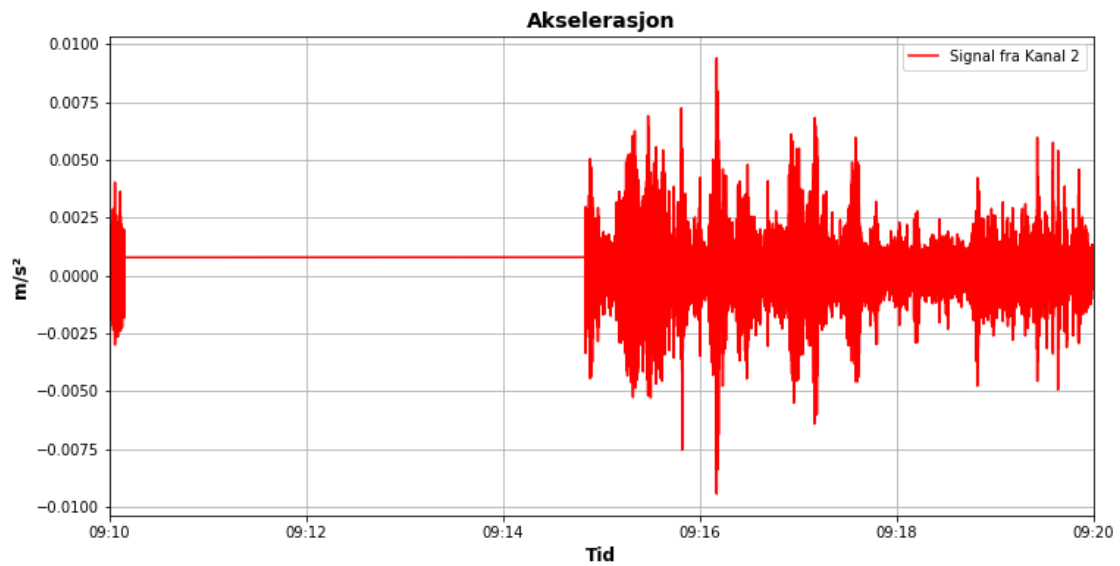
Figur 58: Skjermdump av en undersøkelse på Valle Wood 1 med MyFrequency App (Privat).

## 4.3 Valle Wood 2

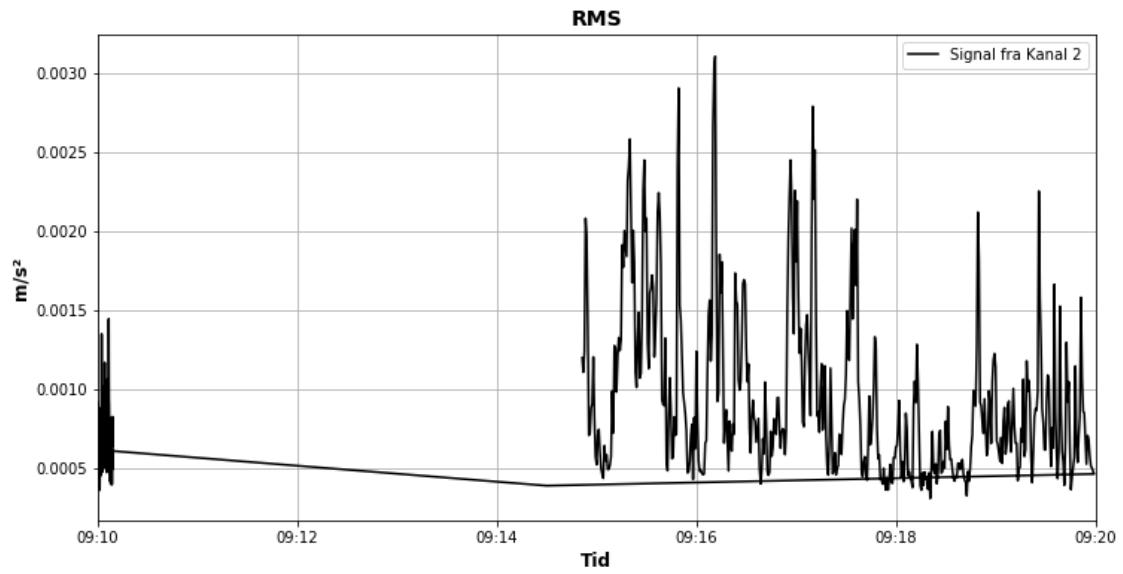
### 4.3.1 Utvalgt data behandlet i perioden



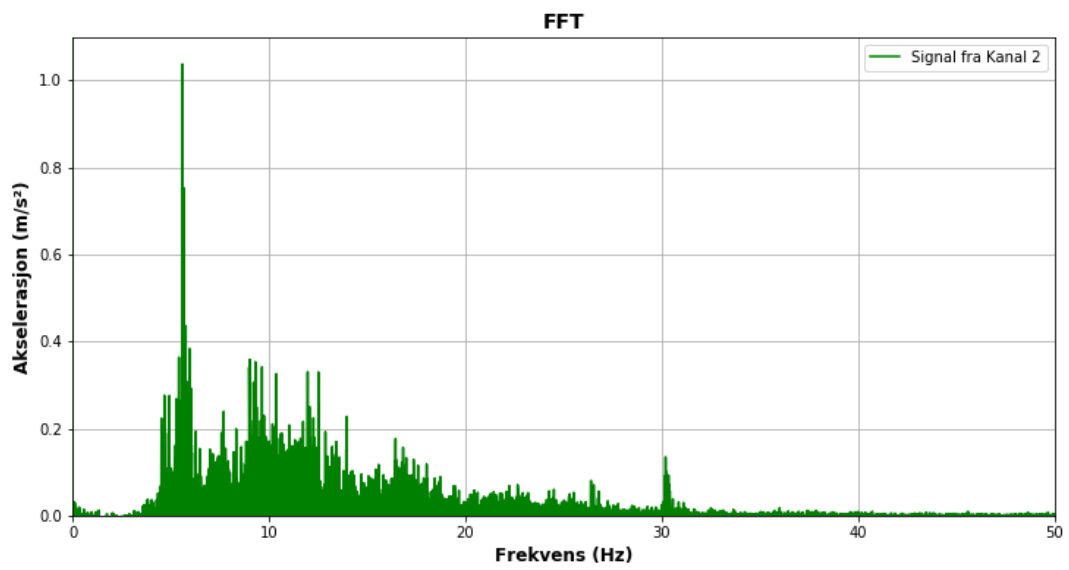
Figur 59: Innsamlet akselerasjon fra samtlige fire sensorer – Dag 1 (Python).



Figur 60: Akselerasjon fra tidsrom med mye aktivitet – Kl. 09:10 – 09:20 (Python).

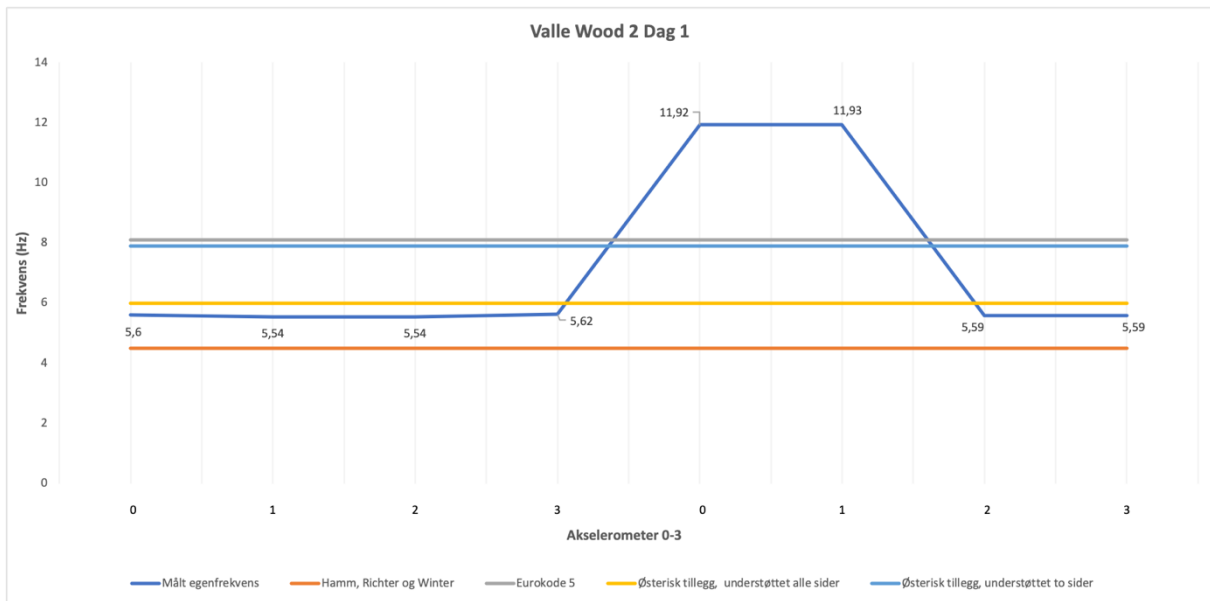


Figur 61: «Root mean square»-akselerasjon for tidsrom med mye aktivitet – Kl. 09:10 – 09:20 (Python).



Figur 62: FFT-analyse av tidsrom med mye aktivitet – Kl. 09:16 – 09:18 (Python).

### 4.3.2 Massivtredekkets egenfrekvenser



Figur 63: Innhentede egenfrekvenser fra dag 1 opp mot ulike krav.

### 4.3.3 Sammenfatning av data fra VW2

Tabell 15: Temperatur i tilknytning massivtredekket, verdier er oppgitt i grader celsius (se Figur X).

	Etasje over	Etasje under
Temperatur	23	23

Tabell 16: Målt fuktprosent ved bruk av biltemas fuktmåler, alle verdier oppgitt i %.

	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3
Fuktprosent	15,2	15,5	16,1

Tabell 17: Målte akselerasjoner på Valle Wood 2, alle verdier oppgitt i m/s<sup>2</sup>.

	Dag 1
Min.	0,005
Maks.	0,011

Tabell 18: Målte rms-akselerasjoner på Valle Wood 2, alle verdier oppgitt i m/s<sup>2</sup>.

	Dag 1
Min.	0,002
Maks.	0,0035

Tabell 19: Egenfrekvenser funnet ved FFT (Fast Fourier Transformation) og Peak Picking-Method på Valle Wood 2, alle verdier er oppgitt i Hz.

	Dag 1
Min.	5,54
Maks.	11,93

Tabell 20: Egenfrekvenser funnet ved MyFrequency App, alle verdier er oppgitt i Hz.

	Måling 1	Måling 2	Måling 3
Frekvens	8,33	4,93	5,57



## 5 Diskusjon

I dette kapittelet diskuteres resultatene presentert i kapittel 4 og metodene fra kapittel 3.

### 5.1 Forberedelser

#### 5.1.1 Akselerasjonstester

Som vist i Kapittel 3.1 Laborrietester, er det mye utstyr som skal kobles opp og kalibreres. Metoden for opp- og nedkobling var effektiv og oversiktlig, noe som gjorde undersøkelsene ute ved prosjektene mindre stressende. Ved disse forsøkene kom det også fram at festemidlene ikke ville påføre særlig skade under montering og dermed være til estetisk utfordring i etterkant. Denne perioden var strengt nødvendig for å få tillatelser til å gjøre undersøkelser, da driftsledere ville ha bekreftelse på nøyaktig hva som skulle til for å samle inn dataene.

#### 5.1.2 Databehandling

Med bakgrunn i live FFT-målinger i CatmanEasy gir scriptet for behandling av datasettene i denne oppgaven et nøyaktig resultat. Det kommer av Kapittel 3 Metode og Kapittel 4 Resultater frem at egenfrekvensene kartlegges og dokumenteres på en god og nøyaktig måte. Programvaren CatmanEasy er lett forståelig, har enkle bruksanvisninger og det er god videohjelp tilgjengelig på internett. CatmanEasy kobles sammen med øvrig måleutstyr nevnt i Kapittel 3 Metode på en logisk og oversiktlig måte. Under sensorinnstillinger og kalibrering av akselerometrene (3.1.2) er det mulig å kalibrere dit hen at output er hastighet i stedet for akselerasjon. Dersom tiden hadde strukket til, ville det vært naturlig å logge både akselerasjon og hastighet. Ved hastighetsdata ville det vært mulig og kontrollert kombinasjonskravet fra forslaget i ny EC5 (Tabell 4) dersom massivtredekket ble kategorisert som høyfrekvent.

The Jupyter Notebook oppleves som et mer enn godt nok verktøy til denne type databehandling. Ettersom studieløpet ved NMBU tar for seg både Python og MatLab vil nok begge dataspråk gjøre jobben på en tilstrekkelig måte, men Python og Jupyter ble valgt ettersom dette var det vi hadde sist på studiet. Et mer effektivt script enn det som er presentert i Vedlegg A er å anbefale ettersom dette vil kunne gjøre prosessen lettere i form av raskere databehandling.

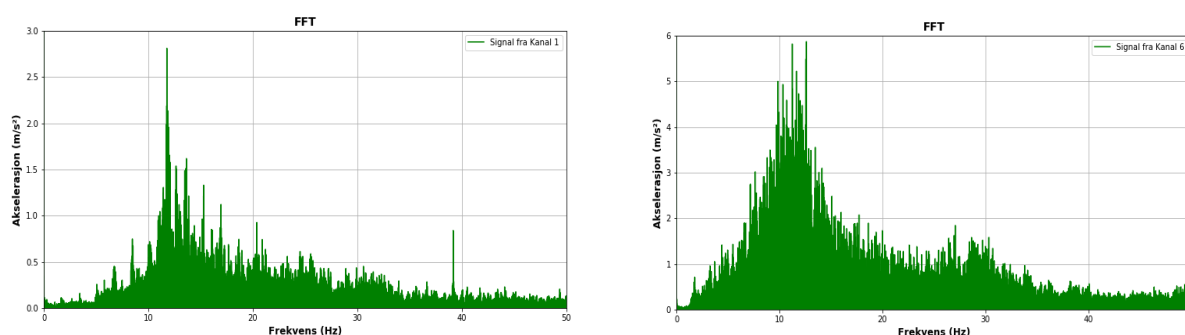
## 5.2 Undersøkelse på Kongsvinger ungdomsskole

### 5.2.1 Utførelse

Metoden beskrevet i kapittel 3.2.1 redegjør for en effektiv innhenting av data, tross et sett med feilmålinger. På grunn av den gode dialogen med driftsledere ble det mulig å rette opp i feilmålingene og gjøre en ytterligere undersøkelse. Det er uvisst hva som forårsaket de forkastede datasettene, men en antakelse er strømbrudd, uforutsette oppdateringer på den benyttede datamaskinen eller at akselerometrene rett og slett ikke var festet godt nok.

Det oppleves som en god og trygg løsning å legge alt av utstyr over himlingsplatene. På den måten ligger alt utilgjengelig for skoleelever og andre nysgjerrige. Figur 29 viser videre fester i gipsplater. Hvorvidt det har hatt en innvirkning på resultatene eller ikke er vanskelig å si, men at festeskivene ikke sitter like godt i gips som i tre, er å anta. Gipsplater gjør det videre vanskelig å se hvor på massivtredekket akselerometrene festes.

Av Figur 45 ser man at laveste egenfrekvens er på 10,96 Hz og kommer fra akselerometer 1, som er midt mellom opplager og senter av dekket. Dette er gir mening ettersom akselerometrene nærmere midten av gulvet vil ha en større amplitude og dermed også tydeligere forskjell og mindre feilmålinger. Dette stemmer godt med Figur 64 (kanal 6, nærmest opplager og kanal 1, mellom opplager og senter). Begge analysene er gjort over samme tidsrom, men viser en signifikant forskjell. Antakelsen om at laveste egenfrekvens måles mot midten av dekket, underbygges.



Figur 64: Sammenligning av datasett fra kanal 1 til venstre og kanal 6 til høyre.

### 5.2.2 Statistisk sikkerhet

Resultatene presentert i kapittel 4.1, Tabell 9 og Vedlegg B viser med høy sikkerhet at det undersøkte massivtredekket bestemmes til å ha en egenfrekvens på 10,96 Hz. Dette begrunnes med et omfattende antall målinger på samme konstruksjon. Som Tabell 21 viser, avviker denne egenfrekvensen med 10,7 % fra median, tilsvarende 1,3 Hz.

Tabell 21: Sammenligning av laveste målte egenfrekvens og median ved KUSK.

Laveste målte egenfrekvens [Hz]	Median [Hz]	Avvik fra median [%]
10,96	12,27	10,7

Ettersom undersøkt etasjeskiller er et hulromsdekke foreligger det en viss usikkerhet rundt hvor overførbart dette er til de andre dekkene undersøkt i oppgaven. Undersøkelsene gir, tross lite overførbare datasett, gode analyser av hulromsdekket på Kongsvinger.

### 5.2.3 Kontroll

Analysene av massivtredekket ved Kongsvinger ungdomsskole viser at konstruksjonen kategoriseres som høyfrekvent ( $10,96 \text{ Hz} > 8 \text{ Hz}$ ). Det betyr at ifølge krav fra forslag til ny EC5 burde en kontroll av egenfrekvens og hastighet gjennomføres for å fastslå hvorvidt massivtredekket er tilfredsstillende eller ikke. Da det utelukkende er samlet inn akselerasjon, gjennomføres det kun en kontroll mot gangfrekvens for ikke å være i faresonen for resonans. Verdier for gangfrekvens er hentet fra antakelser gjort av Smith (2009).

$$10,96 \text{ Hz} > 4 \times \text{gangfrekvens [Hz]}$$

$$10,96 \text{ Hz} > 4 \times (1,8 - 2,2)$$

$$10,96 \text{ Hz} > 7,2 - 8,8 \text{ Hz}$$

OK

### 5.2.4 Klimadata

Gipsplatene på undersiden av massivtredekket på Kongsvinger ungdomsskole gjorde at fuktinnholdet ikke lot seg måle. Vi ser av Tabell 6 at etasjen over den undersøkte massivtredekket er  $1^\circ\text{C}$  kaldere enn etasjen under. Det betyr at luften vil tilstrebe å stige opp gjennom dekket. Foruten flere analyser ved andre lokasjoner og andre temperaturer, er det ikke mulig å si hvordan dekket oppfører seg i forhold til temperatur. En så liten temperaturforskjell kan uansett antas å ha minimal påvirkning på resultatene.

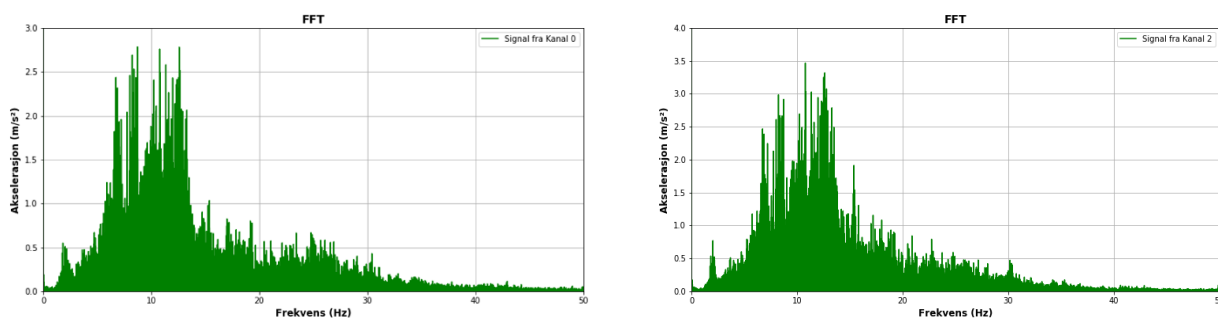
## 5.3 Undersøkelse på Valle Wood 1

### 5.3.1 Utførelse

Metoden beskrevet i kapittel 3.2.2 redegjør for en effektiv innhenting av data fra massivtredekket navngitt som Valle Wood 1. Den samme problematikken med feilmålinger som på Kongsvinger forekom dessverre også her, men hva som forårsaket de forkastede datasettene er fortsatt uklart.

Figur 35 viser festing av akselerometrene direkte i treverket. Hvorvidt det har hatt en innvirkning på resultatene eller ikke er vanskelig å si, men at festeskiene sitter bedre i tre enn i gips, er å anta. Synlig treverk gjorde det også lettere å få samsvar med ønsket plassering av akselerometre (Figur 36) og faktisk plassering.

Av Figur 56 kommer det frem at laveste egenfrekvens er 8,33 Hz og kommer fra akselerometer 0. Dette er sannsynligvis en feil ettersom akselerometer 0 er nærmest opplager og dermed har en mindre amplitude enn midt på gulvet. Akselerometrene midt på gulvet vil ha en større amplitude og dermed også tydeligere forskjell og mindre feilmålinger. Dette stemmer godt med Figur 65 (kanal 0, nærmest opplager og kanal 2, en av to midt mellom opplagrene). Begge analysene er gjort over samme tidsrom, men viser en signifikant forskjell. Feilen ligger nok i avskriften, ikke analysen, så antakelsen om at den laveste egenfrekvensen måles mot midten av gulvet, underbygges.



Figur 65: Sammenligning av datasett fra kanal 0 til venstre og kanal 2 til høyre.

En videre kontroll er gjort ved at MyFrequency App er plassert midt mellom opplagrene. Som vist i Figur 58 måles egenfrekvensen til 8,3 Hz ved bruk av applikasjonen. Dette forsterker ytterligere antakelser om at midten av dekket gir lavest egenfrekvens. Nyttigheten til MyFrequency App forsterkes også ettersom frekvensen er tilnærmet lik metoden med profesjonelle akselerometre.

### 5.3.2 Statistisk sikkerhet

Resultatene presentert i kapittel 4.2, Tabell 14 og Vedlegg B viser med høy sikkerhet at det undersøkte massivtredekket bestemmes til å ha en egenfrekvens på 8,33 Hz. Dette begrunnes med et omfattende antall målinger på samme konstruksjon. Som Tabell 22 viser, avviker denne egenfrekvensen med 25,5 % fra median, tilsvarende 2,8 Hz.

Tabell 22: Sammenligning av laveste målte egenfrekvens og median ved VW1.

Laveste målte egenfrekvens [Hz]	Median [Hz]	Avvik fra median [%]
8,33	11,18	25,5

### 5.3.3 Kontroll

Analysene av massivtredekket ved Valle Wood 1 viser at konstruksjonen kategoriseres som høyfrekvent (8,33 Hz > 8 Hz). Det betyr at ifølge krav fra forslag til ny EC5 burde en kontroll av egenfrekvens og hastighet gjennomføres for å fastslå hvorvidt massivtredekket er tilfredsstillende eller ikke. Da det kun er samlet inn akselerasjon gjennomføres det en kontroll opp mot gangfrekvens på samme måte som i kapittel 5.2.3.

$$8,33 \text{ Hz} > 4 \times \text{gangfrekvens [Hz]}$$

$$8,33 \text{ Hz} > 4 \times (1,8 - 2,2)$$

$$8,33 \text{ Hz} > 7,2 - 8,8 \text{ Hz}$$

OK

### 5.3.4 Klimadata

Tabell 11 viser målt fuktprosent i massivtredekket. Dersom feilmarginen fra produsenten av måleverktøyet (kapittel 2.7.5) legges til, gir dette et fuktinnhold på 11,5 % - 15,5 %. Sammenlignet med kravet fra Treteknisk (2006b), som sier at massivtrelementer skal ha en fuktprosent på 8 – 14 før produksjon, kan vi anta at konstruksjonen har et tilfredsstillende fuktinnhold i forhold til dimensjonsstabilitet (2.3.6). Det er videre vanskelig å si noe om påvirkningen fuktprosenten har uten å gjøre flere undersøkelser.

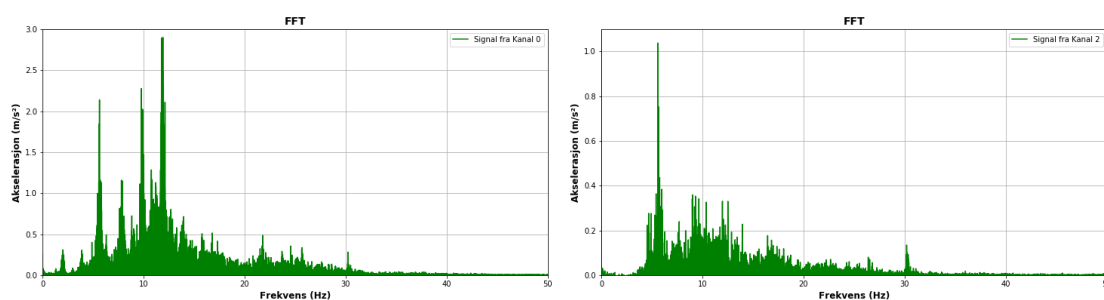
## 5.4 Undersøkelse på Valle Wood 2

### 5.4.1 Utførelse

Metoden beskrevet i kapittel 3.2.3 redegjør for en effektiv innhenting av data fra massivtredekket navngitt som Valle Wood 2. Samme problematikk med feilmålinger forekom også her, men av flere årsaker er det benyttet en annen type minnepenn til lagring av data. Det er videre mye lavere aktivitetsnivå på grunn av Covid-19. Begge faktorer som kan spille en rolle ved innsamling av datasett.

Figur 49 viser at akselerometrene er festet direkte i treverket. Synlig treverk gjorde det lettere å få samsvar med ønsket plassering av akselerometre (Figur 40) og faktisk plassering. Hvorvidt dette har en innvirkning på resultatene er vanskelig å si, men ettersom festemiddelet oppleves å sitte bedre enn i eksempelvis gips, gjør det at resultatet får mer troverdighet.

Av Figur 63 kommer det frem at laveste egenfrekvens er 5,54 Hz og finnes i akselerometer 1 og 2. Dette gir mening ettersom akselerometrene nærmere midten av gulvet vil ha en større amplitude og dermed også en tydeligere forskjell og mindre feilmålinger. Dette stemmer godt med Figur 66 (kanal 0, nærmest opplager og kanal 2, en av to midt mellom opplagrene). Begge analysene er gjort over samme tidsrom, men viser en signifikant forskjell. Antakelsen om at laveste egenfrekvens måles mot midten av dekket, underbygges ytterligere.



Figur 66: Sammenligning av datasett fra kanal 0 til venstre og kanal 2 til høyre.

### 5.4.2 Statistisk sikkerhet

Resultatene presentert i kapittel 4.3, Tabell 14 og Vedlegg B viser med høy sikkerhet at det undersøkte massivtredekket bestemmes til å ha en egenfrekvens på 5,54 Hz. Dette begrunnes med et omfattende antall målinger på samme konstruksjon. Som Tabell 23 viser avviker denne egenfrekvensen med 13,0 % fra median, tilsvarende 0,8 Hz.

Tabell 23: Sammenligning av laveste målte egenfrekvens og median ved VW2.

Laveste målte egenfrekvens [Hz]	Median [Hz]	Avvik fra median [%]
5,54	6,37	13,03

### 5.4.3 Kontroll

Analysene ved Valle Wood 2 viser at massivtredekket kategoriseres som lavfrekvent (5,54 Hz < 8 Hz). Det betyr at ifølge krav fra forslag til ny EC5 skal en kontroll av egenfrekvens og akselerasjon gjennomføres for å fastslå hvorvidt massivtredekket er tilfredsstillende eller ikke (Tabell 4). Ved kontroll av gangfrekvens kommer det frem at konstruksjonen ikke er tilfredsstillende, men i kombinasjon med akselerasjon er gulvet innenfor kravet.

$$5,54 \text{ Hz} > 4 \times \text{gangfrekvens [Hz]}$$

$$5,54 \text{ Hz} > 4 \times (1,8 - 2,2)$$

$$5,54 \text{ Hz} > 7,2 - 8,8 \text{ Hz}$$

IKKE OK

$$0,0035 \text{ [m/s}^2] \leq 0,005 \times R \text{ (Level II)}$$

$$0,0035 \text{ [m/s}^2] \leq 0,04$$

OK

### 5.4.4 Klimadata

Tabell 15 viser målt fuktprosent i massivtredekket. Dersom vi legger til feilmarginen fra produsenten av måleverktøyet (2.7.5) gir dette et mulig fuktinnhold på 13,2 % - 17,2 %. Sammenlignet med kravet fra Treteknisk (2006b), som sier at massivtreelementer skal ha en fuktprosent på 8 – 14 før produksjon, kan vi anta at konstruksjonen har et tilfredsstillende fuktinnhold i forhold til dimensjonsstabilitet (2.3.6). Det er videre vanskelig å si noe om klimatisk påvirkning uten å gjøre flere undersøkelser.

## 5.5 Generelt

### 5.5.1 Aktivitetsnivå

Variierende impulslaster medfører ingen ulemper av betydning, men et omfattende antall målinger vil være nødvendig for å avdekke den laveste egenfrekvensen. Ettersom egenfrekvensene samlet i denne oppgaven varierer er det rimelig å anta at et konsekvent aktivitetsnivå ikke er nødvendig om antallet målinger økes betraktelig. Nøyaktig hvor mange målinger som må til er det vanskelig å si noe om, men at man bør avdekke all aktivitet ved å la målingene gå over en uke er en god antakelse. Det er rimelig å forvente at aktivitetsnivået ikke varierer stort fra uke til uke.

### 5.5.2 Dokumentasjonsmetode

Undersøkelsene er nøyaktige og prosessen oppleves som oversiktlig. Tross repeterende feilmålinger er dette enkelt å oppdage og gjøre noe med. Databehandlingen i The Jupyter Notebook er i tillegg på et nivå som gjør scriptet og de underliggende funksjonene forståelige. Videre bearbeidelse i Excel gjør avslutningsvis at presentasjonen av resultatene fremstår på en måte som enkelt lar seg forstå av målgruppen.

### 5.5.3 Oppsummering av resultater

Massivtredekkene ved KUSK og VW2 er innenfor samtlige krav fra standarder vurdert i denne oppgaven. Konstruksjonen ved VW1 anses kun som tilfredsstillende etter kontroll av akselerasjon (Tabell 24). Dette kan skyldes nyere kunnskap om opplevd vibrasjon.

Tabell 24: Oppsummering av resultater mot krav fra Kapittel 2.6 Vibrasjonsberegning.

	Krav	KUSK	VW1	VW2
Laveste målte egenfrekvens	-	10,96 Hz	8,33 Hz	5,54 Hz
Eurokode 5	$f > 8 \text{ Hz}$	OK	OK	IKKE OK
Hamm, Richter og Winter	$f > 4,5 \text{ Hz}$	OK	OK	OK
Østerisk tillegg, 2 sider	$f > 8\text{Hz}$	OK	OK	IKKE OK
Østerisk tillegg, 4 sider	$f > 6\text{Hz}$	OK	OK	IKKE OK
Forslag EC5, kontroll, $a_{\text{rms}}$	$a_{\text{rms}} < 0,005 \text{ R}$	-	-	OK
<b>Endelig vurdering</b>	-	<b>OK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>



## 6 Konklusjon

Hovedmålet med denne oppgaven var å vurdere om undersøkelser av vibrasjonsegenskaper i massivtredekker ved bruk av akselerometre, kunne være en god metode for kartlegging og dokumentering av egenfrekvenser hos bygg i drift.

Arbeidet har ført til følgende konklusjon:

Bruken av akselerometre for innsamling og videre fremstilling av egenfrekvenser hos massivtredekker ved bygg i drift, vurderes til å være god. Dette begrunnes med en nøyaktig og meget oversiktlig prosess for oppkobling, innsamling, nedkobling, bearbeidelse og presentasjon av data. I programmet CatmanEasy settes innstillingene til å gjøre ønsket måling og resultatene lar seg enkelt lagre i foretrukket format. Dernest er mulighetene mange, men bruken av The Jupyter Notebook og Excel vurderes som gode verktøy til bearbeidelse og endelig presentasjon av resultater.

Arbeidet med delmålene har ført til følgende konklusjoner:

- a) Redegjøre for hvorvidt et konsekvent aktivitetsnivå er nødvendig for å måle egenfrekvens i eksisterende massivtredekker.

Undersøkelsene viser at det ikke er nødvendig med et konsekvent aktivitetsnivå. Dette begrunnes med at ved et varierende aktivitetsnivå har det blitt samlet inn laveste egenfrekvens med et maksavvik fra median på 25,5 % hos VW1 (Tabell 22). Ved varierende impulslaster får man altså et bredere spekter av egenfrekvenser, men med et tilstrekkelig antall målinger vil man kunne bestemme massivtredekkets laveste egenfrekvens med sikkerhet.

- b) Gjøre en vurdering av om MyFrequency App er nøyaktig nok til å måle egenfrekvens i eksisterende massivtredekker.

MyFrequency App vurderes til å være et godt verktøy for å måle eksisterende massivtredekkers egenfrekvens. Undersøkelser ved VW1 viser en høy nøyaktighet sammenlignet med målinger i Tabell 14. Metoden er rask, effektiv og indikerer å gi tilsvarende frekvenser som profesjonelle akselerometre.

- c) Vurdere om akselerometrets plassering på massivtredekket har betydning for innsamling av egenfrekvens.

Akselerometrets plassering på dekket vurderes til å være avgjørende for hvilken egenfrekvens som samles inn. Dette begrunnes med at ved KUSK og VW2 er det en klar tendens til at amplituden midt på dekket er større enn ved opplagrene, og dermed gir den laveste egenfrekvensen.

- d) Vurdere om massivtredekket har tilfredsstillende vibrasjonsegenskaper.

Samtlige massivtredekker undersøkt i denne oppgaven vurderes til å ha tilfredsstillende vibrasjonsegenskaper. Tabell 24 viser at det lavfrekvente massivtredekket ved VW2 er innenfor kravet stilt i forslag til nytt kapittel i EC5, til tross for at det altså er innenfor fire ganger gangfrekvens.

## 7 Vurdering av feilkilder

Det er i dette kapittelet oppsummert hvilke feilkilder og utfordringer som har hatt utslag på resultatet presentert i oppgaven.

### 7.1 Aktivitetsnivå

Ettersom det i denne oppgaven ikke er tatt hensyn til brukerne av massivtredekket, har det vært vanskelig, om ikke umulig å kontrollere aktivitetsnivået.

### 7.2 Måleutstyr

Det ble kun benyttet syv sensorer ettersom en av portene på forsterkeren var ute av drift. En «switch» eller «splitter» skulle brukes til å seriekoble to hovedkort, men dette fikk vi dessverre ikke til. Seriekoblingen skulle føre til bruk av ni sensorer som ville gitt flere punkter for målinger, og dermed også et mer nøyaktig resultat. Antallet sensorer ble pga. tidsnød nedjustert til fire, så en økning til ni anses som ugunstig for oppgaven.

### 7.3 Undersøkelser

Undersøkelsene er utført med samme metode både på KUSK og på Valle Wood. På tross av dette har det forekommet feilmålinger ved sistnevnte. Alt fra at samtlige verdier har blitt negative, til at målingene har blitt avbrutt av uante årsaker. Dette kan skyldes lokale strømbrudd eller at bygget har stengt ned etter arbeidstid og dermed kuttet strømtilførselen.

### 7.4 Databehandling

Som beskrevet i Vedlegg A er scriptet benyttet til databehandlingen i denne oppgaven formet etter flere kilder. Alt av innebygde funksjoner i Python og kode hentet fra andre kilder antas korrekt og er ikke kontrollert grundigere. På tross av en live-måling før hver undersøkelse, foreligger det en viss usikkerhet.

## 8 Videre arbeid

Under er det presentert punktvis anbefalinger for å videreutvikle metoden benyttet i denne oppgaven. Hensikten er å forbedre resultatene og samtidig øke forståelsen for vibrasjonsegenskaper i massivtredekker.

- 1) Arbeidet med denne oppgaven har ikke ført til det statistiske grunnlaget vi håpte å oppnå. Et mer omfattende arbeid, hvor man gjør flere undersøkelser av ulike massivtredekker vil gi et bedre datasett.
- 2) Det anbefales å gjennomføre en omfattende brukerundersøkelse ved målte massivtredekker. Etersom følelser og opplevelser er subjektivt, ville det vært interessant å høre med brukerne hvordan de selv opplever det å gå på gulvet. Disse resultatene kan så sammenlignes med bearbejdede data.
- 3) Etersom undersøkelsene ved KUSK og VW1 viser at begge massivtredekkene er høyfrekvente, ville det vært hensiktsmessig å beregne integralet av innsamlet akselerasjon. På den måten vil man få kontrollert kombinasjonen av hastighet og egenfrekvens, slik som foreslått i EC5.
- 4) Akustikkutfordringer er en gjenganger ved konstruksjoner i massivtre. Ansatte besøkt med denne oppgaven forteller om ugunstig lydgjennomgang fra etasjen over. En videreutvikling av oppgaven kan være å se om det er noen sammenheng mellom vibrasjonsegenskaper og akustikkutfordringer.
- 5) Ved å undersøke flere massivtredekker under ulike temperaturforhold, kan det være mulig å avdekke hvorvidt de påvirkes nevneverdig av temperatur. Videre undersøkelser av tilsvarende gulv med ulike klimatiske forhold kunne vært interessant å se på.

## Referanser

- APPtodate. (2020). MyFrequencyApp. Tilgjengelig fra: <https://myfrequency.jimdofree.com/>. Lest 12/02-2020.
- AZoSensors. (2015). Applications and the Working Principle of Piezoelectric Accelerometers. Tilgjengelig fra: <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=309>. Lest 20/02-2020.
- Biltema. (2020). Fuktmåler Art.nr. 87-258. Tilgjengelig fra: [https://www.biltema.no/BiltemaDocuments/Manuals/87-258\\_man.pdf](https://www.biltema.no/BiltemaDocuments/Manuals/87-258_man.pdf). Lest 10/04-2020.
- Bodig, J. & Jayne, B. A. (1993). *Mechanics of Wood and Wood Composites* (2. utg.). Krieger Publishing Company.
- Brekkhuis, A. (2019). *Byggeindustrien*.
- Cardona-Alzate, C. A., Serna-Loaiza, S. & Ortiz-Sanchez, M. (2020). Sustainable Biorefineries: What was Learned from the Design, Analysis and Implementation. *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems-Jsdewes*, 8 (1): 88-117. doi: 10.13044/j.sdwes.d7.0268.
- Chen, J., Xu, R. & Zhang, M. (2014). Acceleration response spectrum for predicting floor vibration due to occupant walking. *Journal of Sound and Vibration*, 333 (15): 3564-3579. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.03.023>.
- Dahl, K. B. (2009). Mechanical properties of clear wood from Norway spruce.
- DiCola, T. (2018). FFT: Fun with Fourier Transforms.
- Endaq. (2016). MATLAB vs Python: Speed Test for Vibration Analysis. Tilgjengelig fra: [https://blog.endaq.com/matlab-vs-python-speed-test-for-vibration-analysis-free-download?\\_\\_hstc=9408618.766aef6ea0371171cdb20d4a543f5371.1581454001162.1581930467070.1581941299084.4&\\_\\_hssc=9408618.2.1581941299084&\\_\\_hsfp=2977919529](https://blog.endaq.com/matlab-vs-python-speed-test-for-vibration-analysis-free-download?__hstc=9408618.766aef6ea0371171cdb20d4a543f5371.1581454001162.1581930467070.1581941299084.4&__hssc=9408618.2.1581941299084&__hsfp=2977919529). Lest 22/04-2020.
- Enríquez-Zárate, J., Valencia-Palomo, G., López-Estrada, F. R., Silva-Navarro, G. & Hoyo-Montaño, J. A. (2019). Efficient predictive vibration control of a building-like structure. doi: <https://doi.org/10.1002/asjc.2015>.
- First drafts for a revised version of EN 1995-1-1, Eurocode 5. (2018). I: CEN., P. S. T. S. D. E.-.-s. V. s. T. (red.).
- Gagnon, S. & Pirvu, C. (2011). *CLT Handbook*. FPInnovations.
- Gallo, K. (2018). Complete Python Pandas Data Science Tutorial! (Reading CSV/Excel files, Sorting, Filtering, Groupby). Tilgjengelig fra: <https://www.youtube.com/watch?v=vmEHCJofslg&t=2819s>. Sett 08/02-2020.

- Goncalves, M. S., Pavic, A. & Pimentel, R. L. (2019). Vibration serviceability assessment of office floors for realistic walking and floor layout scenarios. doi: 10.1177/1369433219888753.
- Hamm, P., Richter, A. & Winter, S. (2010). Floor vibrations – new results
- HBM. (2020). DAQ Software. Tilgjengelig fra: <https://www.hbm.com/en/2290/catman-data-acquisition-software/>. Lest 14/03-2020.
- Homb, A. (2007). Kriterier for opplevde vibrasjoner i etasjeskillere. Hentet fra: [https://www.sintefbok.no/book/index/94/kriterier\\_for\\_opplevde\\_vibrasjoner\\_i\\_etasjeskillere](https://www.sintefbok.no/book/index/94/kriterier_for_opplevde_vibrasjoner_i_etasjeskillere). 25. Hentet 10/01-2020.
- Homb, A. (2008). Vibrasjonsegenskaper til dekker av massivtre. (24). Hentet 10/01-2020.
- INTER-Paper 51-20-2: Development of a floor vibration design method for Eurocode 5. (2018). I: CEN., C. T. S. W. S. s. (red.). Tilgjengelig fra: <https://cen.iso.org/livelihood/livelihood/open/centc250sc5wg3>.
- Ji, T. (2005). Prediction of Floor Vibration Induced by Walking Loads and Verification Using Available Measurements. *Structural Engineer*, 84 (3): 36-40.
- Jupyter. (2020). The Jupyter Notebook. Tilgjengelig fra: <https://jupyter.org/>.
- Kucera, B. (1998). TREETS OPPBYGNING OG VEDANATOMI. Ås: Norsk Institutt for Skogforskning.
- Laboratory, F. P. (2010). Wood Handbook - Wood as an Engineering Material. Madison, WI: U.S: United States Department of Agriculture Forest Service. doi: doi:<https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-190>.
- Lukaszewska, E. (2009). Development of Prefabricated Timber-Concrete Composite Floors. Luleå.
- Mestek, P., Kreuzinger, H. & Winter, S. (2008). Design of Cross Laminated Timber (CLT). Munich, Germany.
- Nasjonalt Tillegg Eurokode 5 for Østerrike. (2014). I: National specifications, n. c. a. n. s. c. Ö. E.-A. s. (red.).
- Oslo. (2016). Byggesak Innspurten 11-13. Tilgjengelig fra: <https://innsyn.pbe.oslo.kommune.no/saksinnsyn/casedet.asp?caseno=201609364&wfl=T&Dateparam=03/30/2020&sti=>. Lest 10/04-2020.
- Piezotronics, P. (2020). MODEL: 393B12. Tilgjengelig fra: <https://www.pcb.com/products?m=393b12>. Lest 14/03-2020.
- Sathre, R. & O'Connor, J. (2010). Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution.

Sedlacek, G., Heinemeyer, C., Butz, C., Veiling, B., Waarts, P. H., Duin, F. v., Hicks, S., Devine, P. & Demarco, T. (2006). Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and public building and gymnastic halls.

Seim, H. (2016). NOTAT RIB 01.

Smith, A. L., Hicks, S. J. & Devine, P. J. (2009). Design og Floors for Vibration: A New Approach. The Steel Construction Institute. doi: 10.13140/RG.2.2.29342.95048.

StandardNorge. (2004b). Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger. NS-EN 1995-1-1:2004/NA:2010/A1:2013.

SteelConstruction.info. (2020). Floor vibrations. Tilgjengelig fra:  
[https://www.steelconstruction.info/Floor\\_vibrations](https://www.steelconstruction.info/Floor_vibrations). Lest 10/02-2020.

Treteknisk. (2006a). Hefte 1: Generelt. Bygge med Massivtreelementer. Oslo.

Treteknisk. (2006b). Hefte 3: Dimensjonering. Bygge med massivtreelementer. Oslo.

Treteknisk. (2006c). Hefte 7: Veiledning. Bygge med massivtreelementer. Oslo.

Tronstad, S. (2013). Tre og fuktighet. Treteknisk.

Woodcon. (2018). Kongsvinger Ungdomskole. Tilgjengelig fra:  
<https://www.woodcon.no/prosjekter/flerbrukshaller/kongsvinger-ungdomskole/>. Lest 25/01-2020.

Aarstad, J., Glasø, G. & Bunkholt, A. (2008). Massivtre. FOKUS på tre, s. 6.

## Vedlegg A: Python-script

Scriptet er skrevet etter inspirasjon fra flere gode kilder:

- 1) (Endaq, 2016)
- 2) (Gallo, 2018)

Eksempelscript for behandling av innsamlet data:

### Importere nødvendige bibliotek:

```
import pandas as pd
```

### Les inn csv-fil:

```
df = pd.read_table('kongsvinger_onsdag2901.csv', encoding = "latin_1", index_col=0)
```

### Redigere bort kolonne som ikke er i bruk:

```
df = df.drop('Time 1 - default sample rate [s]', axis='columns')
```

### Endre til riktige kolonne-navn:

```
df.columns = ['Inngang2_Ch_0 [m/s2]', 'Inngang3_Ch_1 [m/s2]', 'Inngang4_Ch_2 [m/s2]', 'Inngang5_Ch_3 [m/s2]', 'Inngang6_Ch_4 [m/s2]', 'Inngang7_Ch_5 [m/s2]', 'Inngang8_Ch_6 [m/s2]', 'NaN']
```

### Redigere bort kolonne som ikke er i bruk:

```
df = df.drop(['NaN'], axis='columns')
```

### Lagre endret csv-fil som nytt datasett:

```
df.to_csv('kongsvinger_onsdag2901.csv')
```

### Leser inn datasettet med "headers" og "indexes", gjør verdiene om fra string til float:

```
data = pd.read_csv("kongsvinger_onsdag2901.csv", skiprows=1, names=["Tid [s]", "Inngang2_Ch_0 [m/s2]", "Inngang3_Ch_1 [m/s2]", "Inngang4_Ch_2 [m/s2]", "Inngang5_Ch_3 [m/s2]", "Inngang6_Ch_4 [m/s2]", "Inngang7_Ch_5 [m/s2]", "Inngang8_Ch_6 [m/s2]", dayfirst=True)
data_ = data.replace('[^(Cardona-Alzate et al.)?\d*(\.\d+)?$', '', regex=True).astype(float)
data_ = data_ / 100000
```

### Rådata til csv-filer med to kolonner (per kanal):

```
Kanal_0 = data[['Tid [s]', 'Inngang2_Ch_0 [m/s2']]
```

### Lagre som mindre datasett (eksempel per time):

```
Kanal_0_new = Kanal_0[0:360000]
Kanal_0_new.to_csv('Kanal0_2901_0800-0900.csv', index=None)
```



### Plotte samtlige akselerasjoner:

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.dates as mdates
import matplotlib.cbook as cbook
plt.figure(figsize=(16,8))
plt.xlim(0,1)
plt.ylim(-0.11,0.11)
ax = plt.gca()
data_.plot(x="Tid [s]", y="Inngang2_Ch_0 [m/s2]", kind='line', color
='k', ax=ax)
data_.plot(x="Tid [s]", y="Inngang3_Ch_1 [m/s2]", kind='line', color
='g', ax=ax)
data_.plot(x="Tid [s]", y="Inngang4_Ch_2 [m/s2]", kind='line', color
='r', ax=ax)
data_.plot(x="Tid [s]", y="Inngang5_Ch_3 [m/s2]", kind='line', color
='y', ax=ax)
data_.plot(x="Tid [s]", y="Inngang6_Ch_4 [m/s2]", kind='line', color
='m', ax=ax)
data_.plot(x="Tid [s]", y="Inngang7_Ch_5 [m/s2]", kind='line', color
='c', ax=ax)
data_.plot(x="Tid [s]", y="Inngang8_Ch_6 [m/s2]", kind='line', color
='b', ax=ax)
positions = (0, 0.143, 0.286, 0.429, 0.572, 0.715, 0.858, 1.001) # 1
/antall timer målt
labels = ("08:00", "09:00", "10:00", "11:00", "12:00", "13:00", "14:
00", "15:00")
plt.xticks(positions, labels)
plt.xlabel('Tid', fontsize=12, fontweight='bold')
plt.ylabel('m/s2', fontsize=12, fontweight='bold')
plt.title('Akselerasjonsmålinger Kongsvinger', fontsize=14, fontweig
ht='bold')
plt.grid()
plt.savefig("KUSK_aks_tot_onsdag2901.png")
plt.show()
plt.close()
```

### Akselerasjon, RMS og FFT-plot:

#### Lese inn nødvendige bibliotek:

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from scipy.fftpack import fft
from scipy.signal import find_peaks
from numpy import fft
import tkinter as tk
from tkinter import filedialog
import time
```

#### Lese inn csv-fil (to-kolonne):

```
root = tk.Tk()
root.withdraw()
file_path = filedialog.askopenfilename(filetypes=[("Two Column CSV",
 "*.csv")])
print(file_path)
```

#### Lese inn data:

```
tic = time.perf_counter()
t, x = np.genfromtxt(file_path, delimiter=',', unpack=True)
toc = time.perf_counter()
print("Load Time:", toc-tic)
```

#### Bestemme variabler:

```
N = np.float(np.prod(t.shape)) #length of the array
Fs = 100 # Sample rate (Hz)
T = 1//Fs;
print("Sample rate (Hz):", Fs)
print("# Samples:", N)
```

#### Akselerasjons-plot:

```
tic = time.perf_counter()
plt.figure(figsize=(12,6))
plt.plot(t, x, label='Signal fra Kanal X, color='r')
plt.xlabel('Tid', fontsize=12, fontweight='bold')
plt.ylabel('m/s2', fontsize=12, fontweight='bold')
plt.xlim(0.216, 0.252) # justeres ift. innleste data
plt.ylim(-0.1, 0.1, 0.1) # justeres ift. innleste data
positions = (0.0, 0.1667, 0.3334, 0.5001, 0.6667, 0.8334, 1.0) #/ant
all timer målt
labels = ("14:00", "14:10", "14:20", "14:30", "14:40", "14:50", "15:
00") #Eksempelvis inndeling av time
plt.xticks(positions, labels)
plt.legend(loc='best')
plt.title('Akselerasjon', fontweight='bold', fontsize=14)
plt.grid()
toc = time.perf_counter()
print("Plot Tid:", toc-tic)
plt.savefig("KUSK_AKS_Dag_Dato_Klokkeslett.png") # justeres ift. in
nleste data
plt.show()
print("a_max:" ,max(x[1::])) # a-max
```

### RMS - plot:

```

tic = time.perf_counter()
w = np.int(np.floor(Fs)); #width of the window for computing RMS
steps = np.int_(np.floor(N/w)); #Number of steps for RMS
t_RMS = np.zeros((steps,1)); #Create array for RMS time values
x_RMS = np.zeros((steps,1)); #Create array for RMS values
for i in range (0, steps):
    t_RMS[i] = np.mean(t[(i*w):((i+1)*w)]);
    x_RMS[i] = np.sqrt(np.mean(x[(i*w):((i+1)*w)]**2));
plt.figure(figsize=(12,6))
plt.plot(t_RMS, x_RMS, label='Signal fra Kanal 5', color='k')
plt.xlabel('Tid', fontweight='bold', fontsize=12)
plt.ylabel('m/s2', fontweight='bold', fontsize=12)
plt.xlim(0.216, 0.252)
plt.ylim(0.0, 0.03)
plt.xticks(positions, labels)
plt.legend(loc='best')
plt.title("RMS", fontweight='bold', fontsize=14)
plt.grid()
toc = time.perf_counter()
print("RMS Tid:",toc-tic)
plt.savefig("KUSK_RMS_Tirsdag28_1400-1500.png")
plt.show()
print("a_rms_max:" ,max(x_RMS[1::]))

```

### FFT - plot:

```

tic = time.perf_counter() # Start time
plt.figure(figsize=(12,6))
mask = np.isfinite(x)
xi = np.arange(len(x))
xfiltered = np.interp(xi, xi[mask], x[mask])
yf = fft.fft(xfiltered)
freqX = fft.fftfreq(len(yf), 1/Fs)
plt.plot(freqX, yf, label='Signal fra Kanal X', color='g')
plt.grid()
plt.xlabel('Frekvens (Hz)', fontsize=12, fontweight='bold')
plt.ylabel('Akselerasjon (m/s2)', fontsize=12, fontweight='bold')
plt.xlim(0.0, 50.0, 1)
plt.ylim(0.0, 8, 0.02)
plt.legend(loc='best')
plt.title('FFT', fontweight='bold', fontsize=14)
toc = time.perf_counter() # Stop time
print("FFT Tid:",toc-tic)
plt.savefig("KUSK_FFT_Dag_Dato_Klokkeslett.png")
plt.show()
max_y = max(yf) # Max y-value
max_x = freqX[yf.argmax()] # Corresponding x-value
print("Ved 'Peak-Picking-Method', leses egenfrekvensen til:", abs(max_x), "Hz")

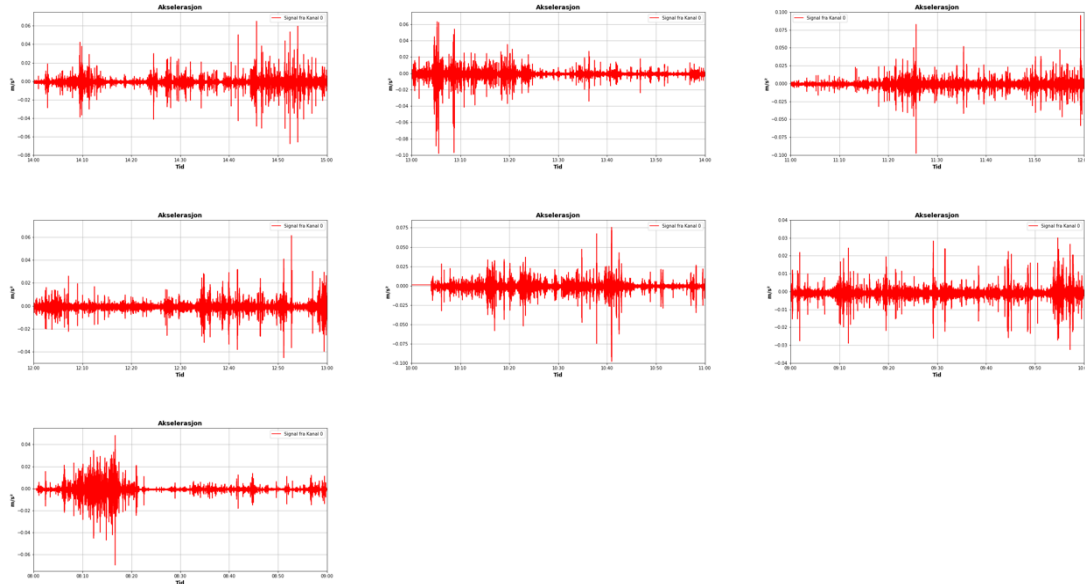
```

# Vedlegg B1: Innsamlet akselerasjon

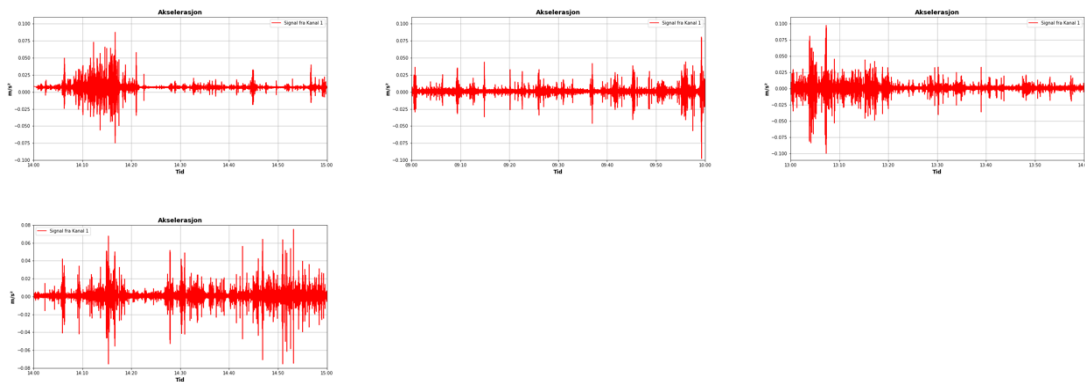
Kongsvinger ungdomsskole

Tirsdag 28. Januar 2020

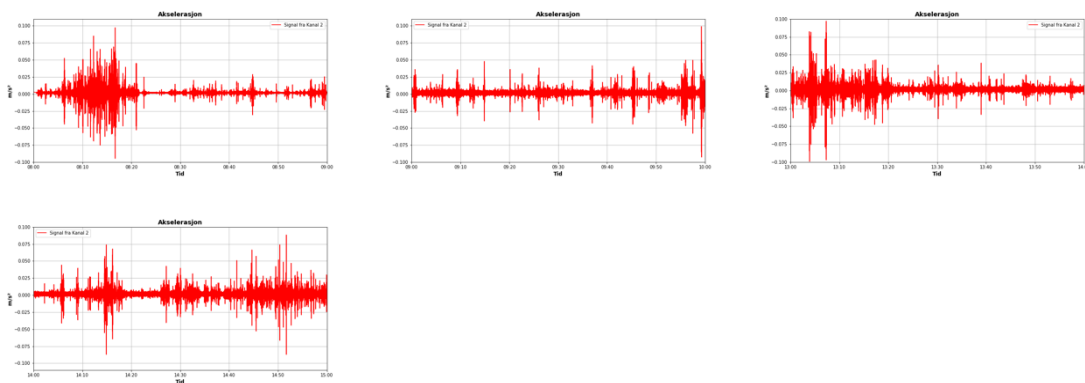
## Akselerometer 0



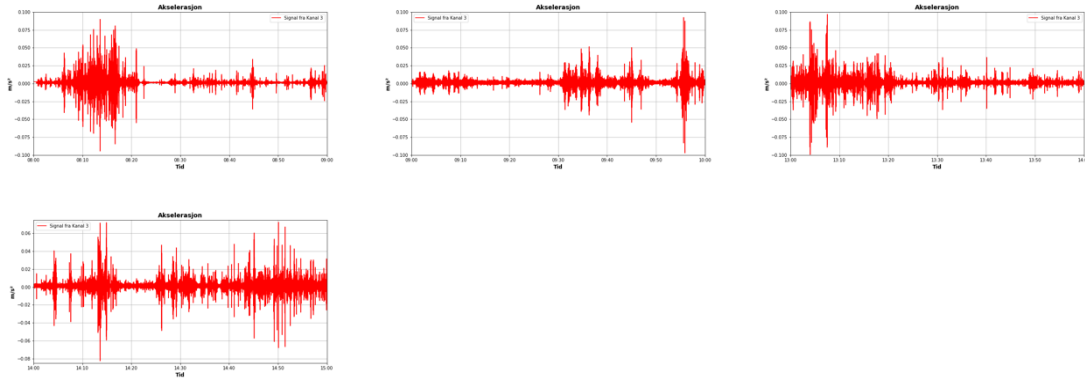
## Akselerometer 1



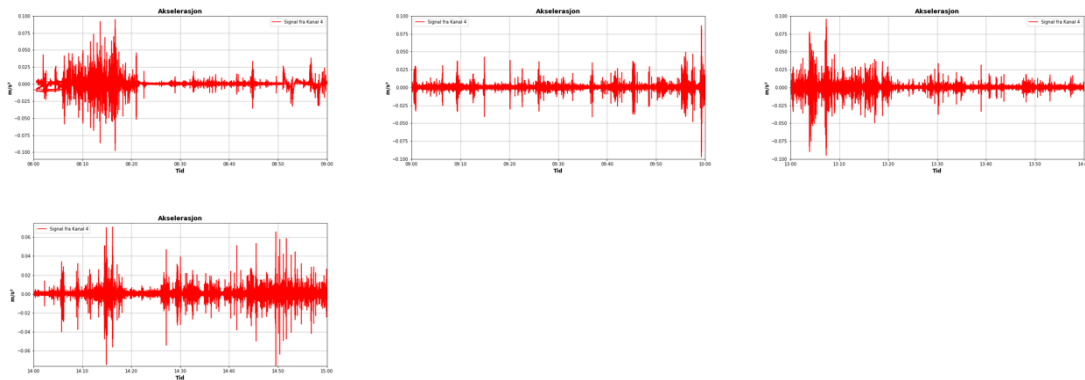
## Akselerometer 2



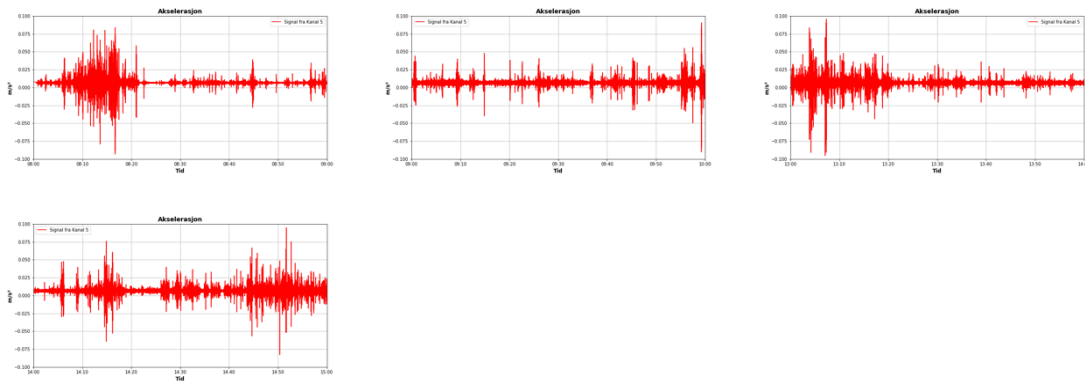
### Akselerometer 3



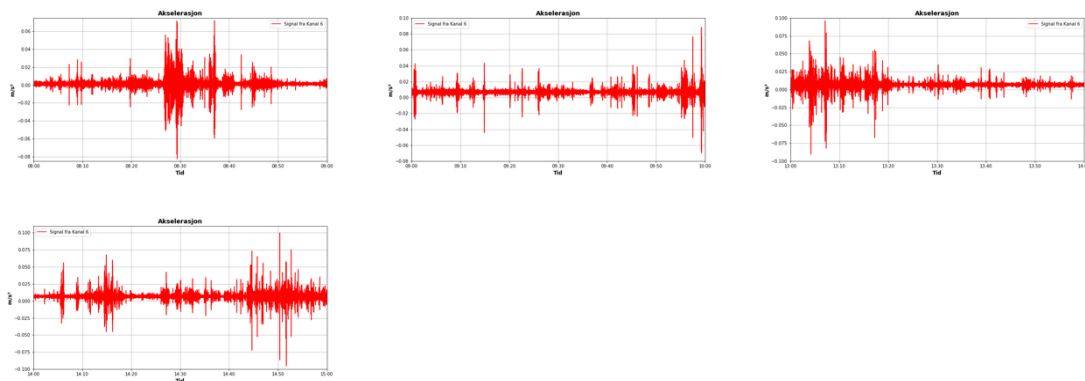
### Akselerometer 4



### Akselerometer 5



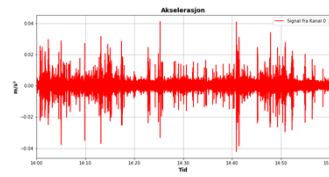
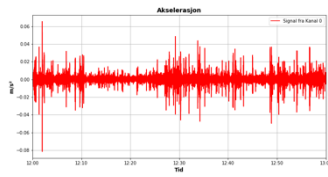
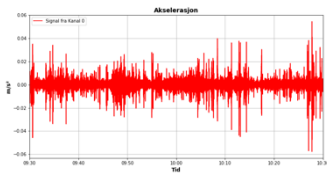
### Akselerometer 6



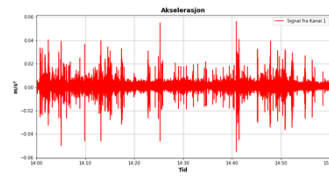
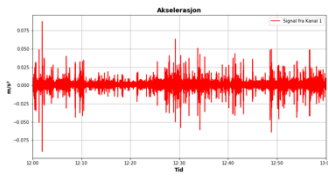
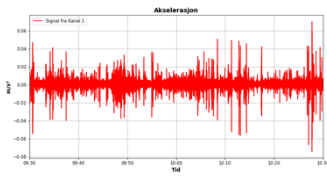
Valle Wood 1

Tirsdag 10. Mars 2020

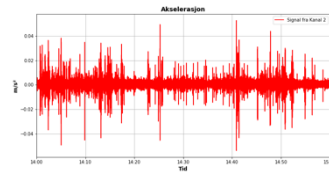
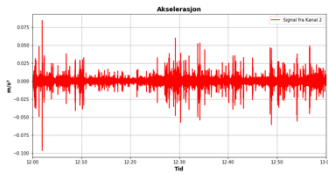
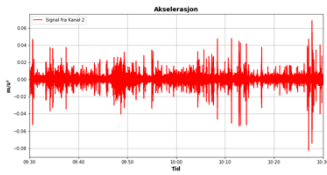
Akselerometer 0



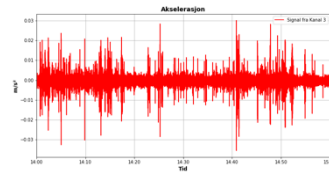
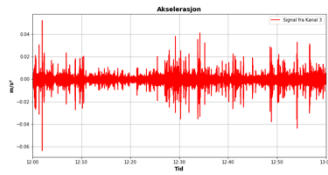
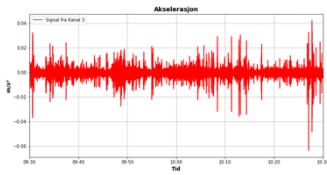
Akselerometer 1



Akselerometer 2

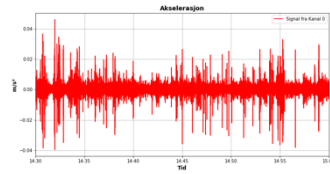
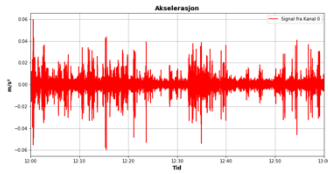
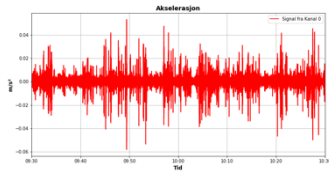


Akselerometer 3

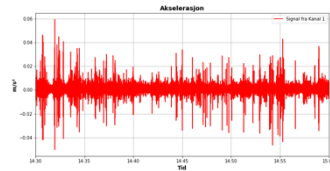
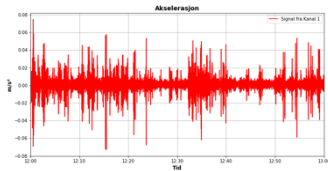
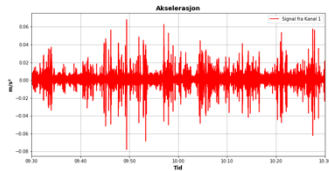


Onsdag 11. Mars 2020

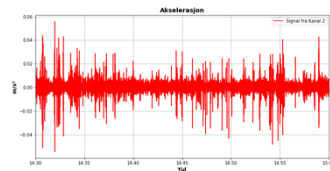
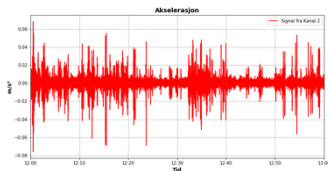
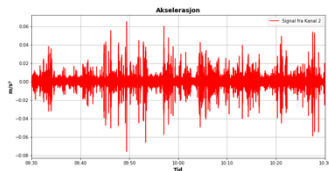
### Akselerometer 0



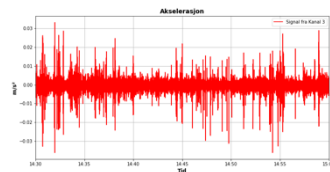
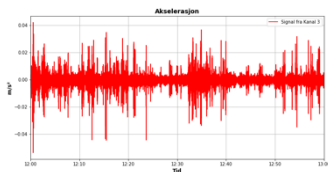
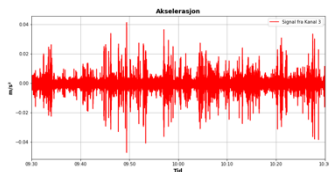
### Akselerometer 1



### Akselerometer 2

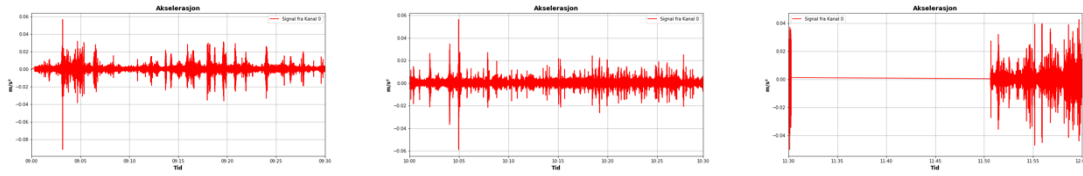


### Akselerometer 3

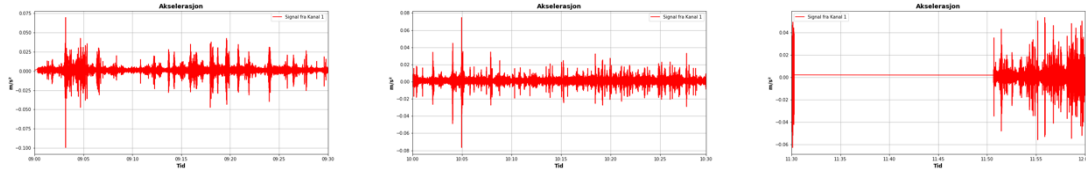


Torsdag 12. Mars 2020

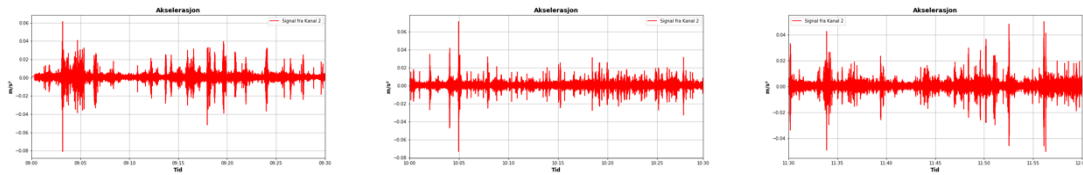
### Akselerometer 0



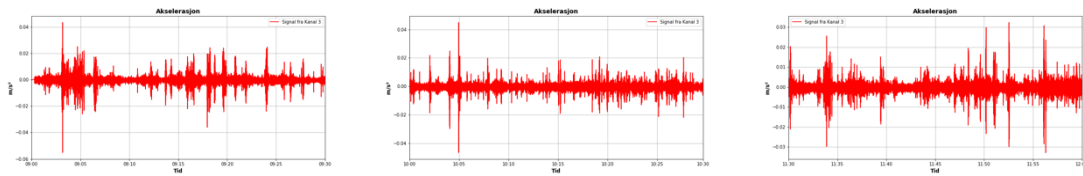
### Akselerometer 1



### Akselerometer 2



### Akselerometer 3

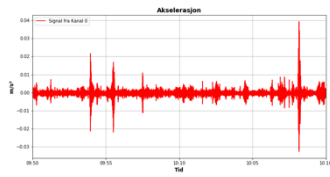
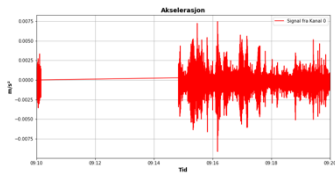




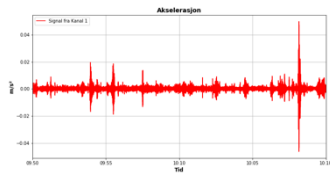
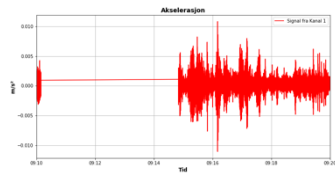
Valle Wood 2

Tirsdag 7. April 2020

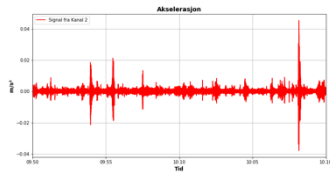
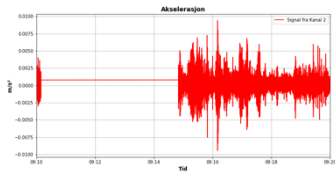
Akselerometer 0



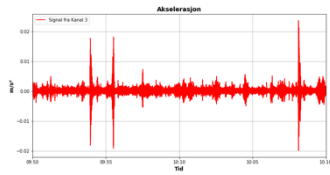
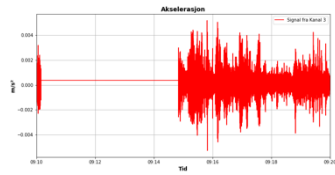
Akselerometer 1



Akselerometer 2



Akselerometer 3

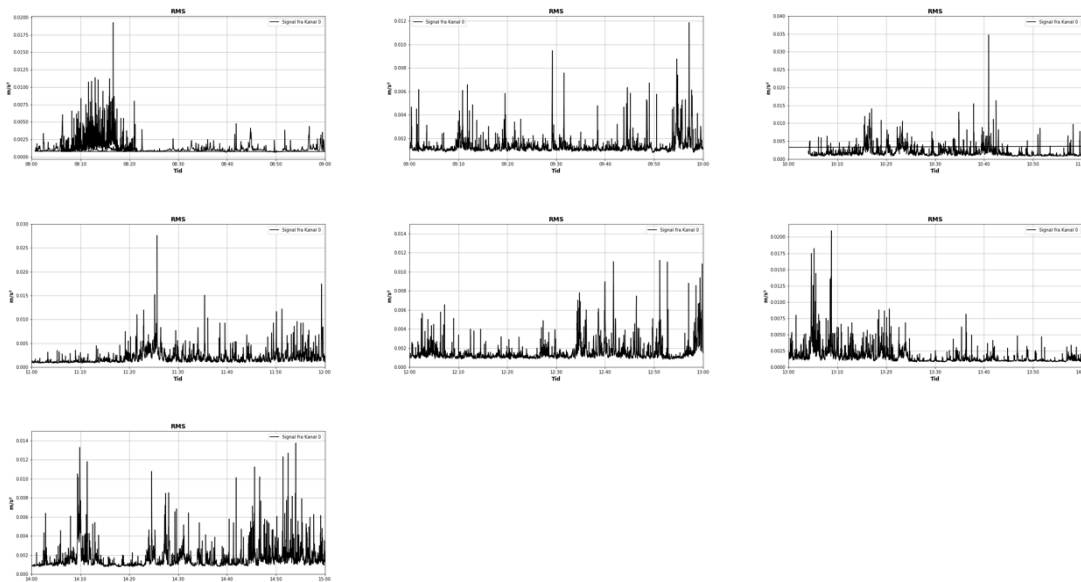


# Vedlegg B2: Innsamlet RMS-akselerasjon

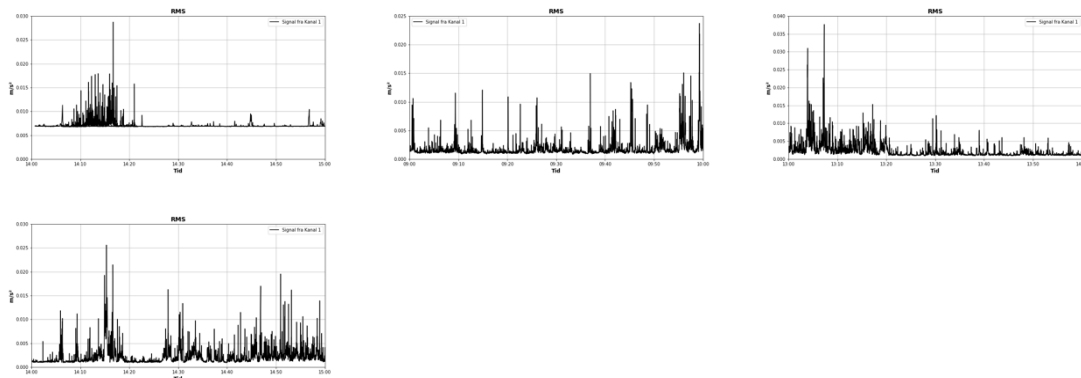
Kongsvinger ungdomsskole

Tirsdag 28. Januar 2020

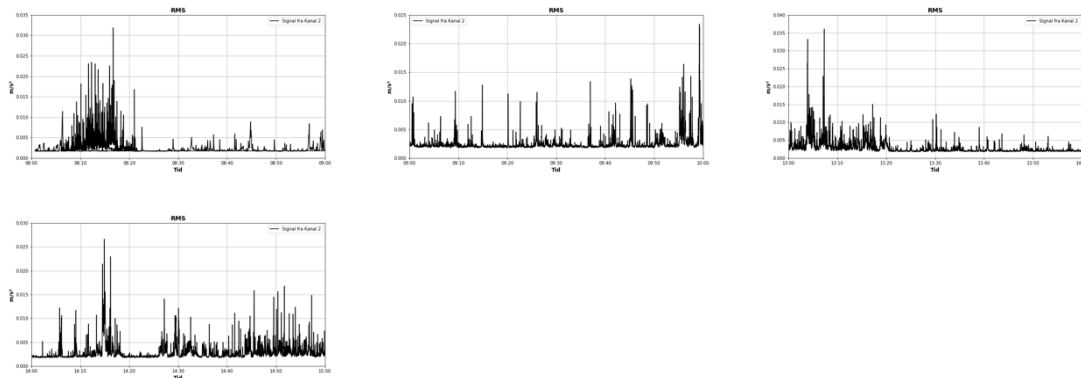
## Akselerometer 0



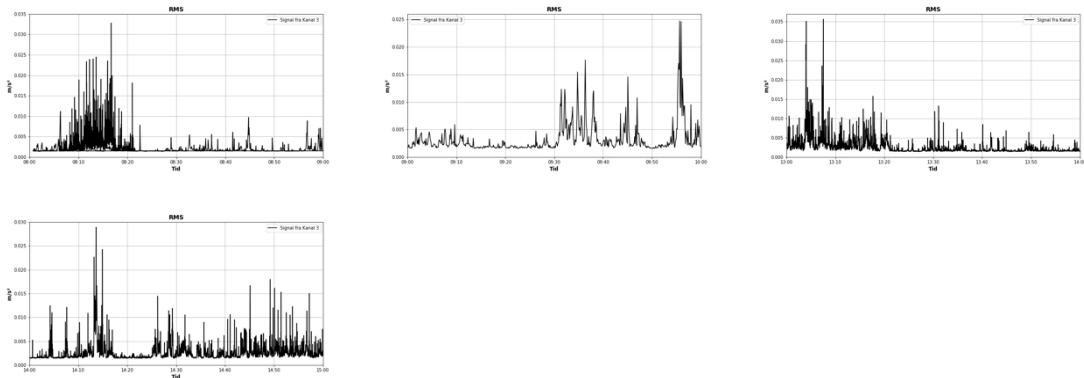
## Akselerometer 1



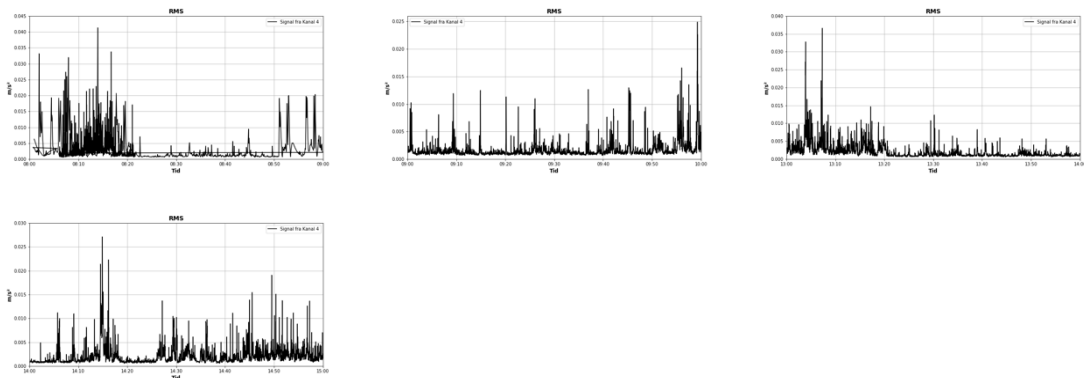
## Akselerometer 2



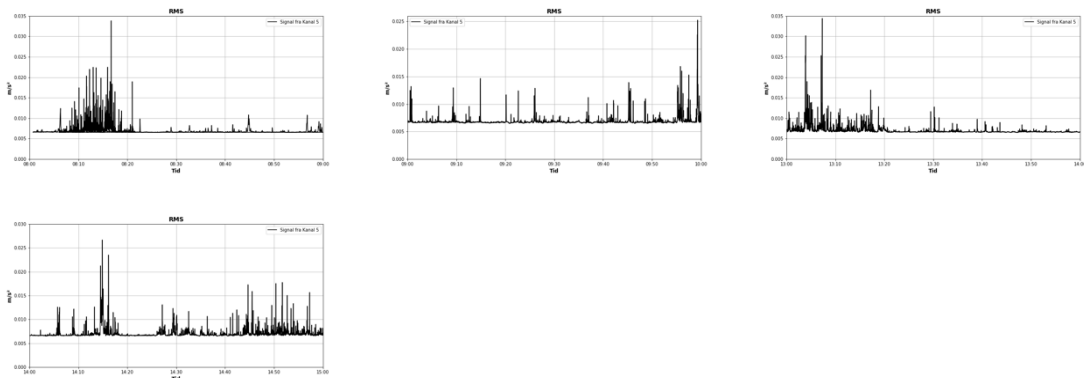
### Akselerometer 3



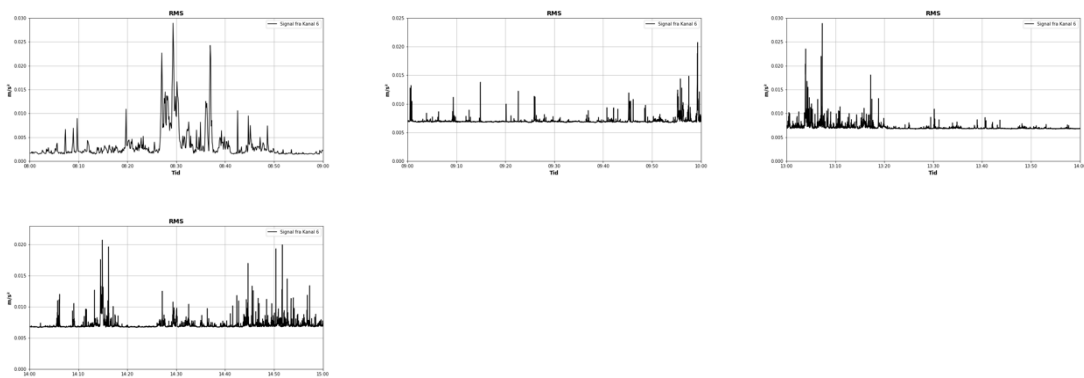
### Akselerometer 4



### Akselerator 5



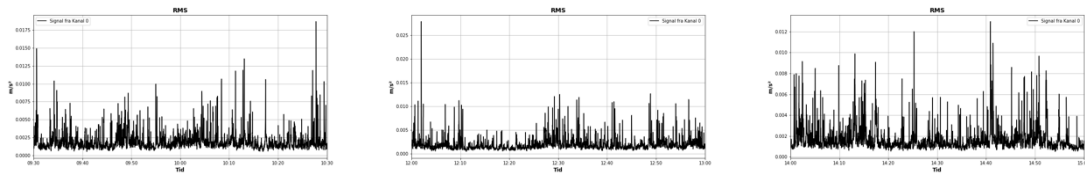
### Akselerometer 6



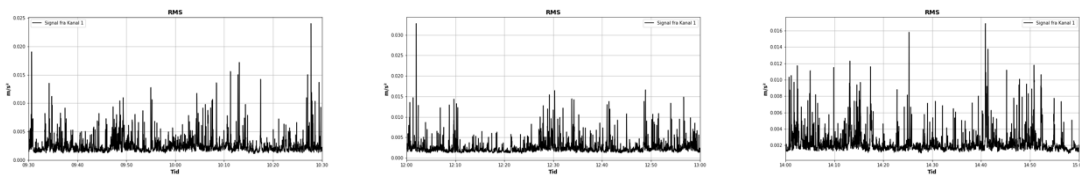
Valle Wood 1

Tirsdag 10. Mars 2020

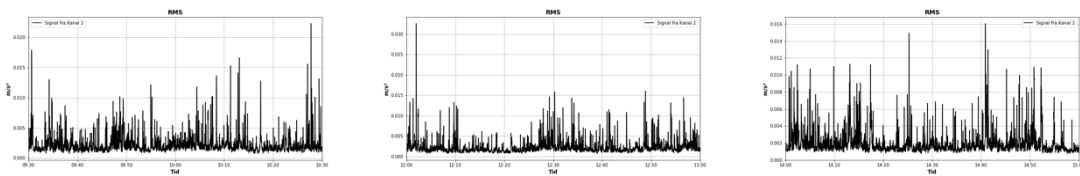
Akselerometer 0



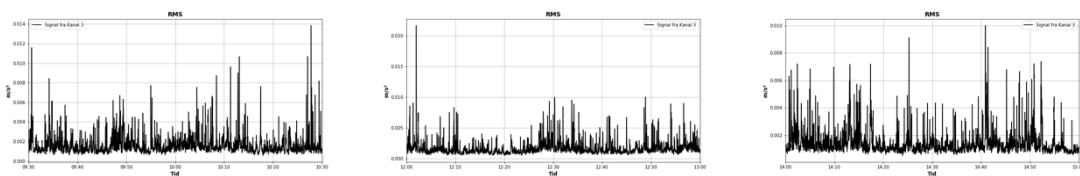
Akselerometer 1



Akselerometer 2

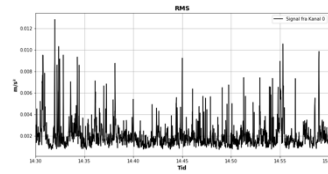
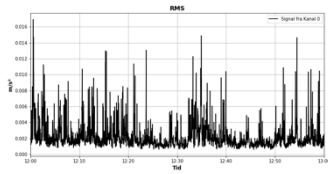
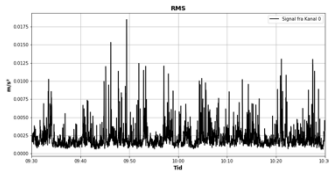


Akselerometer 3

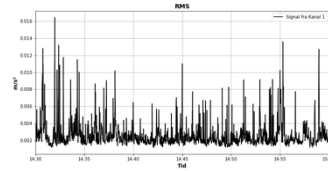
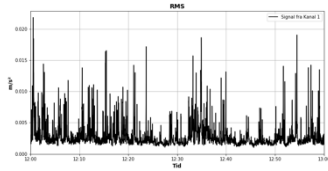
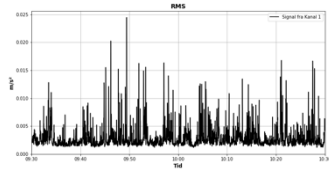


Onsdag 11. Mars 2020

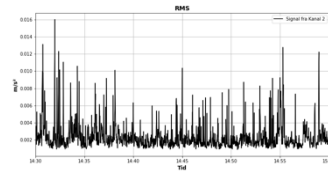
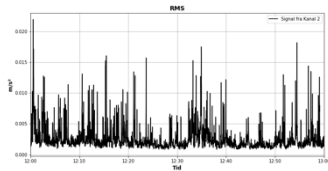
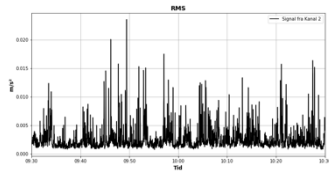
### Akselerometer 0



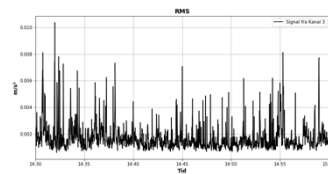
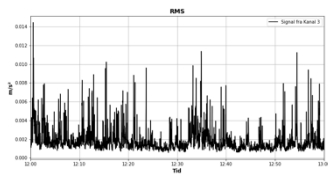
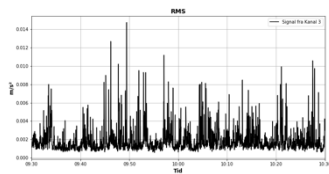
### Akselerometer 1



### Akselerometer 2

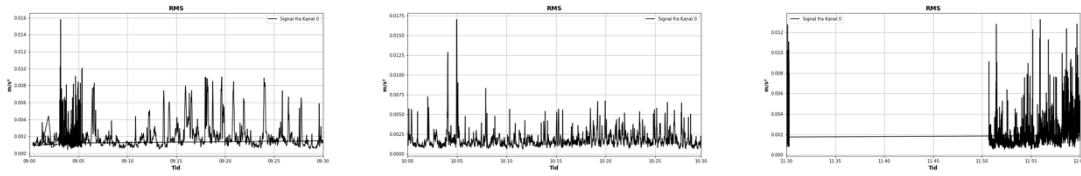


### Akselerometer 3

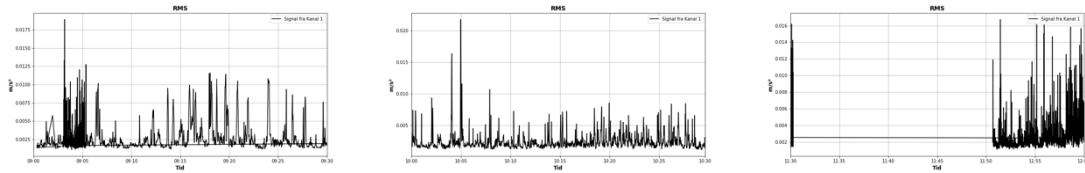


Torsdag 12. Mars 2020

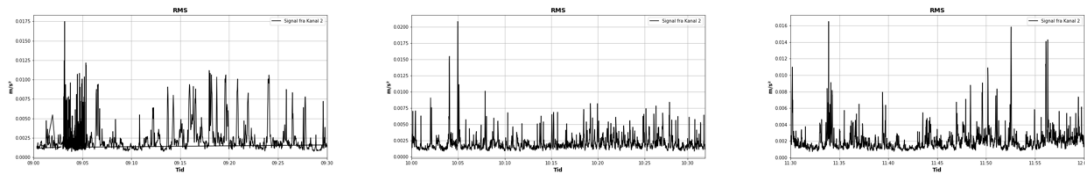
### Akselerometer 0



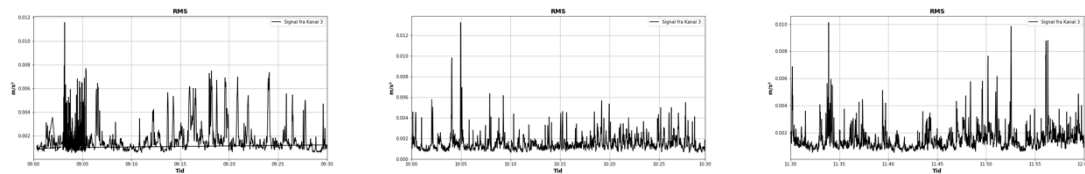
### Akselerometer 1



### Akselerometer 2



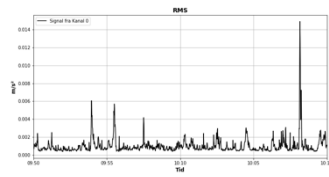
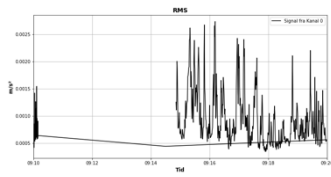
### Akselerometer 3



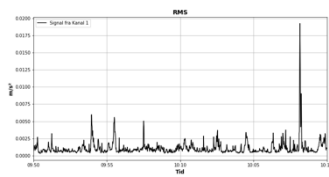
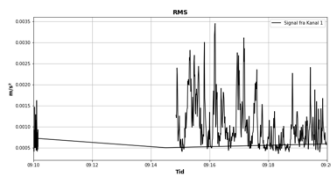
Valle Wood 2

Tirsdag 7. April 2020

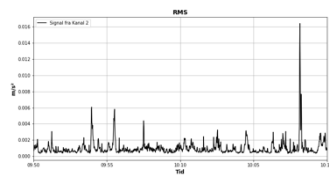
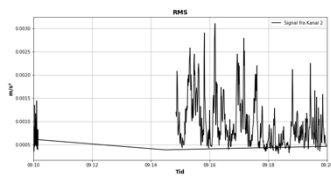
Akselerometer 0



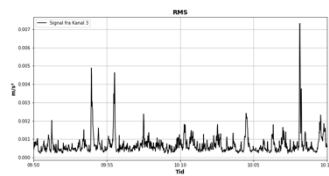
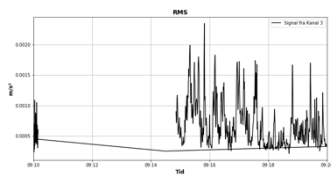
Akselerometer 1



Akselerometer 2



Akselerometer 3

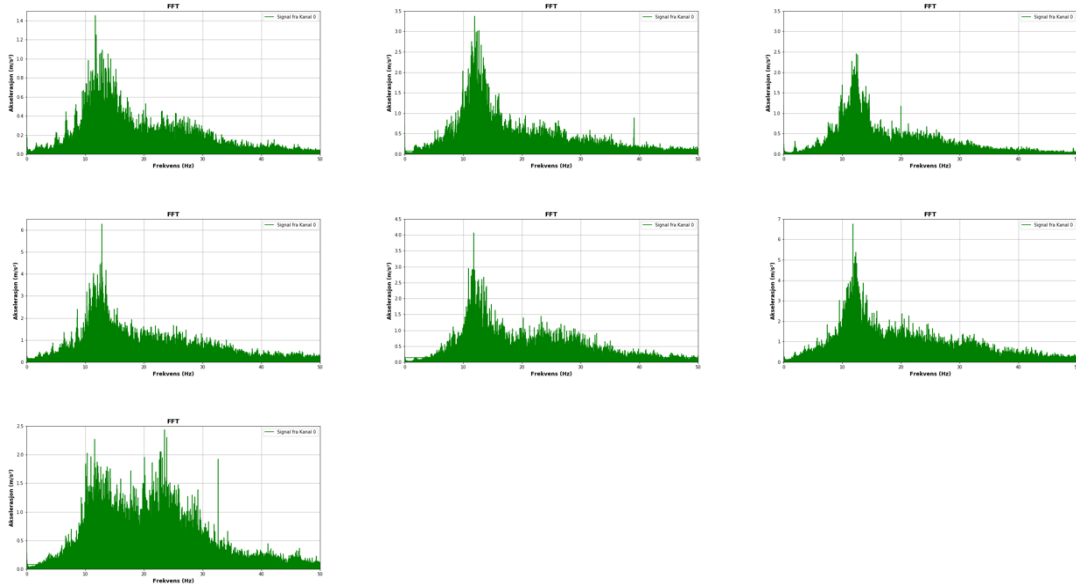


# Vedlegg B3: Fourier transformasjon

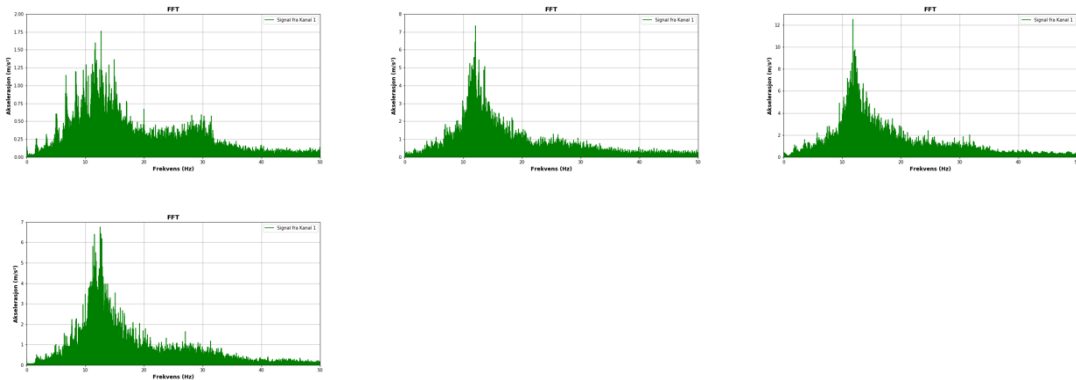
Kongsvinger ungdomsskole

Tirsdag 28. Januar 2020

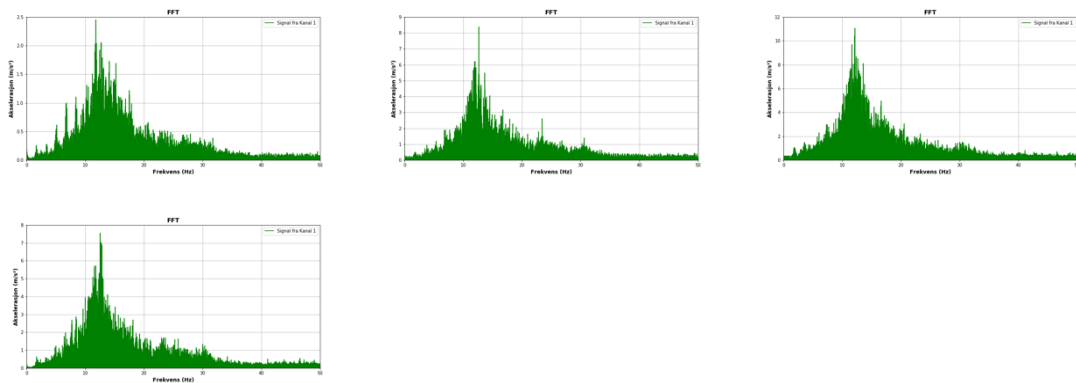
## Akselerometer 0



## Akselerometer 1

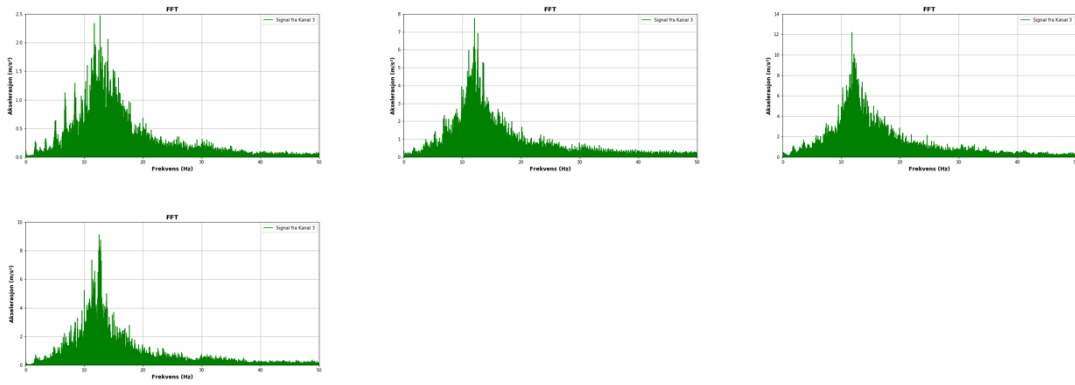


## Akselerometer 2

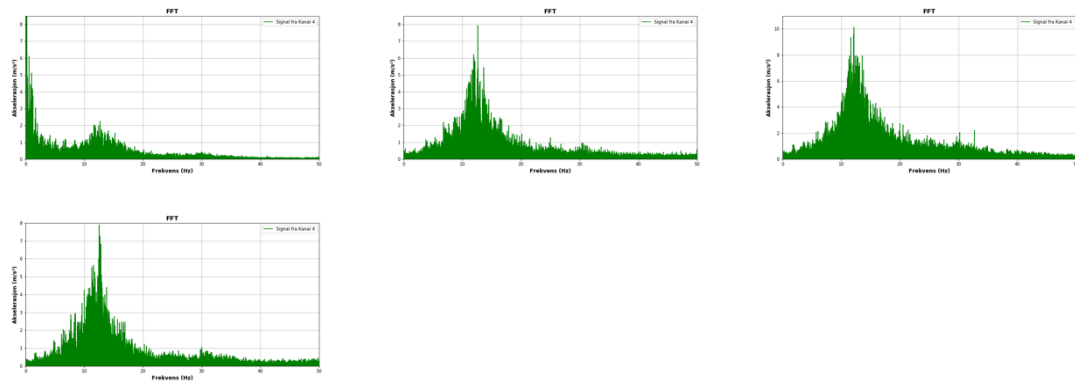




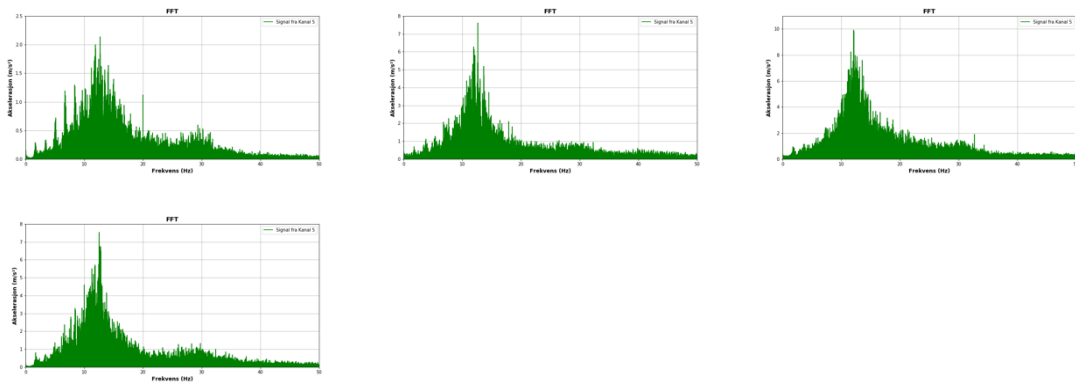
### Akselerometer 3



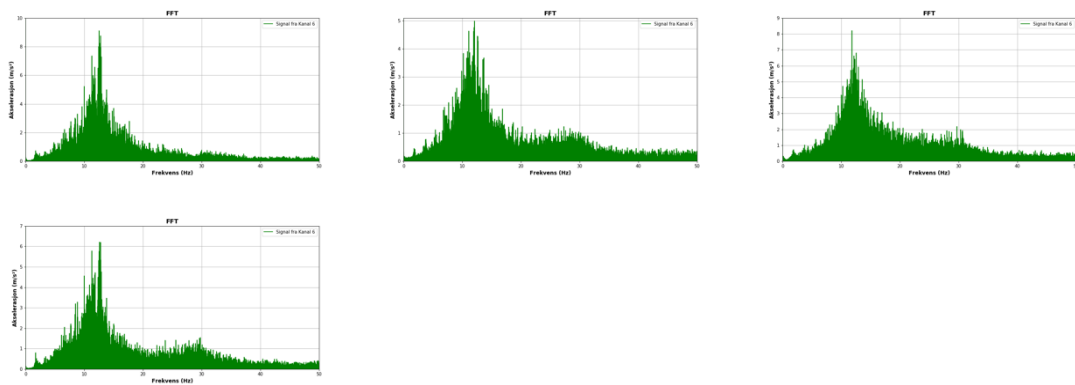
### Akselerometer 4



### Akselerometer 5



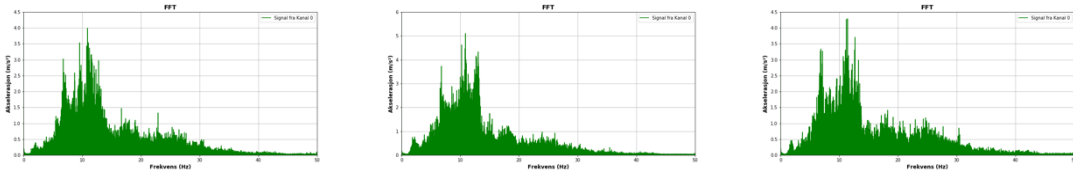
### Akselerometer 6



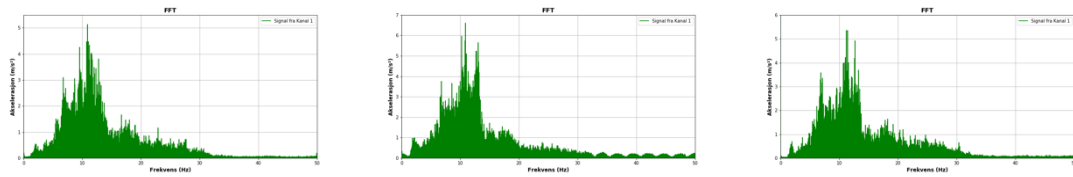
Valle Wood 1

Tirsdag 10. Mars 2020

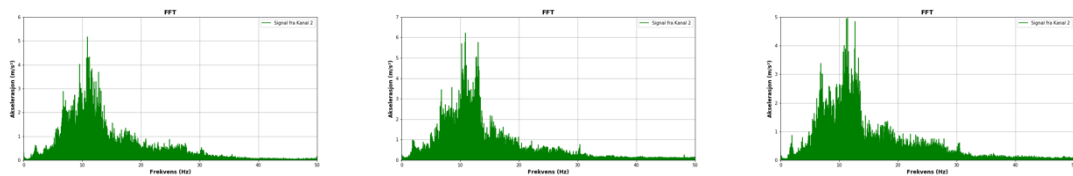
Akselerometer 0



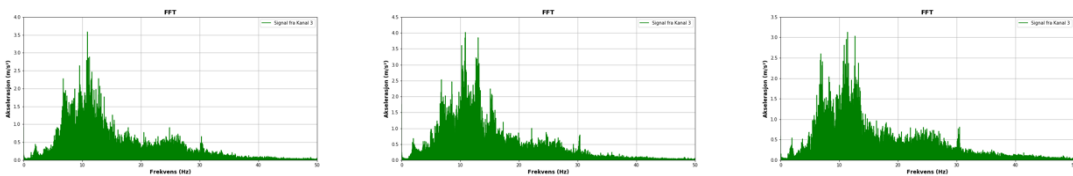
Akselerometer 1



Akselerometer 2

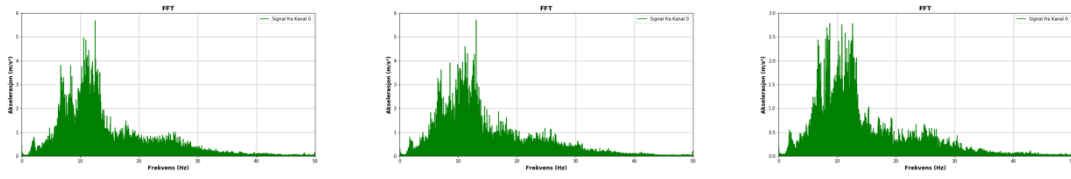


Akselerometer 3

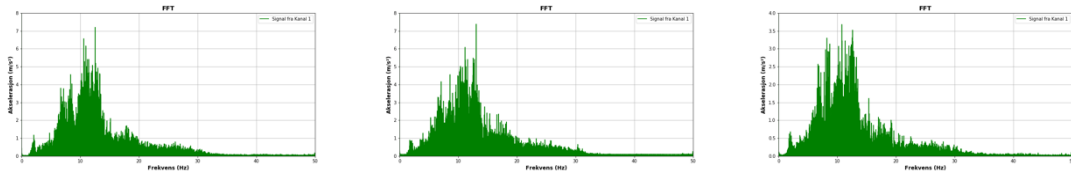


Onsdag 11. Mars 2020

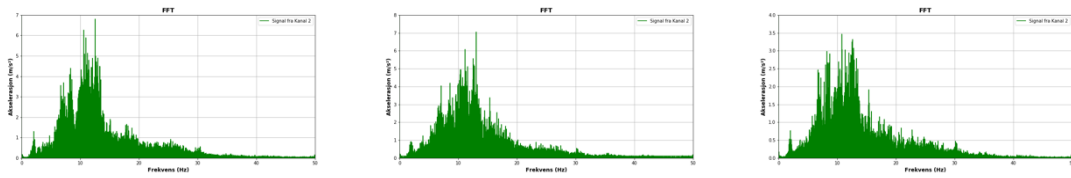
### Akselerometer 0



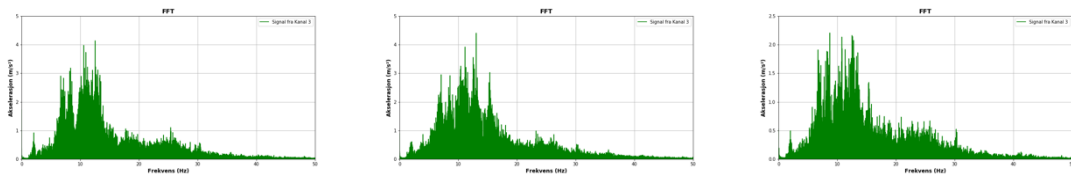
### Akselerometer 1



### Akselerometer 2

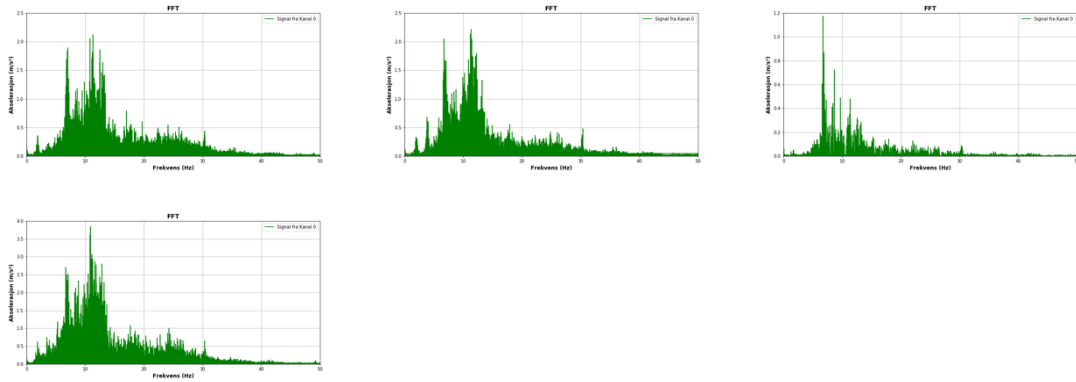


### Akselerometer 3

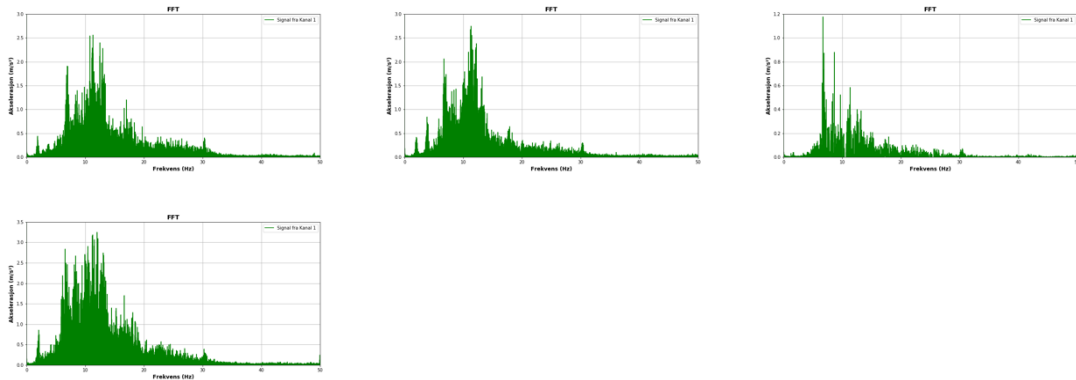


Torsdag 12. Mars 2020

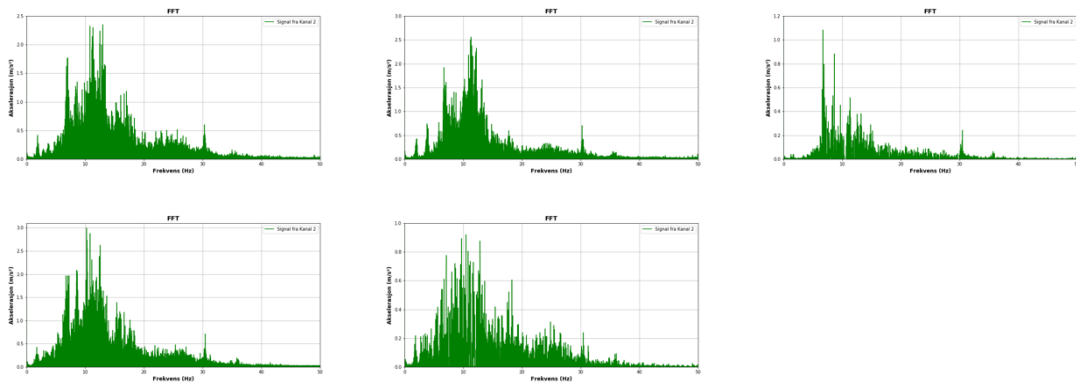
### Akselerometer 0



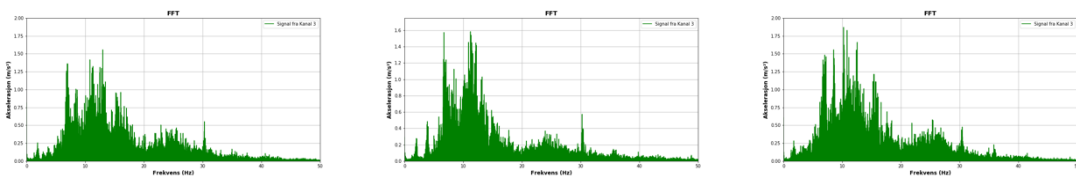
### Akselerometer 1



### Akselerometer 2



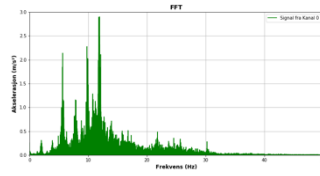
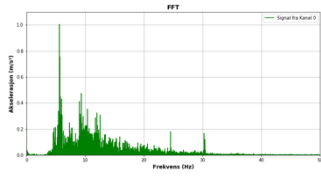
### Akselerometer 3



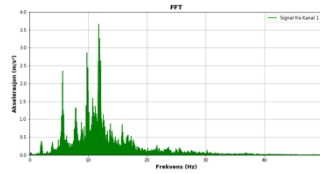
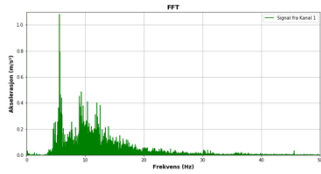
Valle Wood 2

Tirsdag 7. April 2020

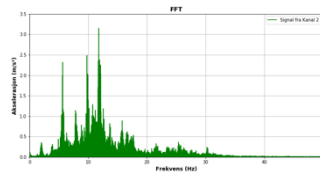
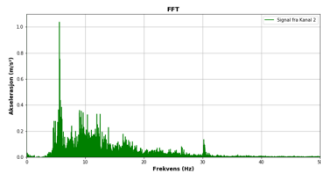
Akselerometer 0



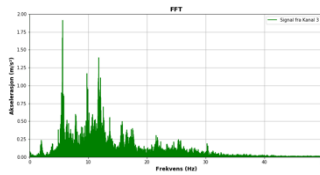
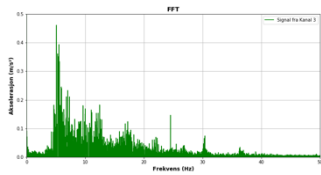
Akselerometer 1



Akselerometer 2



Akselerometer 3





**Norges miljø- og biovitenskapelige universitet**  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway