



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2019 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Stabilisering av høye trehus ved bruk av massivtresjakter

Stabilization of high-rise timber buildings by using
CLT-shafts

Marte Oline Bodal
Byggeteknikk og arkitektur

Forord

Denne masteroppgaven er slutten på et femårig studieløp i Byggeteknikk og arkitektur ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Oppgaven utgjør 30 studiepoeng og er skrevet ved fakultetet for realfag og teknologi.

Jeg ønsker å takke min veileder Anders Björnfot for hjelp og veiledning gjennom semesteret. Videre ønsker jeg å takke Anders Nygård og Ildiko Lukacs i Ny Struktur for hjelp til utforming av oppgaven og modelleringen i Robot Structural Analysis.

En ekstra stor takk til min samboer, venner og familie som har hjulpet meg gjennom den siste tiden med masterskriving.

Rena, 15. desember 2019

Marte Oline Bodal

Sammendrag

I denne masteroppgaven blir det sett på hvordan plasseringen og utformingen av massivtresjakter påvirker den dynamiske oppførselen til høye trehus. Den dynamiske oppførselen forteller hvordan bygget beveger seg når det blir utsatt for en last. Oppgaven er todelt, det blir først sett på teorien bak dynamisk oppførsel, deretter blir det testet ulike modeller i et FEM – analyse program.

Resultatene viser at sjaktens plassering og orientering påvirker den dynamiske oppførselen til høye trehus.

Abstract

This master thesis reviews how the placement and design of a cross laminated timber shafts affect the dynamic response of high-rise timber buildings. The dynamic response tells how the building is set in motion when it is exposed to a load. The thesis is divided into two parts, in the first part the theory behind dynamic response is addressed, in the second part different models will be tested in a FEM – analysis program

The results show that the placement and design of the shaft affect the dynamic response of high-rise timber buildings.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	I
Sammendrag	III
Abstract	V
Figurliste.....	IX
Tabelliste	IX
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Målsetning og problemstilling.....	2
1.3 Avgrensninger.....	2
2 Teori.....	3
2.1 Dynamikk.....	3
2.1.1 Dynamisk respons.....	3
2.1.2 Dynamiske lasters påvirkning på konstruksjoner	5
2.2 Avstivende systemer	7
2.2.1 Sjakt som avstivende element.....	7
2.2.2 Plassering og utforming av sjakter	9
2.3 Massivtre som konstruksjonsmateriale	13
2.3.1 Oppbygging av KLT – elementer	13
3 Metode.....	14
3.1 Forskningsstrategi	14
3.2 Case	15
3.3 Modellenes oppbygging.....	16
3.4 Modellene	17
3.4.1 Modeller med en sjakt.....	18
3.4.2 Modeller med to sjakter	18
3.4.3 Modeller med fire sjakter.....	20
3.5 Beregning av akselerasjon.....	21
3.6 Verifisering av modellen.....	21
4 Resultater og analyse	22
4.1 Modeller med en sjakt.....	23
4.2 Modeller med to kjerner	24
4.2.1 Modell 3, 4 og 5.....	25
4.2.2 Modell 6, 7, 8 og 9.....	27
4.3 Modeller med fire sjakter.....	29
4.4 Sammenligning av modellene	31

4.5	Verifisering av modellen.....	32
5	Diskusjon	33
5.1	Diskusjon av resultatene	33
5.2	Delspørsmål.....	33
6	Konklusjon.....	35
	Videre arbeid.....	36
	Litteraturliste.....	37
	Vedlegg.....	39
	Vedlegg A.....	40

Figurliste

Figur 2-1: idealisert SDOF system, basert på (Chopra, 2012).....	3
Figur 2-2: Dynamiske bevegelser i bygget.....	5
Figur 2-3: Komfortravet for vibrasjoner forårsaket av vindlast med returperiode på 1 år (ISO (Internation Standard Organisation), 2007).....	7
Figur 2-4: Sammenligning av bøyning for skjærvegger som ikke er sammenkoblet mot de som er det når de utsettes for en horisontal last (Sandelin & Budajev, 2013)	8
Figur 2-5: Utregning av treghetsmoment for frittstående skjærvegger (Sandelin & Budajev, 2013).....	8
Figur 2-6: Utregning av treghetsmoment for sammenkoblede skjærvegger (Sandelin & Budajev, 2013)	9
Figur 2-7: Plassering av kjerne, basert på (Yeang, 2000)	10
Figur 2-8: Sjaktplasseringer evaluert i (Mcguinness, Stein, Stein, & Reynolds, 1987).	10
Figur 2-9: Forklaring plasseringer fra Tabell 2-1.....	11
Figur 2-10: Symmetriaksene til et kvadrat	12
Figur 3-1: Forskningsstrategi	14
Figur 3-2: Bjelke-søylesystemet til eksempelbygget	15
Figur 3-3: Definerings av stivhetsmatrise i Robot.....	17
Figur 3-4: Oversikt over modellene med en sjakt	18
Figur 3-5: Oversikt over modellene med to sjakter.....	19
Figur 3-6: Oversikt over modellene med fire sjakter	20
Figur 4-1: Første mode i X- og Y-retning og torsjon	22
Figur 4-2: Modellene med en sjakt.....	23
Figur 4-3: Plott av resultatene for modellene med en kjerne.....	24
Figur 4-4: Modeller med to sjakter orientert med størst veggareal i byggets svake retning	25
Figur 4-5: Plott av resultatene til modell 3, 4 og 5	26
Figur 4-6: Modeller med to sjakter orientert med størst veggareal i byggets sterke retning	28
Figur 4-7: Plott av resultatene til modell 6, 7, 8 og 9	28
Figur 4-8: Plott av resultatene for modellene med tre kjerner	30
Figur 4-9: Modellene med fire sjakter	30
Figur 4-10: Sammenligning av resultatene til de ulike modellene	31

Tabelliste

Tabell 2-1: Utvalg av bygninger med heis- og trappesjakt som stabilisering mot laterale krefter	11
Tabell 3-1: Stivhetsmatrise Stora Enso CLT	16
Tabell 4-1: Resultater for modellene med en kjerne	23
Tabell 4-2: Resultater for modell 3, 4 og 5	25
Tabell 4-3: Resultater for modell 6, 7, 8 og 9	27
Tabell 4-4: Resultater for modeller med fire sjakter	29
Tabell 5-1: prosentvis arealbruk av byggets grunnflate:	33

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Det bygges stadig høyere bygninger i tre både i Norge og ellers i verden. Blant de man finner i Norge kan man nevne Mjøstårnet i Brumunddal og Treet i Bergen. Mjøstårnet åpnet i mars 2019 og er med sine 85,4 meter verdens høyeste trehus (Bjørheim, 2019). En av de største utfordringene knyttet til å bygge i tre er å oppfylle komfortkravet til akselerasjon (Juveli, 2016). Siden treverk er et lett materiale, kan det lett oppstå bevegelse i de øverste etasjene. Selv om det ikke er fare for at bygget skal kollapse kan de som oppholder seg der føle et ubehag, og det er dermed ønskelig med så lite bevegelse som mulig. I flere av dagens høye trebygninger er problemet knyttet til bevegelse løst med at det i noen av konstruksjonsdelene er benyttet betong i stedet for tre. I Mjøstårnet og treet er det lagt inn dekker i betong for å øke byggets totale masse, mens det i andre er brukt betong i sjaktene for å øke stivheten til bygget.

I masteroppgaven «Ulike løsninger for horisontal avstivnings effekt på den dynamiske responsen i høye trehus» fra 2016 blir det sett på ulike løsninger for horisontal avstivning (Juveli, 2016). Resultatene viser at diagonaler i limtre har stor effekt på stivheten til bygget sammenlignet med hvor mye tremateriale som er benyttet. For å oppnå den samme stivheten ved å benytte seg av skjærvegger må det benyttes mye mer materiale, og det må plasseres flere innvendige vegger i tillegg til en sentral kjerne. I et kontorbygg med åpen planløsning er det ikke ønskelig med mange innvendige skjærvegger, mens diagonalene vil gi en begrensning i forhold til åpninger i fasaden (Juveli, 2016), og i dagens nybygg hvor det ofte benyttes store glassfasader kan store diagonaler virke forstyrrende.

Selv om det er problemene knyttet til stabilisering av høye trehus er det flere gode grunner til å velge tre framfor stål og betong som tradisjonelt sett er mest brukt i høye bygninger. Tre er som nevnt tidligere et lett materiale noe som fører til at det stiller mindre krav til grunnforholdene. KLT (krysslaminert tre) og limtre egner seg for prefabrikasjon noe som forkorter byggetiden på byggeplassen. I masteroppgaven «Massivtre og Plasstøpt betong: en casestudie» fra 2018 ble det sett på erfaringer knyttet til bruk av massivtre i boligprosjekt (Østnor, 2018). HMS oppfølging fra prosjektene tilsier at det er bedre arbeidsmiljø i massivtrebygget enn det er i betongbygget. I massivtrebygget var bedre luftforhold, renere og tørrere enn i betongbygget som var mer støvete, råere og vanskeligere og holde rent. Casestudiet gir også en indikasjon på at det er bedre forutsetninger for god HMS på byggeplassen når det bygges med massivtre kontra betong.

I alle byggverk med to etasjer eller flere som er åpne for publikum eller hvor det er arbeidsplasser er det krav om heis (TEK17, u.d.). Heissjaktene kan brukes til horisontal avstivning.

1.2 Målsetning og problemstilling

Som nevnt i forrige delkapittel kan det lett oppstå bevegelse i høye trebygninger. Det finnes flere løsninger for horisontal avstivning, men de kan av ulike årsaker ikke være foretrukket. Siden det er krav om heis i kontorbygg på mer enn to etasjer er det interessant å undersøke hvordan man best kan utnytte heissjakten til horisontal avstivning. Dette leder fram til oppgavens problemstilling:

Hvordan påvirkes den dynamiske oppførselen til høye trehus av plasseringen og utformingen til massivtresjakter?

Med utforming menes orientering og om det er en eller flere sjakter. Med dynamisk oppførsel menes akselerasjonen som oppstår når bygget settes i bevegelse.

For å kunne svare på problemstillingen er det utledet tre delspørsmål:

1. Hvordan brukes sjakter i KLT og andre materialer som avstivende elementer?
2. Hvilke andre faktorer enn stabilitet er det som er avgjørende ved bestemmelse av sjaktens plassering?
3. Hvilke løsninger er mest effektive med tanke på arealbruk og avstivningsegenskaper?

Resultatene fra denne oppgaven vil gi mer kunnskap om hvordan plasseringen og utformingen av massivtresjakter påvirker et byggs dynamiske oppførsel.

1.3 Avgrensninger

- Det blir kun sett på byggets dynamiske oppførsel forårsaket av vindlast.
- Forbindelser er utelatt fra analysen.
- For å unngå torsjon i bygget sees det kun på symmetriske løsninger.
- Etasjeskillene antas å være uendelig stive, slik at de kun overfører krefter til sjakten.

2 Teori

I dette kapitlet blir teorien som er brukt til å svare på problemstillingen gjennomgått. Kapitlet er delt inn i 3 delkapitler, dynamikk, avstivende systemer og massivtre som konstruksjonsmateriale.

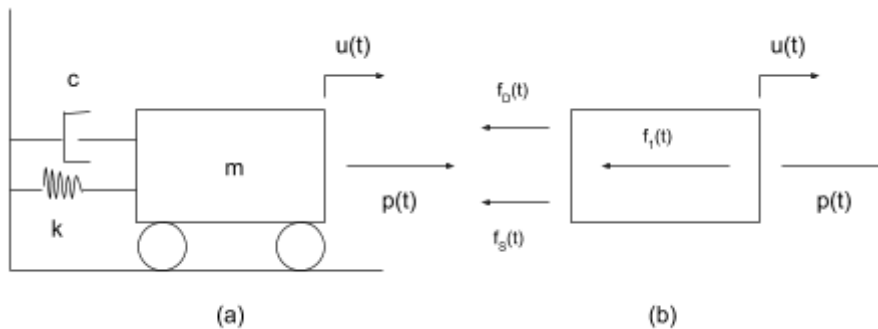
I dynamikkdelen blir det sett på faktorene som påvirker den dynamiske oppførselen til et bygg, hvilket er svar på delspørsmål 1. I delen som omhandler avstivende systemer blir det sett på hvordan sjakter brukes som avstivning mot horisontale krefter. I den siste delen massivtre som konstruksjonsmateriale blir det sett på hvordan KLT elementer er bygd opp.

2.1 Dynamikk

I statikken sees det på konstruksjoner som enten er i ro, eller beveger seg med en konstant hastighet i en bestemt retning, altså er akselerasjonen lik null. Dynamikken derimot ser på den akselererte bevegelsen til konstruksjonen. I dette kapitlet vil det bli sett på de ulike faktorene som påvirke den dynamiske oppførselen til konstruksjonen. Om ikke annet er nevnt er teorien i kapittel 2.1 og underkapitlene basert på (Juveli, 2016) og (Chopra, 2012)

2.1.1 Dynamisk respons

Den dynamiske responsen til en konstruksjon kan forklares ved å se på et system med en frihetsgrad (SDOF system). Figur 2-1 (a) viser et idealisert SDOF system. Forflytningen, u , til systemet skyldes kraften, p , den blir utsatt for, den vektløse fjæren med stivheten k er den elastiske motstanden til forflytningen og energitapet ved forflytningen er representert med en demper med dempningskonstanten c .



Figur 2-1: idealisert SDOF system, basert på (Chopra, 2012)

Ut ifra systemet i Figur 2-1 kan man sette opp bevegelsesligningen til et idealisert SDOF system:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (2-1)$$

Av ligning (2-1) ser man at det er fire faktorer som påvirker den dynamiske oppførselen til konstruksjonen, massen, dempningen, stivheten og lasten den blir utsatt for.

Masse (m)

Massen er vekten til konstruksjonen målt i kg. Som vist i ligning (2-1) er massen knyttet til konstruksjonens akselerasjon. En økning av massen vil føre til økt treghet i systemet som igjen vil

dempe akselerasjonen. Masse økning vil dermed ha størst innvirkning på akselerasjonen der svingningene er størst, altså i toppen (Tøsse, 2010). Når man ser på byggets dynamiske oppførsel, er den modale massen viktig. Den modale massen forteller hvor mye av byggets totale masse som er med når bygget beveger seg, og den er knyttet til en bestemt mode. Formelen for modal masse er:

$$m = \int_0^l m(s) * \Phi_1^2(s) ds \quad (2-2)$$

Hvor:

- l er byggets lengde.
- m er byggets masse.
- Φ er svingeformen i moden.

Den største utbøying er i byggets første mode, og Φ blir dermed 1.

Demping (c)

Dempning er en prosess hvor amplituden til fritt vibrerte konstruksjoner avtar med en jevn hastighet. Som tidligere nevnt representerer dempningen energien som går tapt når konstruksjonen flytter på seg. Energien kan gå tapt i friksjon i forbindelsene, åpning og lokking av mikroskopiske sprekker eller friksjon mellom konstruksjonselementer og ikke-strukturelle elementer. Det er vanskelig å identifisere alle delene som bidrar til dempning i en konstruksjon, og dempningskoeffisienten er derfor ofte basert på målinger gjort på tilsvarende konstruksjoner.

Stivhet (k)

Som vist i ligning er det en sammenheng mellom stivheten, k , til en konstruksjon og forflytningen, u , den får dermed enheten N/m (kraft per meter). Av ligningen kan man også se at jo stivere elementet er, desto mindre blir forflytningen. Stivheten til en konstruksjon er avhengig av elastisitetsmodulen, E , til materialet og treghetsmomentet, I . Når man ser på stivheten til en konstruksjon må man se på stivheten til alle elementene og forbindelsene som holder dem sammen.

Last (p)

De dynamiske lastene kan deles i to kategorier, vedvarende og korte/tilfeldige. De vedvarende lastene kan for eksempel være roterende maskiner eller rytmiske bevegelser. De korte/tilfeldige lastene kan være støt fra en eksplosjon, jordskjelv eller vind. Felles for begge kategoriene er at lastene er varierende og tidsavhengige.

Egenfrekvens og moder

Den dynamiske responsen til en konstruksjon kan også forklares ved å se på egenfrekvensen, f , og moder, m . I modal analyse deles konstruksjonen opp i moder, i stedet for elementer og frihetsgrader som man gjør ved FEM-analyse. Hver mode har en svingeform og en egenfrekvens. Egenfrekvens til moden forteller hva frekvensen til konstruksjonen er i akkurat det punktet, mens svingeformen er formen på utbøyingen i det samme punktet. Høye bygninger kan i de fleste tilfeller bli sett på som vertikale utkragede bjelker festet til fundamentet og fri på toppen (Johansson, Linderholt, Jarnerö, & Landel, 2016).

Egenfrekvensen til regnes ut etter ligning (2-3):

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2-3)$$

ω er vinkelfrekvsen og regnes ut etter ligning **Feil! Fant ikke referanse-kilden.:**

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2-4)$$

2.1.2 Dynamiske lasters påvirkning på konstruksjoner

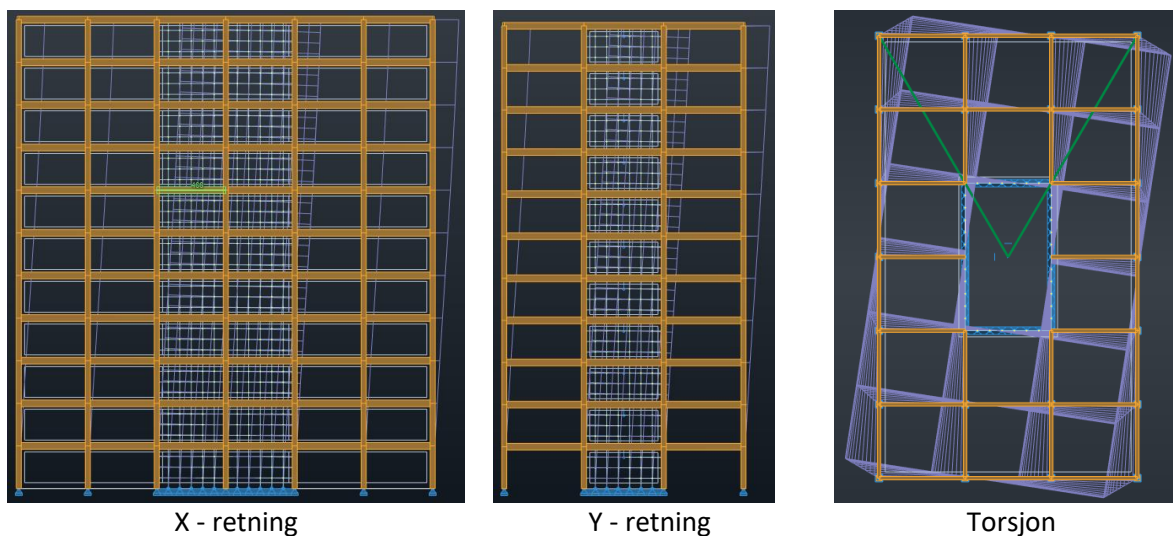
I denne oppgaven vil det kun bli sett på den dynamiske responsen til bygget forårsaket av vindlasten, da dette som regel er den dimensjonerende lasten for høye konstruksjoner i Norge. (Bergan, Larsen, & Mollestad, 1993) sier at det er tre årsaker til at dynamisk respons kan gjøre en konstruksjon uakseptabel:

1. Overskridelse av funksjonelle krav. Akselerasjonen i konstruksjonen blir så stor at det blir ukomfortabelt for mennesker å oppholde seg der.
2. De dynamiske effektene fører til så stor belastning at det fører til mekanisk skade eller sammenbrudd.
3. Utmatning av materialet på grunn av lastvekslinger.

Erfaringer fra tidligere byggeprosjekter viser at det i høye trekonstruksjoner ofte er de funksjonelle kravene som skaper problemer, det er derfor disse kravene de forskjellige modellene i denne oppgaven vil bli målt etter.

Vind

Konstruksjonens respons når den blir utsatt for en vindlast avhenger av geometrien, konstruksjonens dynamiske egenskaper, som ble gjennomgått i kapittel 2.1.1, og vindforholdene. De tre dynamiske bevegelsene forårsaket av vindlasten er svaing, i vindretning og på tvers av vinden, og torsjon, se Figur 2-2.



Figur 2-2: Dynamiske bevegelser i bygget

Akselerasjon

Konstruksjonens akselerasjon forteller hvor fort bygget begynner å bevege seg når det blir utsatt for en horisontal kraft. Standard ISO 10137 definerer komfortkravene som stilles til konstruksjonens akselerasjon og egenfrekvens. Egenfrekvensen til konstruksjonen hentes fra FEM-analyseprogrammet, mens akselerasjonen må regnet ut. Formelen for akselerasjon er hentet fra NS – EN 1991 1-4, se ligning (2-5)**Feil! Fant ikke referanse-kilden..**

$$A = \sigma_{a,x}(z) * k_p , \quad (m/s^2) \quad (2-5)$$

Hvor $\sigma_{a,x}$ er standardavviket, se ligning(2-6), for den karakteriske vindinduserte akselerasjonen i høyden z, og k_p er toppfaktoren, se ligning (2-8).

$$\sigma_{a,x}(z) = \frac{c_f * \rho * b * I_v(z_s) * v_m^2(z_s)}{m_{1,x}} * R * K_x * \Phi_{1,x}(z) \quad (2-6)$$

Hvor

- C_f er kraftfaktoren.
- ρ er lufttettheten.
- b er bredden på bygget.
- $I_v(z_s)$ er turbulensintensiteten z_s , meter, over bakken.
- $v_m(z_s)$ er den karakteristiske stedsvindhastigheten ved høyden z_s .
- z_a er referansehøyden.
- R er kvadratrotten av resonansandelen av respons.
- K_x er en konstant.
- $m_{1,x}$ er den ekvivalente masse i vindretning.
- $\Phi_{1,x}(z)$ er den fundamentale egensvingeformen i vindretning.

Formelen for utregning av ekvivalent masse er gitt i NS-EN 1991-1-4, og er vist i ligning (2-7):

$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) * \Phi_1^2(s) ds}{\int_0^l \Phi_1^2(s) ds} \quad (2-7)$$

Som en forenkling kan den ekvivalente massen regnes ut ved å ta byggets totale masse og dele på den totale høyden.

$$k_p = \sqrt{2 * \ln(v * T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 * \ln(v * T)}} \quad (2-8)$$

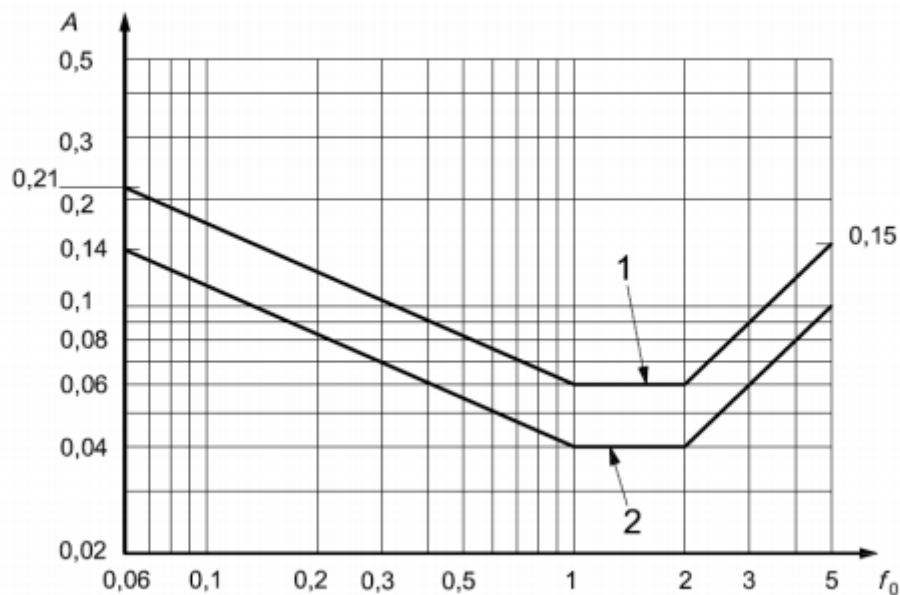
Hvor

- v er oppkryssingsfrekvensen.
- T er midlingstiden for stedsvindhastigheten.

Komfortkrav

Opplevelsen av å være i et bygg som er i bevegelse er forskjellig fra menneske til menneske, men studier viser at når frekvensen til svingningene nærmer seg 1 Hz fører det til ubehag for de som oppholder seg der. Svingninger med lav frekvens kan føre til kvalme hos noen, mens de kan føre til søvnighet hos andre. Mennesker utsatt for bevegelse med lav frekvens og akselerasjon over lang tid kan få Sopite syndrom, symptomer på dette er søvnighet, konsentrasjonsvansker, dårlig humør og redusert motivasjon (Lamb, Macefield, Darren, & Kwok, 2016). For å unngå dette er det viktig med komfortkrav for bygninger, i Norge er det kravene gitt i ISO 10137 som blir brukt, se Figur 2-3. A er toppakselerasjonen gitt i m/s^2 og f_0 er byggets fundamentale egenfrekvens for første mode. Akselerasjonen og egenfrekvens for bygget i vindretning, på tvers av vinden og torsjon plottes i

grafen, er plottet under grafen er det innenfor kravet. Kurve 1 gjelder for kontorbygg, mens kurve 2 er for boliger.



Figur 2-3: Komfortkravet for vibrasjoner forårsaket av vindlast med returperiode på 1 år (ISO (International Standard Organisation), 2007)

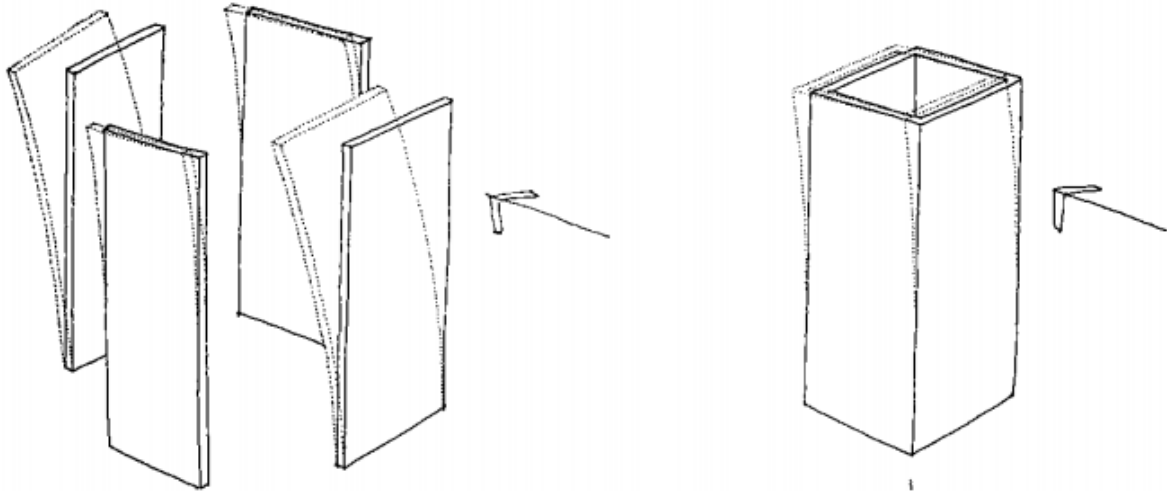
2.2 Avstivende systemer

Det finnes mange ulike systemer for avstiving mot horisontale krefter, men de er alle en kombinasjon av de tre fundamentale systemene, skjærvegger, momentstiv ramme og avstivet ramme. Hvis ikke annet er nevnt er teorien i dette kapitlet og delkapittel 2.2.1 basert på (Sandelin & Budajev, 2013) og (Juveli, 2016).

Momentstive rammer gir fleksibilitet i planløsningen, men de trenger momentstive forbindelsene som er kostbare. Ved bruk av avstivede rammer kan man få en fleksibel planløsning uten bruk av momentstive forbindelser, men i dagens design er det ønskelig med store vinduer, noe som fører til at de massive diagonalene kan virke forstyrrende i fasaden. Skjærvegger kan forstyrre fasaden hvis man ønsker en glassfasade, eller komme i veien hvis man ønsker en åpen planløsning. I kontorbygg er det behov for heis- og trappesjakter, det vil derfor være fornuftig å plassere skjærveggene rundt sjaktene som uansett vil være der. På bakgrunn av dette vil det i denne oppgaven bli sett på sammenkoblede skjærvegger, sjakter, som avstivning mot horisontale krefter.

2.2.1 Sjakt som avstivende element.

Siden skjærveggene skal plasseres i forbindelse med heis- og trappesjaktene i konstruksjonen er det interessant å se på stivhetsforskjellen for frittstående og sammenkoblede skjærvegger. For frittstående skjærvegger er det veggene som er parallelt med kraften som tilfører mest stivhet til konstruksjonen, bøyning om sterk akse. Veggene som er vinkelrett med kraften får bøyning om svak akse og tilfører ikke mye stivhet til konstruksjonen. Ved å bruke sammenkoblede skjærvegger får man utnyttet stivheten i alle veggene, se Figur 2-4.

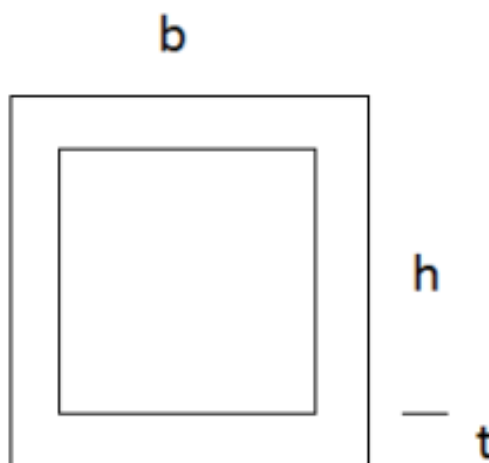


Figur 2-4: Sammenligning av bøyning for skjærvegger som ikke er sammenkoble mot de som er det når de utsettes for en horisontal last (Sandelin & Budajev, 2013)

Som tidligere nevnt avhenger stivheten til et element av elastisitetsmodulen, E , til materialet og treghetsmomentet, I . Figur 2-4 viser at stivheten til de sammenkoblede skjærveggene er større enn for de frittstående, siden det er brukt samme materiale skyldes denne forskjellen treghetsmomentet. Treghetsmomentet for frittstående skjærvegger regnes ut ved å summere treghetsmomentet til hvert element, se Figur 2-5, mens treghetsmomentet for sammenkoblede skjærvegger regnes ut ved se på det som et solid rektangel for deretter å trekke fra tomrommet, se Figur 2-6.

$$I = 2 * \frac{tb^3}{12} + 2 * \frac{(h - 2t) * t^3}{12} \quad (2-9)$$

Figur 2-5: Utregning av treghetsmoment for frittstående skjærvegger (Sandelin & Budajev, 2013)



$$I = \frac{h * b^3}{12} - \frac{(h - 2t) * (b - 2t)^3}{12} \quad (2-10)$$

Figur 2-6: Utregning av treghetsmoment for sammenkoblede skjærvegger (Sandelin & Budajev, 2013)

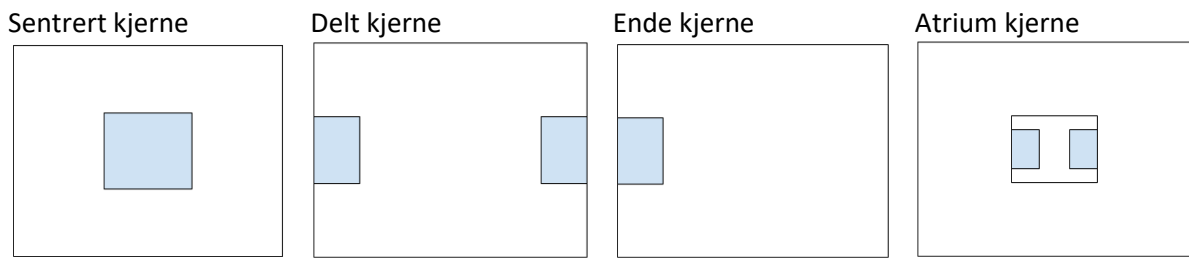
Treghetsmomentet for sammenkoblede skjærvegger vil alltid være større enn for frittstående og forholdet mellom dem øker når tykkelsen, t , minker. For sjakter plassert i et bygg med en svak og en sterk retning kan man av ligning (2-10) se at det vil være fordelaktig å orientere sjakten slik at den lengste sjaktveggen er i byggets svake retning, altså at den har størst veggareal i byggets svake retning.

2.2.2 Plassering og utforming av sjakter

Ved bestemmelse av størrelse og plassering av sjakten er det flere faktorer som virker inn, krav til rømningsveier, at det er lett å bevege seg mellom etasjene og at planløsning passer til de kravene brukerne av bygget har (Yeang, 2000). I boligbygg er det ofte ikke noe problem å få plassert skjærvegger og sjakter som kan ta de horisontale kreftene. I kontorbygg derimot er det ofte krav fra brukerne om en mer fleksibel planløsning med store åpne flater som kan innredes etter behov. En vanlig løsning i kontorbygg er derfor å samle alt som kan transportere arbeiderne mellom etasjene, trapper og heiser, toaletter og tekniske rom i sjakter. Disse sjaktene kan brukes til å tilføre bygget den nødvendige stivheten det trenger for å motstå de horisontale kreftene (Khajehpour, 2001).

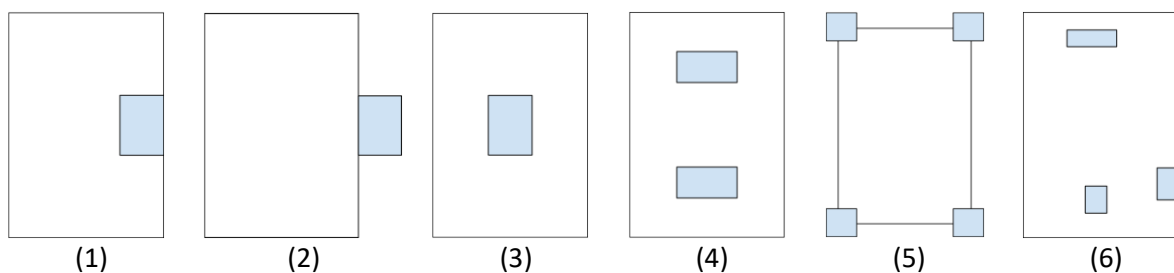
For å finne ulike løsninger på plassering og utforming av sjaktene er det gjort et litteraturstudie. Litteraturstudiet har vært todelt, i den første delen er det sett på teoretiske plasseringer og utforminger av sjakter, mens det i den andre delen er sett sjakt plasseringer i planlagte eller bygde trehus hvor sjakten tar alle de horisontale kreftene.

I første del av litteraturstudiet er det sett på løsningene fra (Yeang, 2000) og (Allen & Iano, 2007). I følge (Yeang, 2000) kan plasseringen av sjakten deles inn i fire hovedgrupper, sentrert sjakt, delt sjakt, ende sjakt og atrium sjakt, se Figur 2-7, og alle andre plasseringer og utforminger er en variant av disse. Atrium er et åpent rom i senter av bygget uten tak, og er ikke en løsning det blir sett videre på i denne oppgaven.



Figur 2-7: Plassering av kjerne, basert på (Yeang, 2000)

(Allen & Iano, 2007) viser til en tabell fra (McGuinness, Stein, Stein, & Reynolds, 1987) hvor det gjøres en rangering av de ulike sjaktplasseringene vist i Figur 2-8. Ved bedømmelse av de ulike løsningene blir det sett på fleksibilitet i planløsningen, omkrets for utleieområde, hvor stor plass sjakten opptar av byggets grunnflate, gangavstand til sjakten, sirkulasjon, dagslys og sikt, innfestning til tak og grunn og brukbarhet som horisontalt avstivningssystem.



Figur 2-8: Sjaktplasseringer evaluert i (McGuinness, Stein, Stein, & Reynolds, 1987).

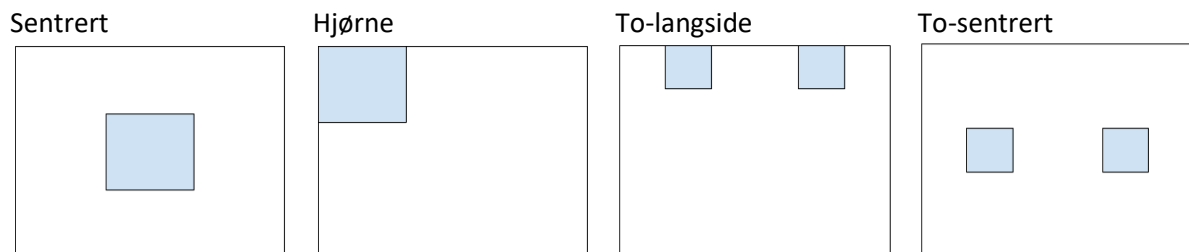
For horisontal avstivning er det plassering 3 og 4 i Figur 2-8 som blir rangert best, plassering 5 kommer på tredje plass etterfulgt av nummer 6, 1 og 2. Totalt i rangeringen er det plassering 4 som kommer best ut etterfulgt av nummer 3 på andre plass, det er delt tredje plass mellom 1, 2 og 5, og nummer 6 kommer dårligst ut når man ser på totalen.

I den andre delen av litteraturstudiet er det sett på plassering av sjakter i høye trehus. Det er tatt utgangspunkt i litteraturstudiene gjort av (Juveli, 2016) og (Reidel, 2019), men det er her kun sett på byggene hvor sjakter i betong eller massivtre tar de horisontale kreftene og bjelker og søyler i tre tar de vertikale kreftene. Resultatene viser at det hovedsakelig er brukt kjerner i betong. Når det gjelder plassering og utforming er det ofte en eller to sentrerte kjerner, se **Feil! Fant ikke referanseilden..** Tabellen viser hvor bygget ligger, hvor mange etasjer det har, hvor høyt det er, om det er ferdigstilt, under bygging eller planlagt og hvor kjernen er plassert og hvilket materiale den er laget av.

Forklaring til plassering fra **Feil! Fant ikke referanseilden..** kan sees i Figur 2-9, merk at ikke alle byggene er kvadratiske i virkeligheten, men det er illustrert slik for å enkelt kunne forklare hva som menes med de forskjellige plasseringene.

Tabell 2-1: Utvalg av bygninger med heis- og trappesjakt som stabilisering mot laterale krefter

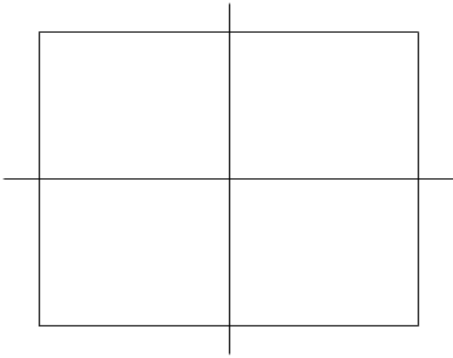
Navn/Sted	Land	Etasjer	Høyde [m]	Status	Plassering og materiale	Kilde
T3	USA	7	25,9	Ferdig 2016	Sentrert, betong	(Schoof, 2017)
The Wood Innovation and Design Centre	Canada	7	29,5	Ferdig 2014	Sentrert, CLT	(Green, 2017)
Life Cycle Tower One	Østerrike	8	-	Ferdig 2012	Hjørne, betong	(Green, 2017)
17-21 Wenlock road mixed-use building	England	10	-	Ferdig 2015	Sentrert, betong	(Green, 2017)
Harbourside	Canada	11	-	Planlagt	-, CLT	(Green, 2017)
Brock Commons	Canada	18	53	Ferdig 2017	To-langside, betong	(Moudgil, 2014)
HoHo Vienna	Østerrike	24	84	2017/2018	betong	(Timber design & technology, 2015)
Västerbroplan	Sverige	34	-	Planlagt	To-sentrert, betong	(CF Møller Architects, 2019)



Figur 2-9: Forklaring plasseringer fra **Feil! Fant ikke referanse-kilden.**

Av **Feil! Fant ikke referanse-kilden.** ser man at kjernen er plassert asymmetrisk i Life Cykle Tower One og Brock Commons, i begge byggene består kjernen av betong. Det er gjort en studie hvor det er sett på muligheten ved å bruke kjerner av KLT i stedet for betong i Brock Commons, hvor kjernene i KLT har samme posisjon og dimensjoner som de eksisterende i betong. Resultat av denne studien viser at det vil oppstå torsjon i bygget. For å motvirke torsjonen blir tykkelsen på KLT elementene økt, og det blir lagt til skjærvegger (Moudgil, 2014).

Flere av plasseringene nevnt over har en asymmetrisk plassering, altså er det ikke symmetri om symmetriaksene vist i Figur 2-10. Med symmetri menes at hvis man «bretter» bygget om symmetriaksen skal de to sidene være speilvendt av hverandre.



Figur 2-10: Symmetriaksene til et kvadrat

Når plasseringene er symmetriske er byggets massesenter og stivhetssenter i samme punkt, i krysningspunktet mellom symmetriaksene vist i Figur 2-10. Ved asymmetrisk plassering er ikke byggets massesenter og stivhetssenter i samme punkt og det vil oppstå torsjon i bygget når det utsettes for en horisontal last (Khajehpour, 2001).

Resultater fra masteroppgaven til Anette Juveli viser at byggets stivhet øker når kjernen plasseres i senter av bygget heller enn langs ytterveggen (Juveli, 2016). En oppgave fra Gjøvik skrevet våren 2019 viser at ved bruk av to sjakter er det en fordel, når man ser på de dynamiske egenskapene, å flytte sjaktene lenger fra hverandre (Kvarberg & Grosch, 2019).

2.3 Massivtre som konstruksjonsmateriale

Massivtreelementer består av lameller (planker) som er satt sammen til større elementer med spiker, skruer, tredybler, lim eller stålstag. Det er tre typer massivtreelementer, kantstilte-, krysslagte- og hulromselementer (SINTEF, 2001). De krysslagte massivtreelementene, heretter referert til som KLT, gir stor fleksibilitet i planløsningen. På grunn av de krysslagte sjiktene overføres belastningen langs to akser, biaksial belastning (Stora Enso Wood Products GmbH, 2015), hvilket fører til at elementene kan oppta store punktbelastninger (Treteknisk, 2006). Belastet normalt på planet fungerer KLT elementet som en plate, men brukt som vegger for å virke avstivende mot de horisontale kreftene fungerer de som en skive (Juveli, 2016).

2.3.1 Oppbygging av KLT – elementer

KLT elementene som benyttes i denne oppgaven produseres av Stora Enso, og alle verdiene som blir brukt er hentet fra Stora Enso CLT, Teknisk brosjyre utgitt i mars 2015 (Stora Enso Wood Products GmbH, 2015). Elementene er bygd opp ved at lamellsjiktene limes sammen med en 90 graders vinkel mellom sjiktene. Tykkelsen på sjiktene, og hvor mange sjikt som trengs varierer ut ifra de kravene som stilles til elementet for å oppnå tilstrekkelig styrke og stivhet (Juveli, 2016). Elementene fra Stora Enso kommer i tykkelser fra 60 til 320 mm, de har tre, fem, syv eller åtte sjikt, maksimal bredde på elementene er 2,95 m og maksimal lengde er 16 m (Stora Enso Wood Products GmbH, 2015). Transport fra fabrikk til byggeplass er den begrensende faktoren for hvor store KLT elementer kan være.

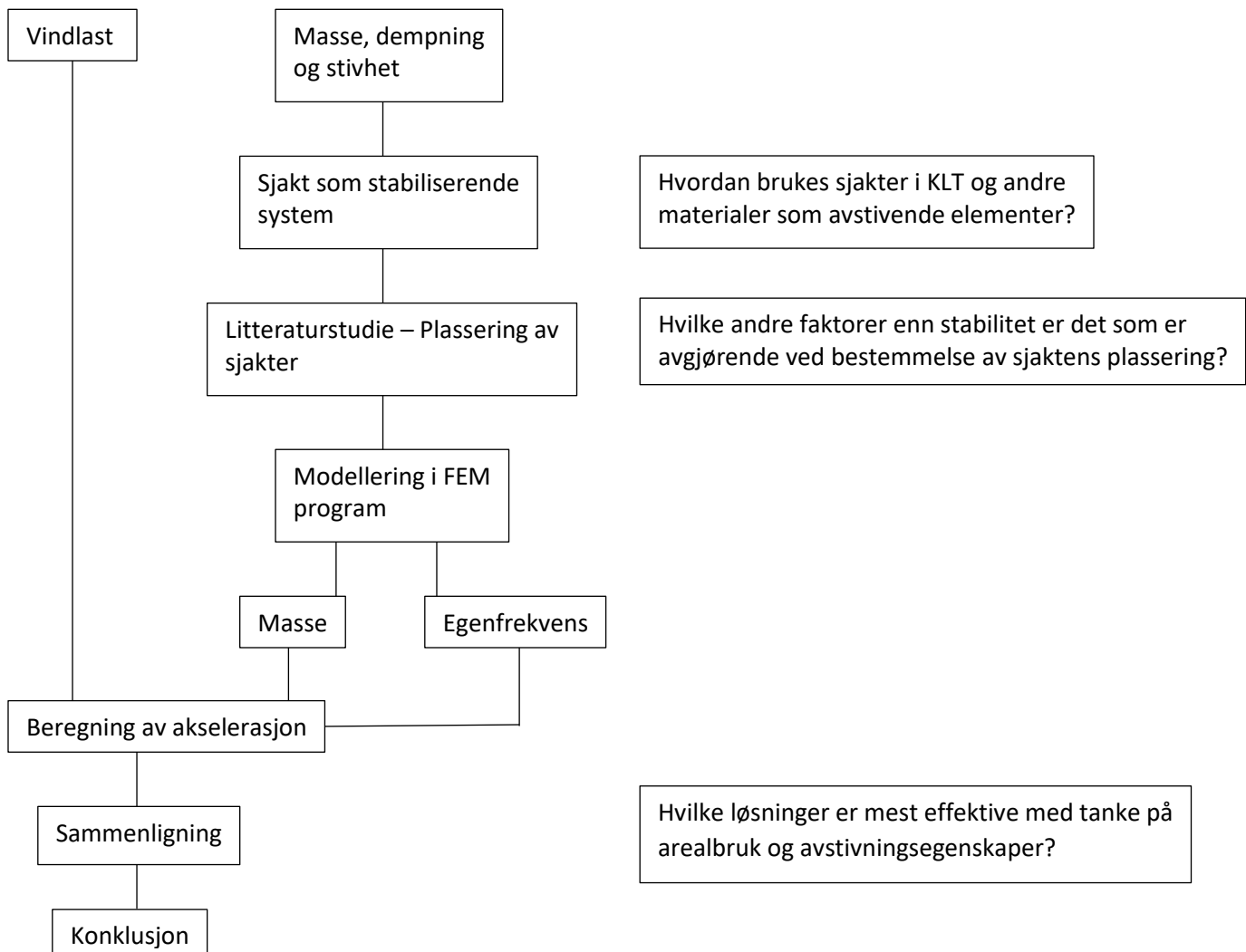
E – modulen til KLT elementer regnes ut etter hvor stor del av tverrsnittet som er orientert i samme retning som den påførte kraften.

3 Metode

Dette kapitlet vil ta for seg gjennomføringen av oppgaven. Det vil bli sett på hvilke valg som er tatt for å kunne svare på problemstillingen, med bakgrunn i teorien fra forrige kapittel. Det vil bli utarbeidet et eksempelbygg, deretter vil det bli satt opp flere modeller som ser på ulike løsninger for plassering og utforming av sjaktene. Modellene skal analyseres i et FEM-program, hvor de verdiene som trengs for å sammenligne løsningene blir hentet, kapitlet inneholder dermed også en gjennomgang om hvordan man går fram for å finne disse verdiene.

3.1 Forskningsstrategi

Forskningsstrategien, som er vist i Figur 3-1, tar for seg de ulike stegene som er tatt for å komme fram til et svar på problemstillingen. For å komme fram til et svar på problemstillingen ble det i kapittel 1 satt opp tre delspørsmål, de er listet opp til høyre i figuren.

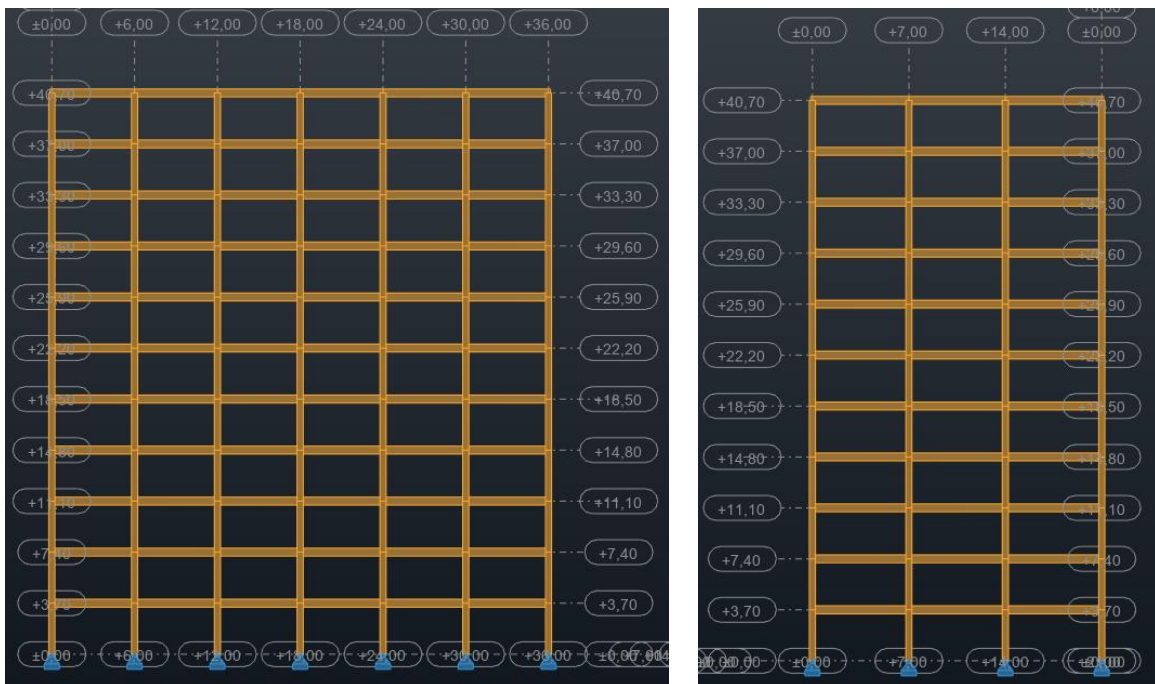


Figur 3-1: Forskningsstrategi

3.2 Case

For å kunne svare på problemstillingen er det satt opp et eksempelbygg i samarbeid med Ny Struktur som skal analyseres. Dimensjonene på bygget, lengde, bredde og etasjehøyden, er basert på erfaringer de har fra tidligere prosjekter. Bygget har en grunnflate på 36mx21m og etasjehøyden er satt til 3,7 meter. Bjelke- og søylesystemet har et spenn på 6 meter i lengderetning og 7 meter i bredderetning, se Figur 3-2. Med denne søyleavstanden kan man bygge i heltre uten at man får veldig høye limtrebjelker og tykke dekker.

Bygget er planlagt plassert langs ring 1 i Oslo, da dette er et område hvor det eksisterer og bygges en del kontorbygg. I kommuneplanen til Oslo kommune fra 2015 står det at det kan bygges med en gesimshøyde på inntil 42 meter i dette området (Oslo kommune, 2015). Antall etasjer på eksempelbygget settes dermed til 11, hvilket fører til at bygget blir 40,7 meter høyt. I analysen vil det også bli gjort tester av et bygg med 22 etasjer, dette er for å se om høyden på bygget har innvirkning på forskjellene i dynamisk respons for de ulike løsningene. I tillegg til lokale bestemmelser på byggehøyde har byggets plassering betydning for utregning av vindlasten. I realiteten vill denne plasseringen føre til at terrengruhetskategori 4 skal benyttes, men som er konservativ tilnærming, og at resultatene skal være gjeldende for større deler av Østlandet, er det valgt å benytte terrengruhetskategori 2. En annen konservativ tilnærming når det gjelder vindlasten er at den regnes som jevnt fordelt i hele byggets høyde, referansehøyden er satt lik høyden til bygget for hele veggen, det er altså ikke sett på fordeling av hastighetstrykk for lesiden.



Figur 3-2: Bjelke-søylesystemet til eksempelbygget

Bjelke- og søylesystemet til eksempelbygget er ikke dimensjonert, men det er sjekket opp mot et tidligere prosjekt Ny Struktur har hatt, og de valgte dimensjonene skal være tilstrekkelige for et bygg på 11- 15 etasjer. Det er ikke gjort endringer i søyletverrsnittet for modellene med 22 etasjer, men det ansees heller ikke som nødvendig da det har liten innvirkning på resultatene i oppgaven.

Byggets grunnflate fører til at det får en sterk og en svak retning, byggets sterke retning er i lengderetning, bildet til venstre i Figur 3-2, og den svake retningen blir i byggets bredderetning, bildet til høyre.

3.3 Modellenes oppbygning

For å kunne besvare delspørsmål fire blir det brukt et FEM – program til å finne massen og egenfrekvensen til de ulike modellene. Dette er verdier som er nødvendige for å beregne akselerasjonen til bygget. Ved å benytte et FEM – program til å gjøre beregningene er det enkelt å gjøre mindre justeringer fra modell til modell, og analysen vil ta mindre tid enn hvis man skulle gjort det for hånd.

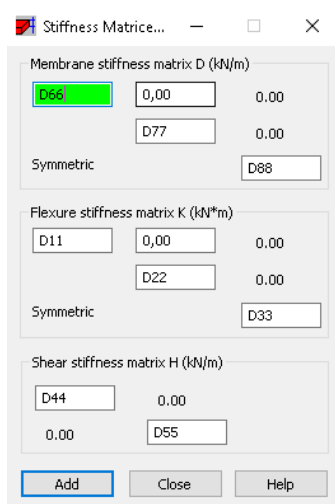
Programmet som er brukt i analysen er «Autodesk Robot Structural Analysis», heretter referert til som Robot. Valget falt på dette programmet fordi man som student kan man laste ned en gratisversjon av programmet, det er lett å sette seg inn i og det finnes mye informasjon på nett hvis det skulle oppstå problemer.

Målet med oppgaven er å se hvordan den dynamiske oppførselen endres når plasseringen og utformingen til sjaktene endres. For å få til dette er det viktig at all stivheten i bygget kommer fra sjaktene. Bjelke-søyleforbindelsene modelleres derfor som leddede, dette gjøres ved å definere releasene som pinned-pinned. Etasjeskillene skal kun overføre krefter til sjaktene og modelleres derfor som uendelig stive i x-og y-retning, rigid diaphragm. Sjaktene modelleres som sammenkoblede, teorien viser at det øker stivheten. For å kontrollere at all stivheten ligger i sjaktene blir det gjort en kontroll av den første modellen. Dette gjøres ved at den først gjøres en analyse med bjelke- og søylesystemet og etasjeskillene, deretter gjøres det en analyse hvor lasten som virket på hele veggen nå kun virker på sjakten, hvis deformasjonen blir den samme er det modellert riktig (Kvarberg & Grosch, 2019).

Bjolkene og søylene består av limtre, etasjeskillene og sjaktveggene er av KLT. Limtrekvalitetene ligger alt inne som materialvalg i Robot, men KLT – elementene må defineres. Det gjøres ved å definere en ny «thickness» i Robot, for så å legge inn stivhetsmatrisen. Massivtreets egenskaper varierer ut ifra tykkelse og antall sjikt, og det må dermed opprettes et nytt materiale for hver elementtype som brukes i analysen. Det er interessant å se hvordan stivheten til konstruksjonen forandres når elementtypen endres, det er derfor valgt å se på to ulike typer KLT – elementer, KLT 160 L5s og KLT 220 L7s-2. Dekkene vil alltid være KLT 220 L7s-2. I teorikapittelet ble det vist at KLT – elementene har ulik e-modul ut ifra hvordan de er orientert, så elementene defineres slik at de har størst e-modul i den retningen kraften virker. Tabell 3-1 viser verdiene som brukes til å definere elementene, mens Figur 3-3 viser hvor de ulike verdiene skal plasseres når elementene defineres. Verdiene i stivhetsmatrisen er hentet fra Stora Enso's katalog (Stora Enso, 2015).

Tabell 3-1: Stivhetsmatrise Stora Enso CLT

Element	D11	D22	D33	D44	D55	D66	D77	D88
KLT 160 L5s	3 800	466,7	153,1	17638	4 704	1 500 000	500 000	77 280
KLT 220 L7s-s	10 115,9	975	398	21 319	7 509	2 000 000	750 000	106 260



Figur 3-3: Definerings av stivhetsmatrise i Robot

Som tidligere nevnt er formålet med FEM – analysen å finne byggets masse og egenfrekvens. Byggets totale masse består av dets egen- og nyttelast. Egenlasten blir regnet ut av Robot ut ifra de elementene som er lagt inn, 280x585mm² bjelker og 450x450mm² søyler i GL30c, etasjeskille med en tykkelse på 220 mm med kvalitet C24 og sjaktvekker som enten har en tykkelse på 160 mm eller 220 mm, begge med kvalitet C24. I realiteten vil bygget ha en høyere egenlast, blant annet vil vekten av kledning, isolasjon og vinduer bli regnet med. Det er valgt å ikke legge på en ekstra egenlast for å kompensere for tillegg disse elementene vil gi til den totale massen, analysen gir dermed et konservativt svar.

I tillegg til egenlasten blir det lagt på en nyttelast. De karakteristiske nyttelastene er definert i NS-EN 1991-1-1 tabell NA.6.2 og er for kontorbygg er den satt til 3,0kN/m². Når dynamiske laster kan forårsake frekvenser som overskrider komfortkravet skal det ifølge NS-EN 1990 5.1.3 (7) gjøres en sensitivitetsanalyse, og ifølge tabell NA.A1 i NS-EN 1990 er det da kun 30% av nyttelasten som skal tas med i beregningen av byggets totale masse.

I denne oppgaven er det kun den dynamiske responsen forårsaket av vindlast som blir betraktet. Vindlasten er regnet ut etter NS – EN 1991-1-4. Referansevindhastigheten til et bygg plassert i Oslo er 22 m/s, og som tidligere nevnt benyttes det terrengruhekategori 2. Dette fører til at vindlasten på bygget er 1,35kN/m² for bygget med 11 etasjer og 1,68kN/m² for bygget med 22 etasjer. Det blir kun testet for vind i byggets svake retning.

I analysen har det ikke blitt sett på fundamentene, men det er modellert med punkttopplag under søylene og linjeopplag under veggene. Opplagene som er lagt inn tillater rotasjon, men forhindrer forflytning i x-, y- og z-retning.

3.4 Modellene

I oppgaven skal det undersøkes hvordan plassering og utforming av sjakter påvirker den dynamiske oppførselen til høye trehus, for å gjøre dette er det satt opp flere testmodeller med utgangspunkt i teorien fra forrige kapittel. Alle modellene tar utgangspunkt i bjelke- og søylesystemet presentert i kapittel 3.2. For å kunne sammenligne resultatene fra de ulike modellene er arealet av sjaktveggene konstant, men det testet med veggtykkelse på 160mm og 220mm for å se hvordan økt veggtykkelse påvirker forskjellen for de ulike løsningene. For å unngå torsjon i bygget er det kun sett på symmetriske løsninger.

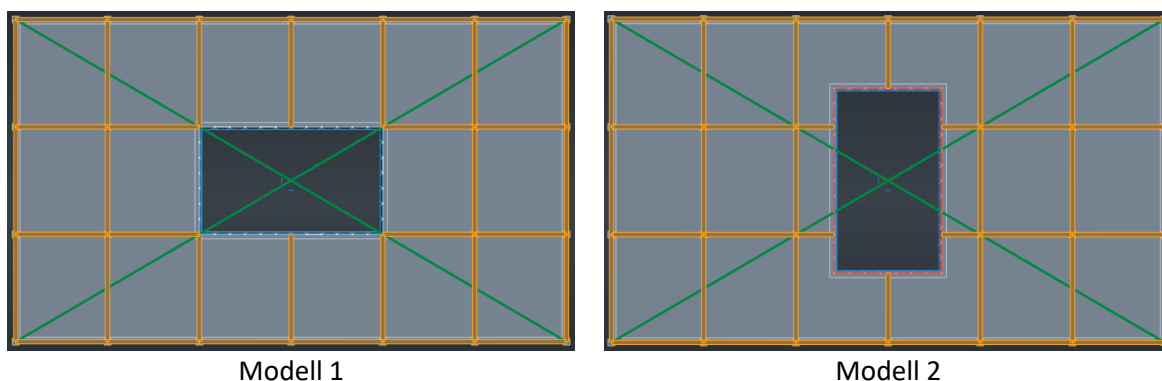
Det skal analyseres totalt 13 modeller, hver av modellene blir testet med 11 etasjer og veggtykkelse på 160mm og 220mm, og 22 etasjer med veggtykkelse på 160mm og 220mm. Modellene deles inn i tre grupper, modeller med en, to eller fire sjakter. En illustrasjon av modellene samt en kort beskrivelse av hvorfor de skal testes kommer under.

3.4.1 Modeller med en sjakt

Modellene i dette kapitlet har en sjakt som er plassert i senter av bygget. Sjaktstørrelsen er satt opp i samarbeid med Ny Struktur, og den er stor nok til å kunne romme to heiser, en trapp og teknisk rom. Veggarealet fra denne sjakten benyttes når sjaktstørrelsen til modellene med to og fire sjakter skal bestemmes.

Modell 1, se Figur 3-4, har en sjakt plassert i senter av bygget, og er orientert med størst veggareal i byggets sterke retning. Den er 12 meter i lengderetning og 7 meter i bredderetning. Dimensjonene på sjakten gjør at den enkelt kan modelleres etter byggets bjelke- og søylesystem.

Teorien tilsier at det er ønskelig med størst veggareal i byggets svake retning, for å sjekke om dette stemmer utarbeides modell 2, se Figur 3-4, hvor sjakten fra modell 1 er orientert slik at den får størst veggareal i byggets svake retning.



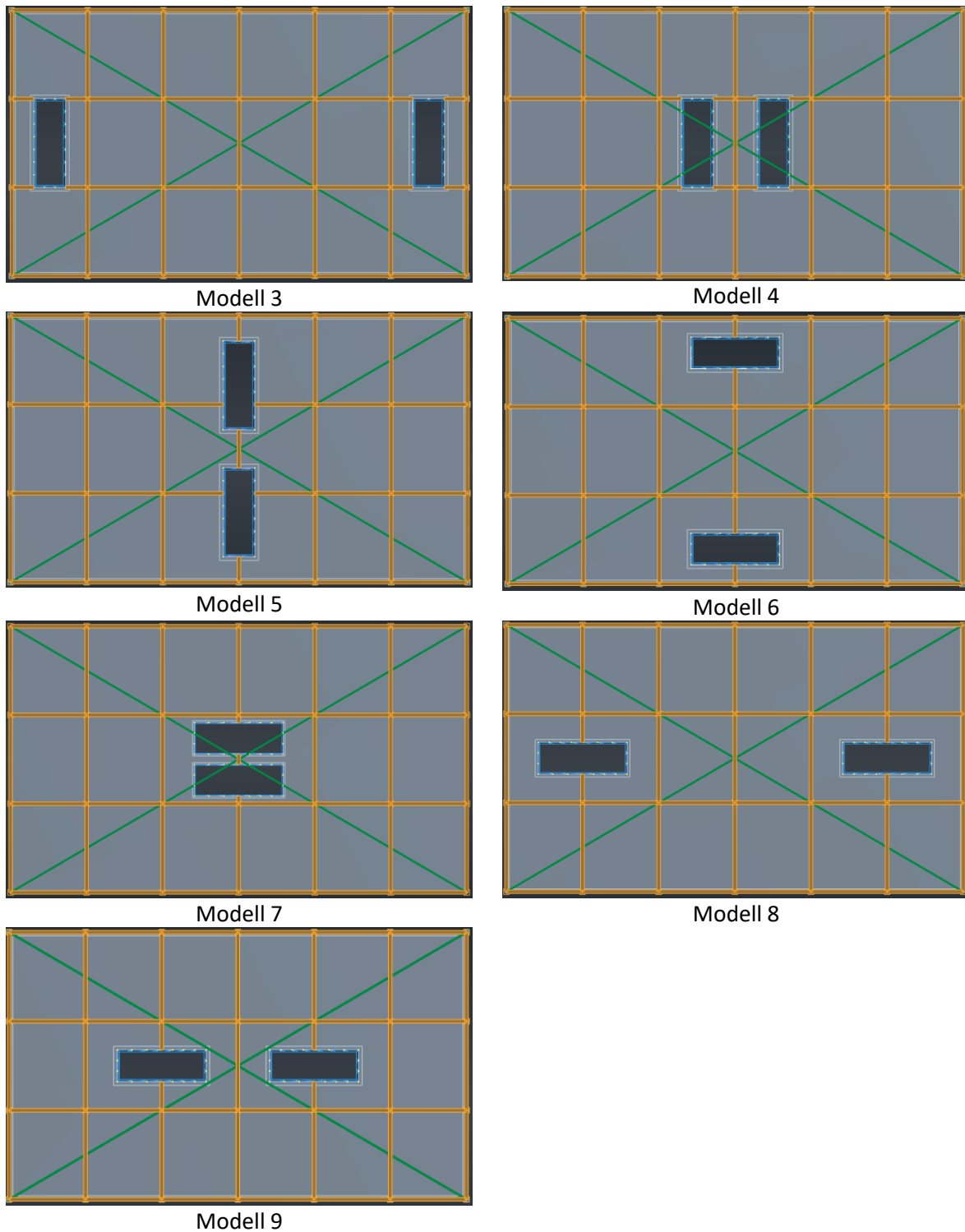
Figur 3-4: Oversikt over modellene med en sjakt

3.4.2 Modeller med to sjakter

Som teorien tilsier kan det noen ganger være ønskelig med to separerte sjakter i stedet for 1, og alle modellene som presenteres i dette kapitlet har derfor to sjakter. Resultater fra en tidligere oppgave viser at akselerasjonen blir lavere ved å benytte seg av bredt plasserte sjakter (Kvarberg & Grosch, 2019), som i modell 3, i stedet for to som er plassert nærmere senter som i modell 4, se Figur 3-5. I oppgaven til Kvarberg og Grosch ble det kun testet å flytte sjaktene lenger fra hverandre i byggets lengderetning, og det er dermed interessant å se om det gir samme effekt å flytte sjaktene fra hverandre i bygget bredderetning, som vist i modell 6 og 7 Figur 3-5.

Det totale arealet av sjaktveggene i hver av disse modellene skal være det samme som den ene sjakten fra forrige delkapittel. Av modellene i Figur 3-5 kan man se at det er stor forskjell på lengden av sjaktveggen i dens sterke og svake retning. Dette vil antakeligvis føre til at man for modell 3, 4 og 5 får betydelig høyere akselerasjon i byggets sterke retning enn hva som er ønskelig. Det er likevel valgt å modellere sjaktene på denne måten for å tydeliggjøre eventuelle forskjeller som oppstår når sjakten flyttes. Modell 3, 4 og 5 har mange og lange skjærvegger i byggets svake retning, siden det er i denne retningen vi ønsker å undersøke byggets akselerasjon blir det undersøkt om analysen gir

samme indikasjon på sjaktens plassering når den er orientert andre veien, se modell 8 og 9 Figur 3-5.

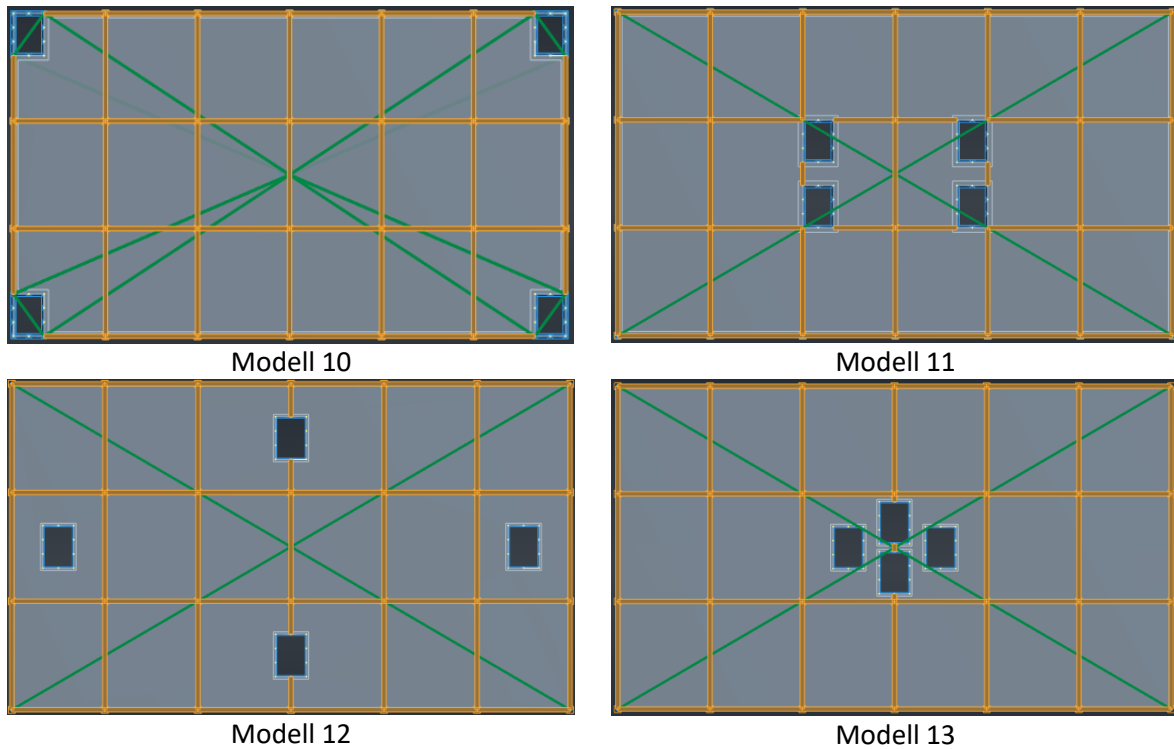


Figur 3-5: Oversikt over modellene med to sjakter

3.4.3 Modeller med fire sjakter

Modellene i dette delkapittelet har fire sjakter. I teorien ble det sett på hvorfor det noen ganger kan være ønskelig med fire sjakter i stedet for en eller to. Også for disse modellene skal det totale arealet av sjaktveggene være det samme som for modell 1. I motsetning til sjaktene i modell 3-9 har sjaktene i modell 10-13 en mer kvadratisk form, se Figur 3-6.

I teorien ble det vist til at resultater fra en annen oppgave viste at det ved bruk av to kjerner hadde en effekt å flytte kjernene lenger fra hverandre, og det er dermed interessant å se om man får den samme effekten ved bruk av fire sjakter. I modell 10 og 11 er sjaktene plassert mot hjørnene i konstruksjonen, mens i modell 12 og 13 er de plassert mot veggene, se Figur 3-6.



Figur 3-6: Oversikt over modellene med fire sjakter

3.5 Beregning av akselerasjon

Etter at analysen av de ulike modellene er gjort i Robot skal akselerasjonen i toppen av bygget regnes ut for hver av modellene. Akselerasjonen regnes ut etter ligning (2-5) fra teorikapittelet:

$$A = \sigma_{a,x}(z) * k_p , \quad (m/s^2) \quad (2-5)$$

Standardavviket, $\sigma_{a,x}$, regnes ut etter ligning (2-6):

$$\sigma_{a,x}(z) = \frac{c_f * \rho * b * I_v(z_s) * v_m^2(z_s)}{m_{1,x}} * R * K_x * \Phi_{1,x}(z) \quad (2-6)$$

Og toppfaktoren, k_p , regnes ut etter ligning (2-8):

$$k_p = \sqrt{2 * \ln(v * T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 * \ln(v * T)}} \quad (2-8)$$

Formlene settes opp i et Excel-ark for å gjøre det enklere å regne ut akselerasjonen for alle modellene. Vedlegg A viser utregning av akselerasjonen for modell 1.1

Det er ingen standardverdier for konstruksjonsdempning i trehus, det er derfor valgt å benytte den laveste konstruksjonsdempningen for trebruer fra NS-EN 1991-1-4, som er 0,06.

3.6 Verifisering av modellen

Fra kapittel 3.3 kan man se at det skal kontrolleres at det er modellert korrekt ved å se på utbøyingen for en modell med en sjakt med bjelke- og søylesystemet, for så å undersøke om man får samme deformasjon ved å kun se deformasjonen til en sjakt. En annen kontroll for å se på sjakten som en utkragerbjelke fast innspent i bunnen for så å regne deformasjonen av denne. Deformasjonen av en utkragerbjelke regnes ut etter ligning (3-1):

$$\frac{q * L^4}{8 * E * I} \quad (3-1)$$

Q er linjelasten som blir påført sjakten, den er 1,35kN/m² ganget med byggets bredde og en kombinasjonsfaktor på 1,5. Treghetsmomentet regnes ut etter ligning (3-2):

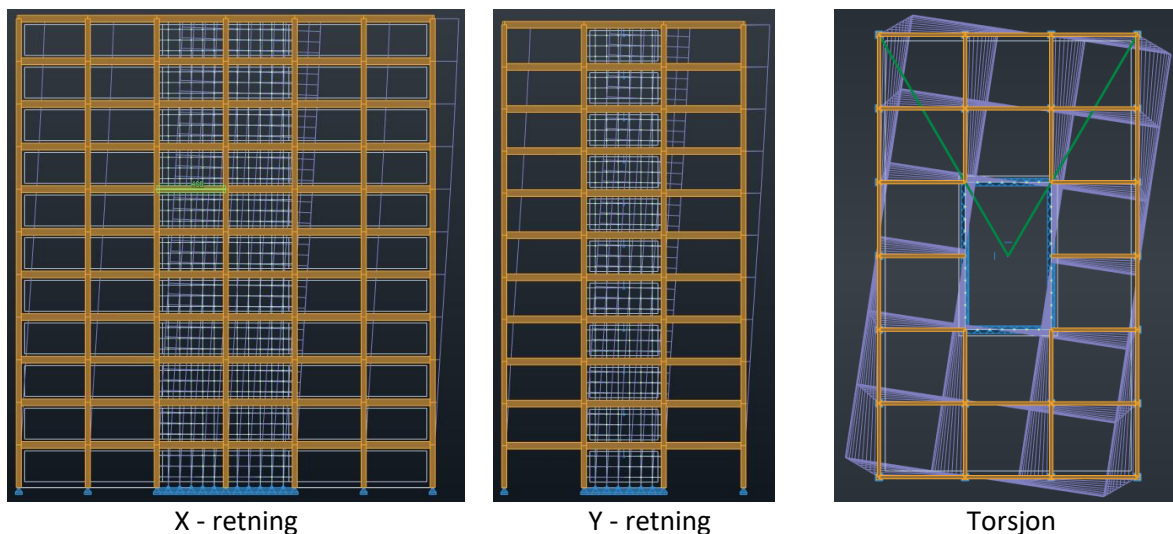
$$I = \frac{h * b^3}{12} - \frac{(h - 2t) * (b - 2t)^3}{12} \quad (3-2)$$

4 Resultater og analyse

I dette kapittelet vil resultatene fra de ulike løsningene fra forrige kapittel presenteres. Det vil også bli gjort en analyse av disse resultatene for å kunne besvare det fjerde delspørsmålet.

Løsningene er delt inn i tre grupper, modeller med en, to og fire kjerner. Først blir resultatene med likt antall kjerner presentert, deretter blir disse sammenlignet før det til slutt blir gjort en sammenligning av alle resultatene.

Modalanalysen i Robot oppgir egenfrekvensen til første svingeform i X- og Y-retning og for torsjon, se Figur 4-1.



Figur 4-1: Første mode i X- og Y-retning og torsjon

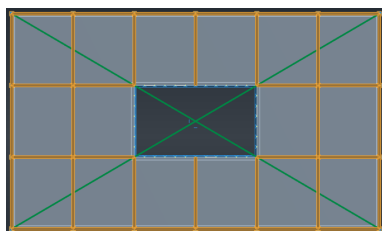
Det antas at vinden er full korrelert langs byggets lengde og bredde, og det vil dermed ikke kunne oppstå torsjon i første svingeform (Juveli, 2016). Det er kun akselerasjonen i toppen av bygget som er beregnet da det for første svingeform er der den største utbøyning er. For å kunne beregne akselerasjonen må verdiene for byggets egenfrekvens og totale masse hentes fra Robot, den totale massen regnes så om til ekvivalent masse etter formel FORMEL. Stivheten til bygget regnes ut etter ligning ... FORMEL!! Resultatene fra analysene blir presentert i tabeller, hvor antall etasjer, tykkelse på skjærvegger, total masse, egenfrekvens i X- og Y-retning, byggets stivhet i y – retning, ekvivalent masse og akselerasjonen i X- og Y-retning er listet opp. I tillegg til tabellen blir resultatene presentert grafisk i et plott med kurven til komfortkravet for kontorbygg. Det er et plott for løsningene med 11 etasjer og skjærveggtykkelse på 160mm, et for løsningene for 11 etasjer og skjærveggtykkelse på 220 mm, et for løsningene med 22 etasjer og skjærveggtykkelse på 160 mm og et med løsningene med 22 etasjer og skjærveggtykkelse på 220 mm. Det er valgt å kun plote verdiene for akselerasjon i y – retning.

Resultatene fra analysen til de ulike modellene plottes mot ISO – kurven for komfortkrav fra teorikapittelet. Selv om modellene ikke skal evalueres etter dette kravet er det valgt å gjøre det for å gi et bedre bilde av hvordan plasseringen og utformingen påvirker byggets dynamiske oppførsel.

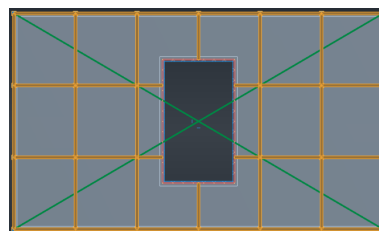
4.1 Modeller med en sjakt

Tabell 4-1: Resultater for modellene med en kjerne

Modell	Antall etasjer	Vegg - tykkelse	Total masse	f_x	f_y	Ekvivalent masse	Stivhet	A_x	A_y
M1.1	11	160	1 589 695,47	1,00	0,69	39 058,86	734 137,56	0,115	0,181
M1.2	11	220	1 622 438,07	1,15	0,80	39 863,34	1 007 194,70	0,094	0,148
M1.3	22	160	3 180 394,55	0,36	0,24	39 071,19	88 846,19	0,308	0,466
M1.4	22	220	3 246 256,10	0,42	0,28	39 880,30	123 433,82	0,254	0,393
M2.1	11	160	1 612 722,93	0,68	0,99	39 624,64	1 533 188,23	0,182	0,114
M2.2	11	220	1 645 438,23	0,79	1,15	40 428,46	2 110 778,16	0,148	0,093
M2.3	22	160	3 226 522,27	0,24	0,36	39 637,87	202 803,29	0,460	0,303
M2.4	22	220	3 292 356,52	0,28	0,41	40 446,64	268 416,93	0,387	0,257

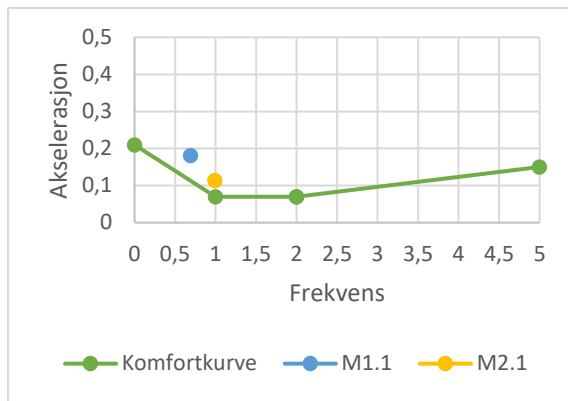


Modell 1

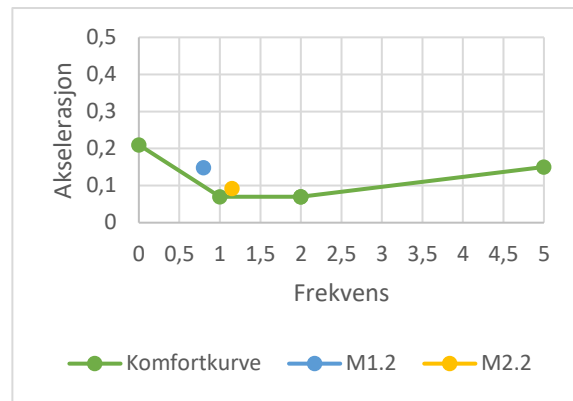


Modell 2

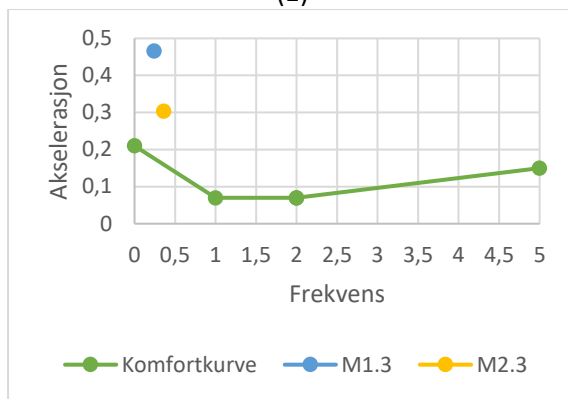
Figur 4-2: Modellene med en sjakt



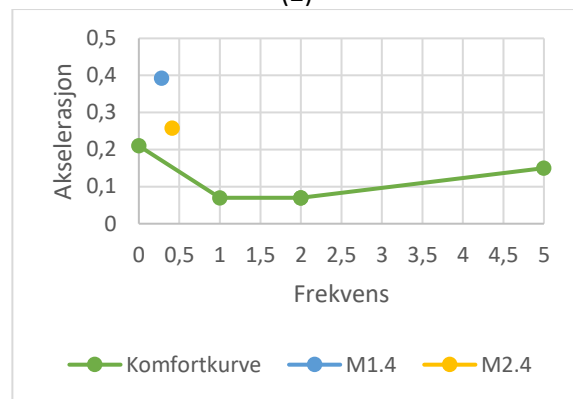
(1)



(2)



(3)



(4)

Figur 4-3: Plott av resultatene for modellene med en kjerne

Av Figur 4-3 og resultatene i Tabell 4-1 kan man se at byggets stivhet endres drastisk når sjakten orienteres slik at den har størst stivhet i byggets svake retning. Ved å sammenligne de fire grafene i Figur 4-3 kan man se at effekten av å endre sjaktens orientering øker i takt med høyden på bygget. Grafene viser også at sjaktens orientering har større innvirkning på stivheten til bygget for bygget med 22 etasjer enn bygget med 11 etasjer.

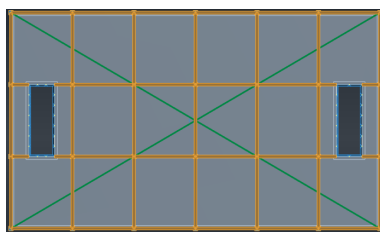
4.2 Modeller med to kjerner

For modellene med to sjakter er det valgt å dele resultatene i to, en for modellene med størst veggareal i bygget svake retning, modell 3, 4 og 5, og en del for modellene med størst veggareal i byggets sterke retning, modell 6, 7, 8 og 9.

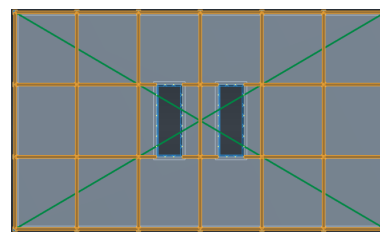
4.2.1 Modell 3, 4 og 5

Tabell 4-2: Resultater for modell 3, 4 og 5

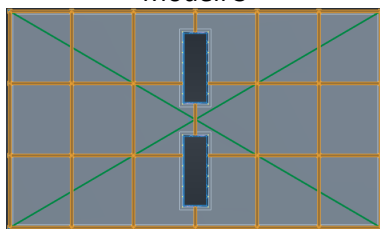
Modell	Antall etasjer	Vegg - tykkelse	Total masse	f_x	f_y	Ekvivalent masse	Stivhet	A_x	A_y
M3.1	11	160	1 725 363,45	0,34	0,71	42 392,22	843 650,60	0,367	0,161
M3.2	11	220	1 758 106,05	0,39	0,82	43 196,71	1 146 669,08	0,313	0,133
M3.3	22	160	3 451 730,51	0,10	0,22	42 404,55	81 024,73	0,841	0,466
M3.4	22	220	3 517 592,07	0,11	0,25	43 213,66	106 625,44	0,780	0,405
M4.1	11	160	1 725 363,45	0,34	0,72	42 392,22	867 582,76	0,367	0,158
M4.2	11	220	1 758 106,05	0,39	0,84	43 196,71	1 203 286,29	0,313	0,129
M4.3	22	160	3 451 730,51	0,10	0,22	42 404,55	81 024,73	0,841	0,466
M4.4	22	220	3 517 592,07	0,11	0,25	43 213,66	106 625,44	0,780	0,405
M5.1	11	160	1 725 363,45	0,34	0,72	42 392,22	867 582,76	0,367	0,158
M5.2	11	220	1 758 106,05	0,39	0,84	43 196,71	1 203 286,29	0,313	0,129
M5.3	22	160	3 451 730,51	0,10	0,22	42 404,55	81 024,73	0,841	0,466
M5.4	22	220	3 517 592,07	0,11	0,25	43 213,66	106 625,44	0,780	0,405



Modell 3

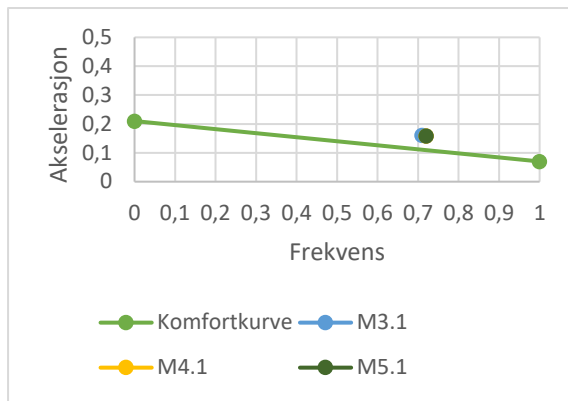


Modell 4

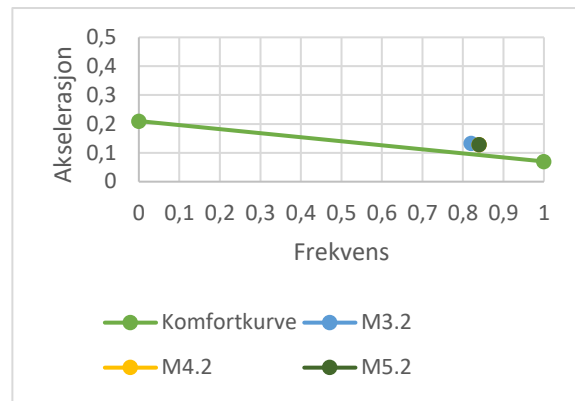


Modell 5

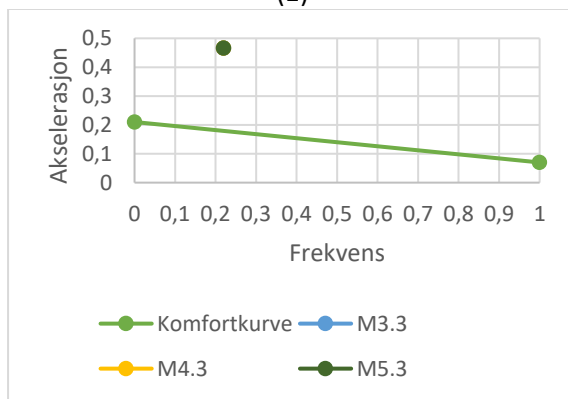
Figur 4-4: Modeller med to sjakter orientert med størst veggareal i byggets svake retning



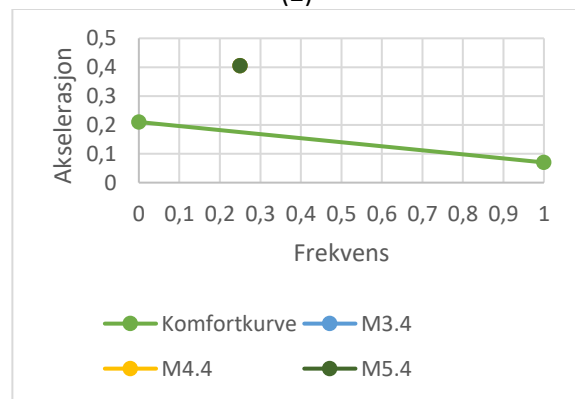
(1)



(2)



(3)



(4)

Figur 4-5: Plott av resultatene til modell 3, 4 og 5

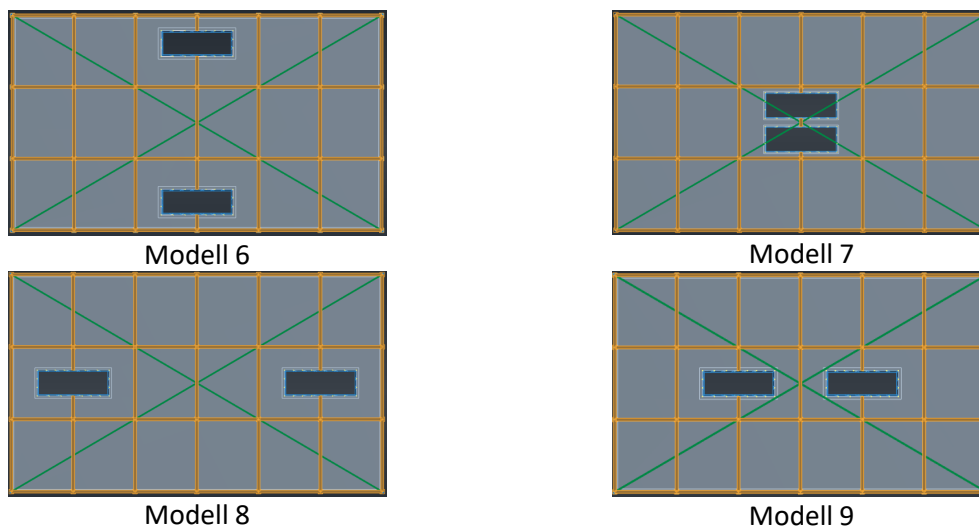
Av Figur 4-5 og resultatene i Tabell 4-2 kan man se at det for bygget med 11 etasjer har en effekt å flytte sjakten nærmere sentrum. Når sjakten flyttes nærmere sentrum øker stivheten til bygget, egenfrekvensen øker og akselerasjonen minker. For bygget med 22 etasjer har det ingen effekt å flytte sjaktene.

For at forskjellene i plottene i Figur 4-5 skal komme tydeligere fram er komfortkurven kortet ned slik at det kun er kurven fram til en frekvens på 1 Hz som blir vist. Ingen av modellene har egenfrekvens høyere enn 1 Hz og det er dermed uinteressant å se resten av kurven i disse plottene.

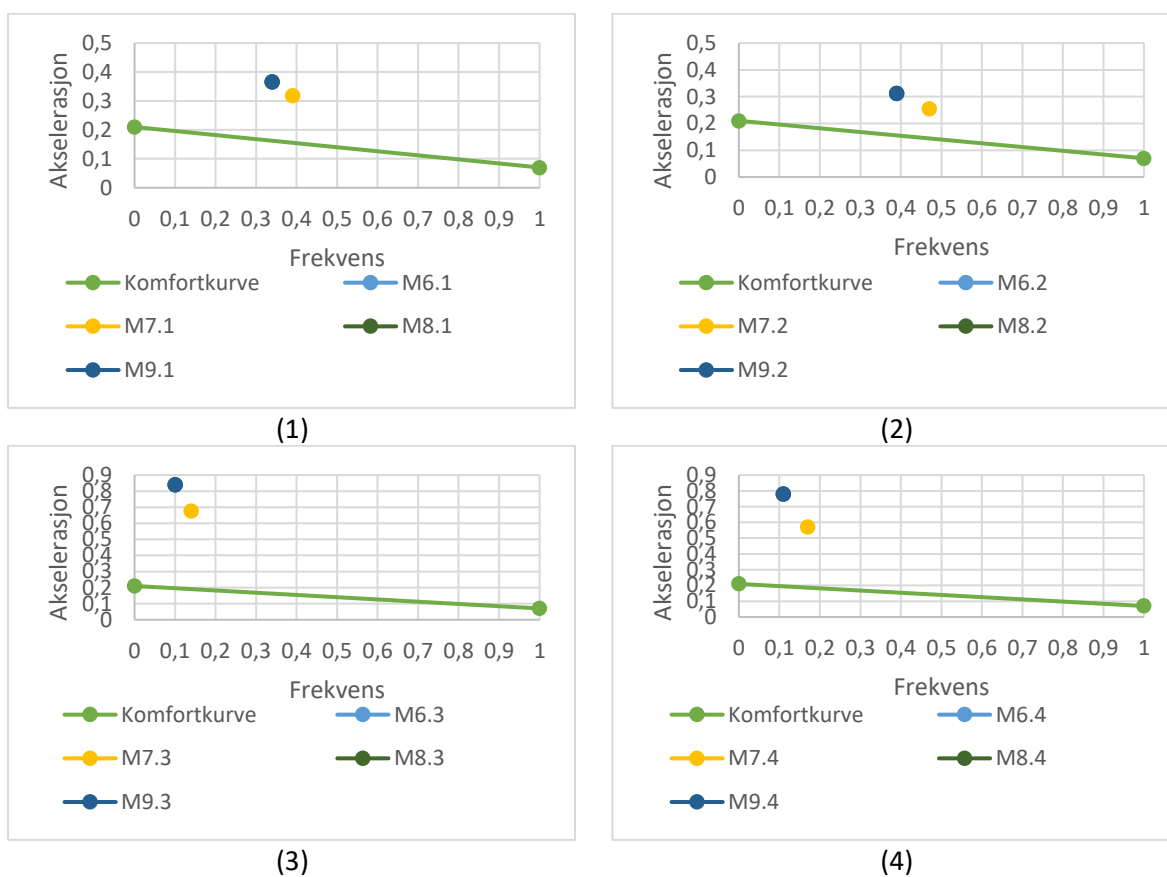
4.2.2 Modell 6, 7, 8 og 9

Tabell 4-3: Resultater for modell 6, 7, 8 og 9

Modell	Antall etasjer	Vegg - tykkelse	Total masse	f_x	f_y	Ekvivalent masse	Stivhet	A_x	A_y
M6.1	11	160	1 728 876,96	0,72	0,34	42 478,55	193 859,57	0,158	0,367
M6.2	11	220	1 761 619,56	0,83	0,39	43 283,04	259 900,23	0,130	0,312
M6.3	22	160	3 458 757,53	0,22	0,10	42 490,88	16 774,73	0,465	0,839
M6.4	22	220	3 524 619,09	0,25	0,11	43 299,99	20 683,92	0,405	0,778
M7.1	11	160	1 728 876,96	0,72	0,39	42 478,55	255 069,56	0,158	0,318
M7.2	11	220	1 761 619,56	0,83	0,47	43 283,04	377 461,94	0,130	0,255
M7.3	22	160	3 458 757,53	0,22	0,14	42 490,88	32 878,46	0,465	0,675
M7.4	22	220	3 524 619,09	0,25	0,17	43 299,99	49 402,09	0,405	0,571
M8.1	11	160	1 728 876,96	0,72	0,34	42 478,55	193 859,57	0,158	0,367
M8.2	11	220	1 761 619,56	0,83	0,39	43 283,04	259 900,23	0,130	0,312
M8.3	22	160	3 458 757,53	0,22	0,10	42 490,88	16 774,73	0,465	0,839
M8.4	22	220	3 524 619,09	0,25	0,11	43 299,99	20 683,92	0,405	0,778
M9.1	11	160	1 728 876,96	0,72	0,34	42 478,55	193 859,57	0,158	0,367
M9.2	11	220	1 761 619,56	0,83	0,39	43 283,04	259 900,23	0,130	0,312
M9.3	22	160	3 458 757,53	0,22	0,10	42 490,88	16 774,73	0,465	0,839
M9.4	22	220	3 524 619,09	0,25	0,11	43 299,99	20 683,92	0,405	0,778



Figur 4-6: Modeller med to sjakter orientert med størst veggareal i byggets sterke retning



Figur 4-7: Plott av resultatene til modell 6, 7, 8 og 9

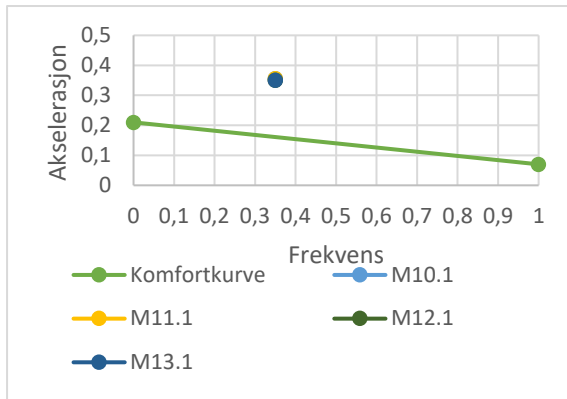
Av resultatene i Tabell 4-3 og grafene i Figur 4-7 kan man se at det har stor effekt å flytte sjaktene nærmere senter av bygget når sjaktene er plassert med langsiden mot byggets langside. I motsetning til modell 3, 4 og 5 gir det for modell 6, 7, 8 og 9 også en positiv innvirkning på byggets akselerasjon når det sees på et bygg med 22 etasjer.

Også for disse modellene er det valgt å kun plote komfortkurven fram til 1 Hz for at forskjellene i plottene skal bli tydeligere, uten at figuren blir altfor stor. Ingen av modellene har egenfrekvens på mer enn 1 Hz, og det er dermed uinteressant å se på resten av kurven.

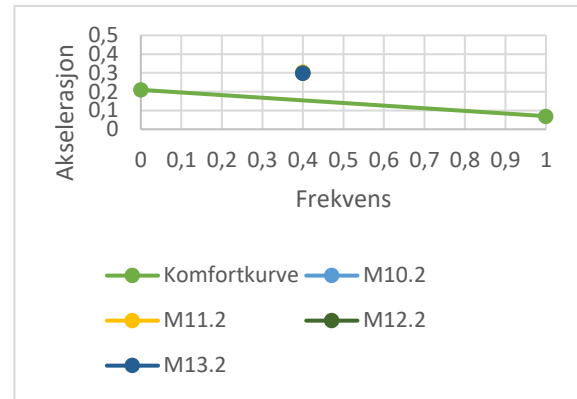
4.3 Modeller med fire sjakter

Tabell 4-4: Resultater for modeller med fire sjakter

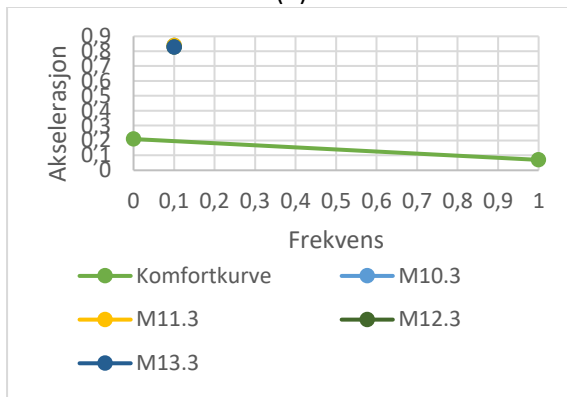
Modell	Antall etasjer	Vegg - tykkelse	Total masse	f_x	f_y	Ekvivalent masse	Stivhet	A_x	A_y
M10.1	11	160	1 730 534,07	0,28	0,35	42 519,26	205 627,68	0,4 42	0,356
M10.2	11	220	1 763 276,67	0,32	0,40	43 323,75	273 656,50	0,3 82	0,304
M10.3	22	160	3 462 071,74	0,08	0,10	42 531,59	16 790,80	0,9 41	0,838
M10.4	22	220	3 527 933,30	0,09	0,11	43 340,70	20 703,37	0,8 71	0,778
M11.1	11	160	1 730 533,85	0,28	0,35	42 519,26	205 627,65	0,4 42	0,356
M11.2	11	220	1 763 276,45	0,32	0,40	43 323,75	273 656,47	0,3 82	0,304
M11.3	22	160	3 462 071,30	0,08	0,10	42 531,59	16 790,80	0,9 41	0,838
M11.4	22	220	3 527 932,86	0,09	0,11	43 340,70	20 703,37	0,8 71	0,778
M12.1	11	160	1 752 877,45	0,28	0,35	43 068,24	208 282,59	0,4 36	0,351
M12.2	11	220	1 785 620,06	0,32	0,40	43 872,73	277 124,15	0,3 77	0,300
M12.3	22	160	3 506 719,25	0,08	0,10	43 080,09	17 007,34	0,9 29	0,828
M12.4	22	220	3 572 580,81	0,09	0,11	43 889,20	20 965,38	0,8 60	0,768
M13.1	11	160	1 752 877,45	0,28	0,35	43 068,24	208 282,59	0,4 36	0,351
M13.2	11	220	1 785 620,06	0,32	0,40	43 872,73	277 124,15	0,3 77	0,300
M13.3	22	160	3 506 758,51	0,08	0,10	43 080,57	17 007,53	0,9 29	0,828
M13.4	22	220	3 572 620,07	0,09	0,11	43 889,68	20 965,61	0,8 60	0,768



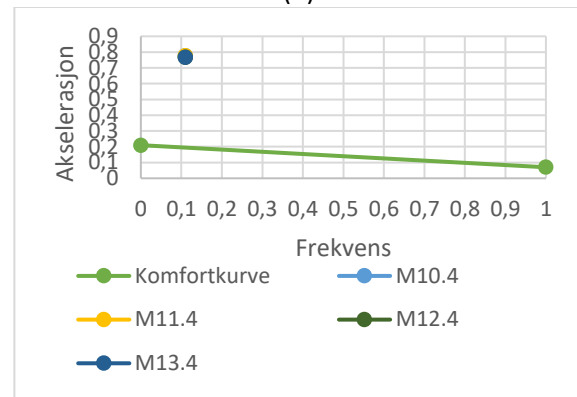
(1)



(2)

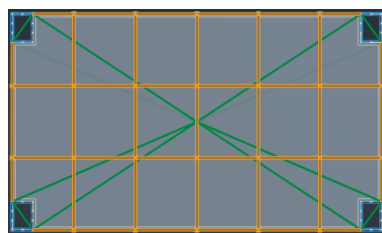


(3)

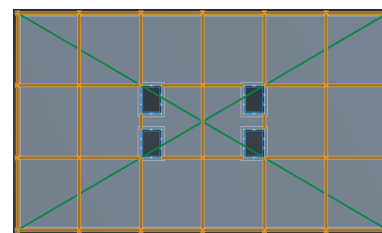


(4)

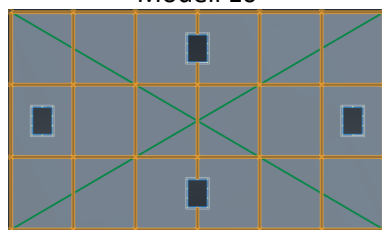
Figur 4-8: Plott av resultatene for modellene med tre kjerner



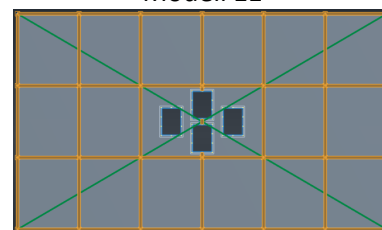
Modell 10



Modell 11



Modell 12



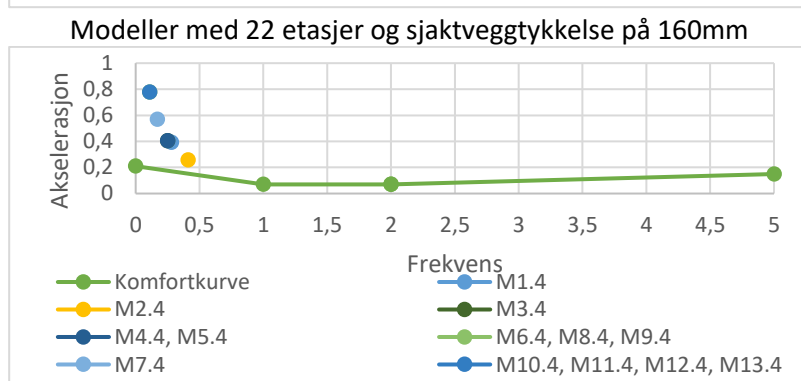
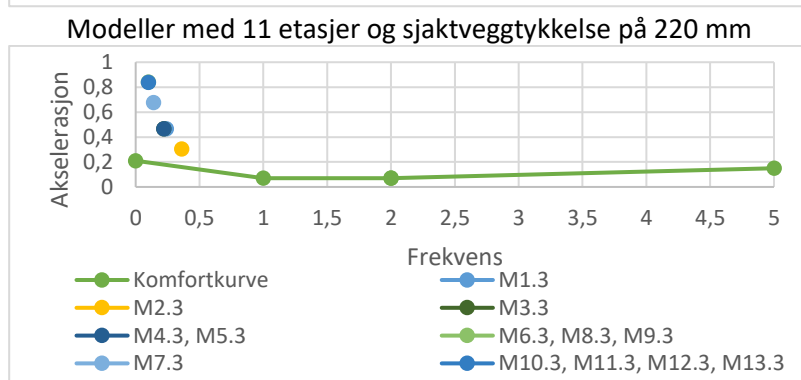
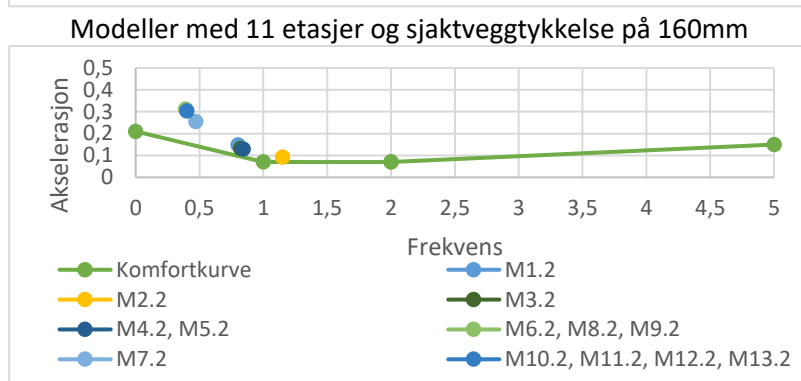
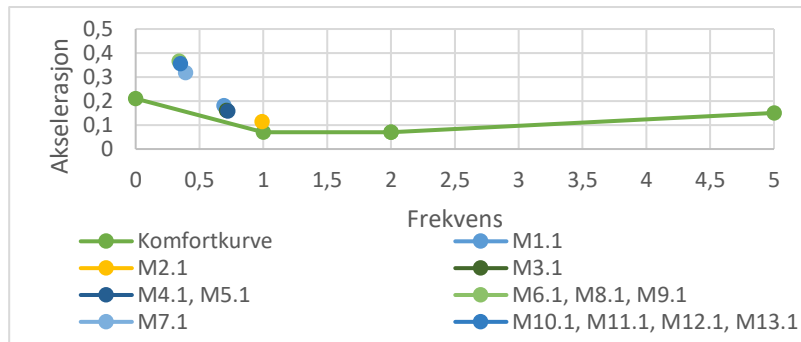
Modell 13

Figur 4-9: Modellene med fire sjakter

Av resultatene i Tabell 4-4 og plottene i Figur 4-8: Plott av resultatene for modellene med tre kjerner. Figur 4-8 kan man se at det for modellene med fire kjerner ikke har noen effekt å flytte kjernen nærmere sentrum verken for bygget med 11 eller 22 etasjer. Det kan se ut som at det har en liten effekt å flytte sjaktene mot veggene i bygget, modell 12 og 13, heller enn å plassere de mot hjørnene. Denne lille forskjellen skyldes at det i løsningene hvor sjaktene er plassert mot hjørnet blir fjernet mer av bjelke- og søylesystemet, hvilket fører til at bygget blir litt lettere.

4.4 Sammenligning av modellene

For å sammenligne de ulike løsningene plottes resultatene i samme graf, se Figur 4-10. Modellene hvor sjakten har samme tverrsnitt og orientering, og bygget får samme egenfrekvens og akselerasjon plottes som en.



Figur 4-10: Sammenligning av resultatene til de ulike modellene

Av plottene i Figur 4-10 kan man se at det har en klar effekt å ha en sjakt, og at den orienteres slik at den har størst veggareal i byggets svake retning, modell 2. For byggene på 11 etasjer kan man se at

det er bedre å benytte seg av to sjakter med mest veggareal i byggets svake retning, modell 4 og 5, enn en sjakt med størst veggareal i byggets sterke retning, modell 1. Når antall etasjer økes til 22 og sjaktveggtykkelsen er 160mm er det ikke lenger noen forskjell i resultatene til modell 1 og modell 4 og 5. Når veggtykkelsen økes til 220mm ser man at det blir omvendt fra bygget på 11 etasjer, da gir det bedre resultater å benytte en sjakt med størst veggareal i byggets sterke retning enn to sjakter med størst veggareal i byggets svake retning.

En ting som er felles for alle plottene er at det gir dårligst resultat å benytte fire sjakter. To sjakter orientert med størst veggareal i byggets sterke retning, modell 6, 7, 8 og 9 gir som forventet heller ikke gode resultater, men denne løsningen ble testet for å se om det ga samme effekt å flytte sjaktene lenger fra hverandre.

4.5 Verifisering av modellen

I metodekapittelet ble det sett på to måter for å kontrollere at modellene var korrekt. Den første var å sjekke deformasjonen for en modell i Robot med bjelke- og søylesystemet, for deretter gjøre en test med kun sjakten. Det ble gjort en test av modell 1, deformasjonen med bjelke- og søylesystemet ble på 123 mm. Når den samme sjakten ble teste uten bjelke- og søylesystemet, med samme last som virket på hele veggens lengde i modell 1 ga Robot en deformasjon på 125 mm. Denne forskjellen anses å være så liten at den ikke er av betydning, og det går ut ifra at systemet er modellert med ønsket effekt, altså at det ikke er noen stivhet i bjelke- og søylesystemet og at dekket kun overfører kreftene til sjakten.

Det ble også gjort en håndberegning etter ligning (3-1). Tregghetsmomentet til sjakten blir regnet ut etter ligning (2-10) og E – modulen som blir er 6600N/mm^2 , tilsvarer 60% av e-modulen til C24 i fiberretning. Håndberegningene tilsier at bygget skulle hatt en deformasjon på 45,5mm.

5 Diskusjon

Diskusjonskapittelet består av to deler. I den første delen vil resultatene fra forrige kapittel bli diskutert. I den andre delen vil de tre delspørsmålene bli besvart.

5.1 Diskusjon av resultatene

Ved verifisering av modellen i kapittel 4.5 ser man at utbøyingen i Robot ikke samsvarer med den håndberegningene gir. Testen som gjøres i Robot for modell 1 med og uten bjelke- og søylesystemet tilsier at modellen er bygd opp med ønsket effekt, altså at all stivheten i bygget kommer fra sjakten. Forskjellen i deformasjon fra Robot og håndberegningene skyldes dermed mest sannsynlig en feil i defineringen av KLT elementene. KLT elementene i alle modellene er modellert på samme måte, og feilen vil dermed ikke ha innvirkning på forskjellen i egenfrekvens og akselerasjon for de ulike modellene. Selv om feilen ikke har innvirkning på forskjellene som oppstår, gjør det at modellene ikke kan evalueres opp mot komforkravet i ISO10137.

5.2 Delspørsmål

Denne delen av diskusjonen vil gi et svar på de tre delspørsmålene, disse svarene vil lede fram til konklusjonen på oppgaven.

1. Hvordan brukes sjakter i KLT og andre materialer som avstivende elementer?

I kapittel 2.2.1 blir det beskrevet hvordan sjakter som avstivende elementer fungerer. Det blir vist at det har god effekt å ha sammenkoblede elementer, enn at de står hver for seg.

2. Hvilke andre faktorer enn stabilitet er det som er avgjørende ved bestemmelse av sjaktens plassering?

I kapittel 2.2.2 blir det sett på fordeler og ulemper med de ulike plasseringene. I tillegg til hva som er den mest fordelaktige plasseringen for byggets stivhet, er det viktig å plassere sjaktene slik at de passer inn i ønsket planløsning for bygget.

3. Hvilke løsninger er mest effektive med tanke på arealbruk og avstivningsegenskaper?

For å besvare delspørsmål fire blir det sett på hvor stor andel av grunnflaten til bygget sjakten opptar.

Tabell 5-1: prosentvis arealbruk av byggets grunnflate:

Modell	Prosent av byggets grunnflate
1 og 2	11%
3, 4, 5, 6, 7, 8 og 9	4,6%
10, 11, 12 og 13	2,9%

Av Tabell 5-1 kan man se at ingen av løsningene opptar store deler av byggets totale grunnflate. Ved å sammenligne arealbruken med plottene i Figur 4-10 kan man se at det er en sammenheng mellom arealbruk og avstivningsegenskapene til sjaktmodellene. Sån sett kunne det vært interessant å se om det hadde hatt en effekt på resultatet om man i stedet for å holde veggarealet i sjaktene konstant hadde holdt sjaktens grunnflate konstant. Sjakten det er tatt

utgangspunkt i, i denne oppgave har plass til to heiser, en trapp og teknisk rom, og den opptar kun 11% av byggets grunnflate. Sjaktene i oppgaven kunne godt vært gjort større slik at stivheten til bygget øker. Den ekstra sjaktplassen kunne vært brukt til å romme for eksempel toaletter og møterom. I et kontor med åpen planløsning er det naturlig å anta at det uansett vil være minst et møterom og toaletter i hver etasje, og det kan da være fornuftig å bruke disse rommene til å øke stivheten til bygget.

6 Konklusjon

Målet med denne oppgaven var å undersøke hvordan den dynamiske oppførselen til høye trehus påvirkes av plasseringen og utformingen av massivtresjakter. For å komme fram til en konklusjon på problemstillingen ble det først gått gjennom teori om hvilke parametere som påvirker den dynamiske oppførselen til et bygg, det ble sett på hvordan sjakten som avstivende element fungerer, og det ble sett på ulike plasseringer av sjakten, og hva som er fordelene og ulempene med de ulike løsningene.

Etter at teorien var gjennomgått ble det satt opp flere modeller som skulle analyseres. Modellene ble påført en vindlast som førte til at bygget ble satt i bevegelse. Resultatene fra analysene tilsa at det var mest effektivt å benytte sjakter med størst veggareal i byggets svake retning. For modellene med to sjakter ga det bedre resultater når sjakten ble flyttet mot senter av bygget. For modellene med fire sjakter hadde det ingen effekt å flytte sjaktene nærmere senter.

Sammenligning av resultatene fra modellene med en, to og fire sjakter viser at det er en sjakt plassert i senter av bygget som gir best resultater.

Videre arbeid

- I analysen er det ikke sett på forbindelser. For å gi et mer riktig svar på stivheten til bygget bør det undersøkes hvordan den påvirkes av ulike forbindelser.
- Det er kun sett på symmetriske løsninger i oppgaven, det kan være interessant å undersøke hvordan den dynamiske oppførselen blir påvirket av usymmetriske løsninger.
- I oppgaven er veggarealet i sjaktene holdt konstant, det kan være interessant å undersøke om man får de samme resultatene hvis det i stedet er arealet av grunnflaten til sjakten som holdes konstant.
- Ved sammenligning av deformasjon ved håndregning og resultatene hentet fra Robot ser det ut til at det har blitt en feil i modelleringen av KLT elementene. Å rette opp denne feilen vil gi et mer korrekt svar, og resultatene kan måles mot komfortkravene gitt i ISO10137.

Litteraturliste

- Allen, E., & Iano, J. (2007). *The Architect's Studio Companion - Rules of thumb for preliminary design*. John Wiley & Sons.
- Bergan, P. G., Larsen, P. K., & Mollestad, E. (1993). *Svigning av konstruksjoner, andre utgave*. Tapir forlag.
- Bjørheim, K. (2019, Mars 10.). *Teknisk Ukeblad*. Hentet fra : <https://www.tu.no/artikler/verdens-hoyeste-trehus-er-apnet-se-de-nyeste-bildene-br/459983> (lest 03.10.2019) (lest 17.10.2019)
- CF Møller Architects. Hentet fra <https://www.cfmoller.com/p/hsb-2023-vasterbroplan-i3048.html> (lest 19.11.2019)
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures - Theory and applications to earthquake engineering, fourth edition*. Boston: Pearson.
- Green, M. (2017). *Tall wood buildings: design, construction and performance*. Birkhauser.
- ISO (International Standard Organisation). (2007). *ISO 10137: Bases design of structures serviceability of buildings and walkways against vibrations*.
- Johansson, M., Linderholt, A., Jarnerö, K., & Landel, P. (2016). *Tall timber buildings - a preliminary study of wind - induced vibrations of a 22 - storey building*. Vienna: World Conference on Timber Engineering.
- Juveli, A. (2016). *Ulike løsninger for horisontal avstivnings effekt på den dynamiske responsen i høye trehus*. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.
- Khajehpour, S. (2001). *Optimal Conceptual Design of High-Rise Office Buildings*. Waterloo.
- Kvarberg, O., & Grosch, J. T. (2019). *Avstivningssystem i fleretasjers trehus; en sammenligning av skjærskiver i betong og massivtre*. NTNU Gjøvik.
- Lamb, S., Macefield, V. G., Darren, W., & Kwok, K. C. (2016). *Occupant response to wind-excited buildings: a multidisciplinary perspective*. ICE publishing.
- McGuinness, W. J., Stein, B., Stein, J. A., & Reynolds, J. S. (1987). *Mechanical and Electrical Equipment for buildings 7th Edition, Volum 1*. John Wiley & Sons Canada .
- Moudgil, M. (2014). *Feasibility study of using cross-laminated timber core for the UBC Tall Wood Building*.
- Oslo kommune. (2015, 09 23). *Kommuneplan 2015, del 2*. Hentet fra <https://www.oslo.kommune.no/getfile.php/1374702-1486638329/Tjenester%20og%20tilbud/Politikk%20og%20administrasjon/Politikk/Kommuneplan/Ny%20kommuneplan%202015/Kommuneplan%202015%20del%202%20justert%2031.01.2017.pdf> (lest 12.12.2019)
- Reidel, E. (2019). *Tall Timber Structural Systems*.
- Sandelin, C., & Budajev, E. (2013). *The Stabilization of High-rise Buildings*. Uppsala: Uppsala Universitet.
- Schoof, J. (2017, 12 21). Hentet fra <https://www.detail-online.com/article/a-wooden-skeleton-in-xxl-t3-office-building-in-minneapolis-31385/> (lest 10.10.2019)

- SINTEF . (2001). *Massive treelementer- Typer og bruksområder*.
- Stora Enso. (2015). *Stiffness matrix for Stora Enso CLT*.
- Stora Enso Wood Products GmbH. (2015). *Stora Enso CLT, Teknisk brosjyre*. Stora Enso Wood Products GmbH.
- TEK17. (u.d.). *Byggteknisk forskrift (TEK17)*. Hentet fra <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/12/i/12-3/> (lest 15.12.2019)
- Timber design & technology*. (2015, 4 1). Hentet fra <http://www.timberdesignandtechnology.com/reach-higher-with-wood%E2%80%A8-84-meter-24-storey-hoho-tower/> (lest 8.10.2019)
- Treteknisk. (2006). *Håndbok - Bygge med massivtreelementer*.
- Tøsse, Å. E. (2010). *Dynamiske egenskaper til fleretasjes rammekonstruksjon i tre*. Trondheim: Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet.
- Yeang, K. (2000). *Service cores*. Wiley-academy.
- Østnor, T. (2018). *Massivtre og Plasstøpt betong: en casestudie*.

Vedlegg

Vedlegg A

- Excel ark for utregning av akselerasjonen

Vedlegg A

Parameter		Referanse - NS-EN-1991 1-4	Verdi	Enhet
Høyde			40,7	m
Bredde			36	m
Dybde			21	m
Referansehøyde			24,42	m
Terrengruhetskategori	Kategori II:	Tabell NA.4.1		
	kr		0,19	
	z0		0,05	m
	zmin		4	m
Standradavviket	$\sigma_{a,x}(z)$	Ligning B.10		
Kraftfaktor	Cf, 0	Figur 7.23	2,2	
	Cf,90		1,8	
Lufttettheten	ρ	Kapittel 4.5	1,25	kg/m ³
Turbulensintensiteten	Iv(Zs)	Ligning 4.7	0,161521 279	
$I_v(Z_s) = \frac{k_l}{c_0(Z_s) * \ln\left(\frac{Z_s}{z_0}\right)}$	kl	Kapittel 4.4	1	
	c0(zs)	Kapittel 4.3.1	1	
Karakteristisk stedsvindhastighet	vm(zs)	Ligning 4.3	25,87894 322	m/s
	$v_m(z_s) = c_r(z_s) * c_0(z_s) * v_b$	cr(zs)	1,176315 601	
$c_r(z_s) = k_r * \ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right)$	cdir	NA.4.2	1	
$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0}$	cseason		1	
	vb,0		22	
	vb	Tabell NA.4(901.1)	22	m/s
cprob??				
referansehøyden	zs	Figur 6.1	24,42	m
Kvadratrotten av resonansandelen av respons	R^2	Ligning B.6	0,020610 507	
	$R^2 = \frac{\pi^2}{2 * \delta} * S_L(z_s, n_{1,x}) * R_h(n_h) * R_b(n_b)$	δ	Tabell F.2	0,06
$S_L(z_s, n_{1,x}) = 0,68 * \frac{f_L(z, n_{1,x})}{(1 + 10,2 * f_L(z_s, n_{1,x}))^{\frac{5}{3}}}$	SL(zs, n1,x)	Ligning B.2	0,006921 646	
	fL(zs, n1,x)	B.1	2,678681 452	
$f_L(z_s, n_{1,x}) = n_{1,x} * \frac{L(z_s)}{v_m(z_s)}$	n1,x	Robot	0,69	Hz
$L(z_s) = L_t * \left(\frac{z_s}{z_t}\right)^\alpha$	L(zs)	Ligning B.1	100,4658 626	
	Lt		300	

	zt		200	
	α		0,520213 386	
	Rh	Ligning B.7	0,180264 582	
	Rb	Ligning B.8	0,200840 082	
$\alpha = 0,67 + 0,05 * \ln(z_0)$	nh	Ligning B.7 - merknad	4,991772 612	
$R_h = \frac{1}{n_h} - \frac{1}{2 * n_h^2} * (1 - e^{-2*n_h})$	nb	Ligning B.8 - merknad	4,415327 126	
	R		0,143563 598	
$R_b = \frac{1}{n_b} - \frac{1}{2 * n_b^2} * (1 - e^{-2*n_b})$				
$n_h = 4,6 * \frac{h}{L(z_s)} * f_L(z_s, n_{1,x})$				
$n_b = 4,6 * \frac{b}{L(z_s)} * f_L(z_s, n_{1,x})$				
Konstant	Kx	Figur B.4	1,5	
Total masse	M	Robot	1 589 695,47	
Den ekvivalente massen i vindretning	m _{1,x}		39 058,86	
Fundamentale egenfrekvens for konstruksjonens vibrasjoner i vindretning	$\phi_{1,x}(z)$	Ligning F.13	1	
$\sigma_{a,x}(z) = cf * \rho * b * I_v(z_s) * \frac{v_m^2(z_s)}{m_{1,x}} * R * K_x * \Phi_{1,x}(z)$			0,059043 77	
Toppfaktoren	Kp		3,064890 182	
Oppkryssingsfrekvensen	v		0,098053 57	
	B ²		1	
Midlingstiden for stedsvindhastigheten	T		600	
$v = n_{1,x} * \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}}$				
$Kp = \sqrt{2 * \ln(v * T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 * \ln(v * T)}}$				
Akselerasjon			0,180962 672	



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway