



Høgskulen
på Vestlandet

BACHELOROPPGAVE

Materialvurdering av bæresystem for skolebygg
Material assessment of building system for school
building

**Niklas Ebbesvik, Marcus Nordbøe Abbedissen,
Bror Håkon Delphin-Solli**

Byggingeniør Bachelor
Fakultet for ingeniør- og naturvitenskap
Trond Einar Martinsen
Innleveringsdato

Jeg bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. *Forskrift om studium og eksamen ved Høgskulen på Vestlandet, § 12-1.*

Forord

Denne bacheloroppgaven er det avsluttende arbeidet på gruppens utdanning på Institutt for bygg og landmåling ved Høgskulen på Vestlandet, avdeling Bergen. Oppgaven er skrevet våren 2021 av Niklas Ebbesvik, Marcus Nordbø Abbedissen og Bror Håkon Delphin-Solli. Oppgaven står for 20 studiepoeng i lag med en muntlig del knyttet til oppgaven.

Samtlige går profilet konstruksjonsteknikk og syntes særlig konstruksjonsfagene har vært svært interessante i studieforløpet. Vi ønsket dermed å skrive en oppgave der vi kunne ta i bruk, og tilegne oss ny kunnskap om fagene. Oppgaven er skrevet i samarbeid med bedriften HR Prosjekt. Oppgavens problemstilling ble utformet i dialog med HRP som ønsket seg en alternativsvurdering av et forprosjektert bæresystem i massivtre. Etter ønske fra kommunen skulle prosjektet deres dimensjoneres i tre, samt oppfylle diverse miljøkrav. Gruppen syntes dermed at problemstillingen å prosjektere-, og sammenligne et bæresystem i stål og betong opp mot bedriftens planlagte system i tre virket svært interessant. Dette ville gi gruppen et innblikk i ulike måter en kan dimensjonere et bygg for å oppnå de samme kravene.

Utarbeiding av bæresystem har blitt utført i Revit og FEM-Design. Spesielt sistnevnte er et program som brukes flittig av bedrifter innenfor byggebransjen, og da spesielt rådgivende ingeniører som gruppen ser for seg å bli etter endte studier. Gruppen har ikke erfaring med programmet og har tilegnet seg ferdigheter på egenhånd. Det samme var også tilfellet med diverse andre programmer som One Click LCA og Ove Sletten som bransjen bruker aktivt.

Gruppen ønsker å takke HR Prosjekt og kontaktperson Adrian Moen Hjartnes for et godt samarbeid og muligheten til å få et innblikk i hvordan bedriften opererer. Videre takker vi veileder Trond Einar Martinsen ved Høgskulen på Vestlandet for å ha tatt seg tid til god oppfølging og veiledning gjennom hele oppgaven, og Anne Sofie Bjelland for bygningsfysiske vurderinger. Etter oppgaven sitter vi igjen med nye impulser og erfaringer, og gleder oss til å ta fatt på lignende oppgaver i fremtiden.

Bergen, mai 2021

Niklas Ebbesvik

Niklas Ebbesvik

Marcus Abbedissen

Marcus Nordbø Abbedissen

Bror Delphin-Solli

Bror Håkon Delphin-Solli

Sammendrag

Oppgaven tar for seg en alternativsvurdering av et forprosjektert bæresystem i tre for et skolebygg. Det alternative bæresystemet vil være prosjektet i stål og betong, og er hovedsakelig dimensjonert i modelleringsprogrammet FEM-design. Bæresystemene blir sammenlignet på ulike kriterier, hvor spesielt systemenes miljøpåvirkning er et tema av interesse. Dette blir gjennomgått gjennom en livsløpsanalyse, samt drøfting rundt ulike egenskaper og krav knyttet til prosjektets miljøambisjoner. Andre fagfelt som økonomi, bygningsakustikk og branntekniske egenskaper er også blitt gjennomgått og vurdert.

I starten av dimensjoneringen av nytt bæresystem ble det modellert opp tiltenkt løsning i Revit. Denne er blitt brukt som visuell modell av bygget, og ligger til grunn for den endelige modellen i FEM-Design. Prosjekteringen er blitt formet i henhold til ulike laster og lastkombinasjoner som bygget blir påkjent av. Lastgrunnlaget er definert gjennom standardene «NS-EN 1990 Grunnlag for prosjektering» og «NS-EN 1991 Laster på konstruksjoner». Aktuelle laster og tilhørende verdier er blitt lagt inn i beregningsmodellen.

Enkelte beregninger er også blitt kontrollert for hånd, i henhold til gjeldene standarder «NS-EN 1993-1-1 Prosjektering av stålkonstruksjoner» og «NS-EN 1992-1-1 Prosjektering av betongkonstruksjoner» med nasjonale tillegg. Det er også blitt foretatt armeringsberegning gjennom tilhørende funksjon i FEM-design.

Sammenligningen vil ha et større fokus på bæresystemenes miljøpåvirkning da kommunen har stilt svært ambisiøse miljøkrav for bygget. Det er derfor utført en omfattende livsløpsanalyse i tillegg til drøfting av ulike miljømessige tiltak, som vil bli grundig vurdert. Det vil også bli drøftet materialenes egenskaper knyttet til akustikk og brann, og gjennomgått aktuelle tiltak og hvor omfattende disse vil være. Økonomi er sentralt for valg av bæresystem, og er gjennomgått ved utregning av materialkostnader.

Abstract

The thesis will contain an alternative assessment of a pre-projected structural design in cross laminated timber for a school building. The alternative structural design will have a bearing system designed in steel and concrete and is mainly dimensioned in the modeling program FEM-design. The bearing systems are compared on different criteria, where especially the systems' environmental impact is a topic of interest. This is reviewed through a life cycle analysis, as well as a discussion of various characteristics and requirements related to the project's environmental ambitions. Other disciplines such as economics, building acoustics and fire engineering have also been reviewed and assessed.

At the beginning of the dimensioning of a new support system, the intended solution was modeled in Revit. This has been used as a visual model of the building and forms the basis for the final model in FEM-Design. The design has been shaped according to different loads and load combinations that the building is stressed by. The load basis is defined through the standards «NS-EN 1990 Basis for design» and «NS-EN 1991 Loads on structures». Relevant loads and associated values have been entered in the calculation model.

Some calculations have also been done by hand, in accordance with current standards «NS-EN 1993-1-1 Design of steel structures» and «NS-EN 1992-1-1 Design of concrete structures» with national additions. Reinforcement calculation has also been performed through the associated function in FEM design.

The comparison will have a greater focus on the environmental impact of the load-bearing systems as the municipality has set extremely ambitious environmental requirements for the building. A comprehensive life cycle assessment has therefore been carried out in addition to a discussion of various environmental measures, which will be thoroughly assessed. The properties of the materials related to acoustics and fire will also be discussed, and current measures and how extensive these will be are reviewed. Finances are central to the choice of support system and are reviewed when calculating material costs.

Innholdsfortegnelse

Forord	II
Sammendrag	III
Abstract	IV
Figurliste	VII
Tabelliste	IX
Formelliste	X
Symbolliste	X
1. Innledning	1
1.1 <i>Prosjekt Tveten skole</i>	<i>1</i>
1.2 <i>Problemformulering</i>	<i>1</i>
1.3 <i>Bakgrunn</i>	<i>2</i>
1.4 <i>Metode</i>	<i>3</i>
1.4.1 <i>Revit</i>	<i>3</i>
1.4.2 <i>FEM-Design 20</i>	<i>4</i>
1.4.3 <i>Ove Sletten programmer (OS)</i>	<i>4</i>
1.4.4 <i>One Click LCA (2015)</i>	<i>4</i>
1.4.5 <i>PTC MathCAD Prime 3.0</i>	<i>5</i>
1.4.6 <i>Standarder</i>	<i>5</i>
2. Grunnleggende om stål, betong og tre	6
3. Lastgrunnlag	7
3.1 <i>NS-EN 1990 Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner</i>	<i>7</i>
3.2 <i>NS-EN 1991-1-1 Laster på konstruksjoner</i>	<i>8</i>
3.2.1 <i>Nyttelast</i>	<i>8</i>
3.2.2 <i>Vindlast</i>	<i>8</i>
3.2.3 <i>Snølast</i>	<i>10</i>
3.2.4 <i>Ulykkeslast</i>	<i>11</i>
3.3 <i>Skjevstillingslast</i>	<i>12</i>
3.4 <i>Seismisk last</i>	<i>12</i>
3.4.1 <i>Opphav til jordskjelv</i>	<i>12</i>
3.4.2 <i>Jordskjelv i Norge</i>	<i>13</i>
3.4.3 <i>Jordskjelvsanalyse</i>	<i>13</i>
3.5 <i>Lastkombinasjoner</i>	<i>25</i>

4	Modell	27
	4.1 Grunnlag.....	27
	4.2 Valg av bæresystem	27
5	Dimensjonering	31
	5.1 Horisontal påkjenning	31
	5.2 Vertikal påkjenning	36
	5.2.1 Bjelker	36
	5.2.2 Søyler.....	39
	5.2.3 Vegger	41
	5.2.4 Gangbro.....	43
	5.2.5 Opplegg lett-tak	45
6	Sammenligning	49
	6.1 Klima og miljø.....	49
	6.1.1 Generelt om materialenes miljøpåvirkning	49
	6.1.2 Livsløpsanalyse (LCA)	51
	6.1.3 BREEAM	60
	6.1.4 Passivhus.....	63
	6.1.5 Nullutslippsbygg, ZEB-OM.....	64
	6.2 Økonomi	65
	6.2.1 Materialkostnad.....	66
	6.2.2 Klimakvoter	67
	6.3 Levetidsbetraktninger.....	68
	6.3.1 Levetid stål og betong.....	69
	6.3.2 Levetid tre	69
	6.4 Akustikk	69
	6.4.1 Lydkrav	70
	6.4.2 Påvirkningskategorier for lyd	71
	6.4.3 Lyd i gipsvegger.....	73
	6.4.4 Lyd i betong.....	73
	6.4.5 Lyd i tre	74
	6.5 Brann	75
	6.5.1 Risiko- og Brannklasser	76
	6.5.2 Bæreevne og stabilitet ved brann og eksplosjon	77
	6.5.3 Brannpåvirkning av stål, betong og tre	77
6	Konklusjon	82
7	Videre arbeid	83
	Referanser	84

Figurliste

Figur 1 - Arkitektmodell vist i Solibri.....	1
Figur 2 - Avgrenset modell i Revit.....	2
Figur 3 - Prospekt nye Tveten skole [3].....	2
Figur 5 - Tre på byggeplass [99].....	3
Figur 6 - Betong på byggeplass [98].....	3
Figur 4 - Stål på byggeplass [97].....	3
Figur 7 - Avstand til ny ruhetssone.....	9
Figur 8 - Største skråning innenfor 10km på ca 3.7° (t.h.). Illustrasjon hentet fra Kartverket.....	9
Figur 9 - Opptegnet avstand, 10km radius fra byggeplass (t.v.). Kart hentet fra Google Maps.....	9
Figur 10 - Illustrasjon av snølast grunnet fonning.....	11
Figur 11 – Skjevstilling illustrasjon [12, bind B9].....	12
Figur 12 – Platebevegelser [14].....	13
Figur 13 - Løsmassekart i byggeområdet med oppført gammel skole og skyggelagt ny skole.....	14
Figur 14 - Snitt av fasade fra arkitektmodell.....	15
Figur 15 - Prinsippkisser for regularitet i plan og oppriss [12, bind H3].....	16
Figur 16 - Krav til konstruksjonsanalyse avhengig av konstruksjonenes regularitet [25].....	17
Figur 17 - Oppriss av avstivende betongskiver fra FEM.....	17
Figur 18 - Rammesystem med avstivende vindkryss og betongskiver fra FEM.....	18
Figur 19 - Aksesystem for de avstivende elementene.....	19
Figur 20 - Stivhetssenter (SS) og massesenter (MS).....	20
Figur 21 - Inndeling av selvastivende deler.....	20
Figur 22 - Horisontalt spektrum (t.v.) og lastomgjøring fra FEM-Design (t.v.).....	23
Figur 23 - Resultat for svingeformer i FEM.....	25
Figur 24 - Lastkombinasjoner vist i FEM-Design.....	26
Figur 25 - Konstruktive søyler i arkitektmodell.....	28
Figur 26 - Illustrasjon av bæresystem 1 (t.v.) og bæresystem 2 (t.h.).....	28
Figur 27 - Oppbygging lett-tak (t.v.). Stålvinkel som opplegg (t.h.) [100].....	29
Figur 28 - Bæresystem modellert i Revit.....	30
Figur 29 - Felles skjæringspunkt, ustabil (t.v.). Stabil fastholding (t.h.).....	31
Figur 30 - Vertikale avstivningselementer.....	32
Figur 31 - Plassering av skiver, sett i etasje 1.....	33
Figur 32 - Relevante krefter i en oppløftssituasjon [19].....	34
Figur 33 - Stivhetssenter og massesenter for redusert system.....	35
Figur 34 - HE-A 340 beliggenhet (t.v.) og profil (t.h.).....	36
Figur 35 - HE-A 300 beliggenhet (t.v.) og profil (t.h.).....	37
Figur 36 - Dimensjoner hatteprofil fremvist i section editor i FEM-Design.....	38
Figur 37 - Utnyttelser hatteprofil.....	39
Figur 38 - N-diagram i bruddgrense for valgt søyle og søyle over (t.v.). Verdier i [kN], grønt indikerer trykk. Beliggenhet (t.h.).....	40
Figur 39 - Valgt betongskive for armering.....	41
Figur 40 - Armeringstegning med nødvendig armering tilhørende lastkombinasjons-opphav.....	42

Figur 41 - Alternativ gangbro, gitterdragere	45
Figur 42 - Illustrasjon av opplegg for lett-tak (t.v.). Valgt ankerbolt HSL-3-B (t.h.) [95]	46
Figur 43 - Reaksjonskrefter for forbindelse	46
Figur 44 - Skjærkraftdiagram for opplagerlengden	47
Figur 45 - Målsatt fagverk med profilfordeling	48
Figur 46 – Påkjenninger for fagverk. Maks spenning i [N/mm^2] (t.v.), maks nedbøyning i [mm] (t.h.) ..	48
Figur 47 - CO ₂ -utslipp fordelt på næringsliv illustrert ved et sektordiagram [23].....	50
Figur 48 - Visualisering produkters livsløp og produksjonens påvirkninger på omgivelser [29]	51
Figur 49 – Miljøpåvirkningsindikatorer [32].....	52
Figur 50 - Sammenligning klimagassutslipp	53
Figur 51 - Sammenligning forsuring	54
Figur 52 - Sammenligning eutrofiering	55
Figur 53 - Sammenligning ozonlaguttømming.....	55
Figur 54 - Sammenligning fotokjemisk oksidasjon.....	56
Figur 55 - Sammenligning primærenergi	56
Figur 56 - Sammenligning - alle påvirkningskategorier. Differanse oppgitt i prosent (%) over stolpene...	57
Figur 57 - Sammenligning – Bundet karbon-referanse. Stål og betong vist øverst, tre nederst.	59
Figur 58 - De ni kategoriene som vurderes under BREEAM-sertifisering [42].....	60
Figur 59 – Referanseverdier for BREEAM-klassifisering for nybygg.	61
Figur 60 - Prinsippskisse av ZEB-ambisjonsnivåer [51]	64
Figur 61 – Kvalitet og funksjon for en bygning sett i et levetidsperspektiv [59]	68
Figur 63 - Flanketransmisjon [69]	71
Figur 62 – Direktetransmisjon [69]	71
Figur 64 - Sammenheng laboriemålt lydreduksjonstall og faltetmasse [77].....	73
Figur 65 - Luftisolasjon og trinnlydnivå i hulldekke og massivtre (t.v.) betong (t.h.) [78]	75
Figur 66 - Betongen relative fasthet som funksjon av temperatur i henhold (t.h.) [12, bind D3].....	78
Figur 67 - Reduksjonsfaktorer for flytegrense avhengig av stålets temperatur [S235–S460] (t.v.) [87]	78
Figur 68 - Brannmaling før og etter brann (t.h.) [87].....	79
Figur 69 - Illustrasjon av Rockwool Conlit sveisestift metoden (t.v.) [91].	79
Figur 70 - Tverrsnitt med tykkelser og anvisning av nøytralakse før og etter brannbelastning [93].....	81

Tabelliste

Tabell 1 - Oversikt over standarder	5
Tabell 2 - Grunnlag for prosjektering.....	7
Tabell 3 – Kombinasjonsfaktorer	7
Tabell 4 - Brukskategori for skolebygget.....	8
Tabell 5 - Karakteristisk snølast med faktorer.	10
Tabell 6 - Tabell NA.3.1 - Grunntyper	15
Tabell 7 - Beregning av stivhetssenter	19
Tabell 8 - Utelatelseskriterier for seismisk dimensjonering [25]	21
Tabell 9 - Veiledende tabell ved valg av seismisk klasse - Tabell NA.4(902).....	22
Tabell 10 - Resultat for utelatelseskriterier	23
Tabell 11 - Lastkombinasjons eksempler for hvert valgte tilfelle	26
Tabell 12 - Resultantkrefter og forskyvning for hver skive	33
Tabell 13 - Utnyttelser for oppløft, betongskiver	34
Tabell 14 - Utnyttelser for oppløft, vindkryss	34
Tabell 15 - HE-A 340 Kontrollberegning av FEM-Design	37
Tabell 16 - HE-A 300 Kontrollberegning av FEM-Design	38
Tabell 17 - Minimumsarmering for horisontal og vertikal retning	42
Tabell 18 - Oversikt armering og utnyttelse vegg	43
Tabell 19 - Typiske frekvenser ved menneskelige aktiviteter [94]	44
Tabell 20 - Utrechnet egenfrekvens av aktuelle hulldekker.	44
Tabell 21 - Kostnad gangbroer.....	45
Tabell 22 - Valg av bolt fra Hilti [95].....	47
Tabell 23 – Livssyklusinformatjon (informatjon oppgitt med One Click LCA sine farger for kategoryene)	53
Tabell 24 - Total miljøpåvirkning fra livsløpszyklusvurdering. Stål og betong vist øverst, tre nederst.....	57
Tabell 25 - Passivhuskrav for byggetekniske løsninger og ventilasjonssystem (standard).....	63
Tabell 26 - Kostnad bæresystem stål og betong (t.v. i blå) og massivtre (t.h. i grønn)	66
Tabell 27 - Lydkrav til enkelte bygningstyper gitt i NS 8175, der lydklasse C angir minimumskrav.	70
Tabell 28 - Grenseverdier for lengste etterklangstid i skoler, barnehager, lokaler for SFO, og førsteklasserom. Etter NS 8175	72
Tabell 29 - Flatemasse til forskjellige betongtykkelser [77].	74
Tabell 30 - Bestemmelse av risikoklasse	76
Tabell 31 - Beskrivelse av brannklasser	76
Tabell 32 - Bestemmelse av brannklasse	76
Tabell 33 - Bærende hovedsystem verdier for gitte brannklasser.....	77
Tabell 34 - Kostnader knyttet til brannisolering av stål i dimensjonert bæresystem.....	79
Tabell 35 - Brannmotstandskrav til betong.....	80
Tabell 36 - Beregning av forkullingsdybde og resttverrsnitt.....	81

Formelliste

Formel 1 - x-koordinat for SS	19
Formel 2 - y-koordinat for SS	19
Formel 3 – Gulvets treghetsradius.....	20
Formel 4 - Største tillate avstand mellom MS og SS.....	20
Formel 5 - Treghetsradius og maks avstand	20
Formel 6 - (6.61) og (6.62) kombinert virkning.....	40
Formel 7 - Dimensjonerende moment og strekkraft for bolteforbindelse.....	47

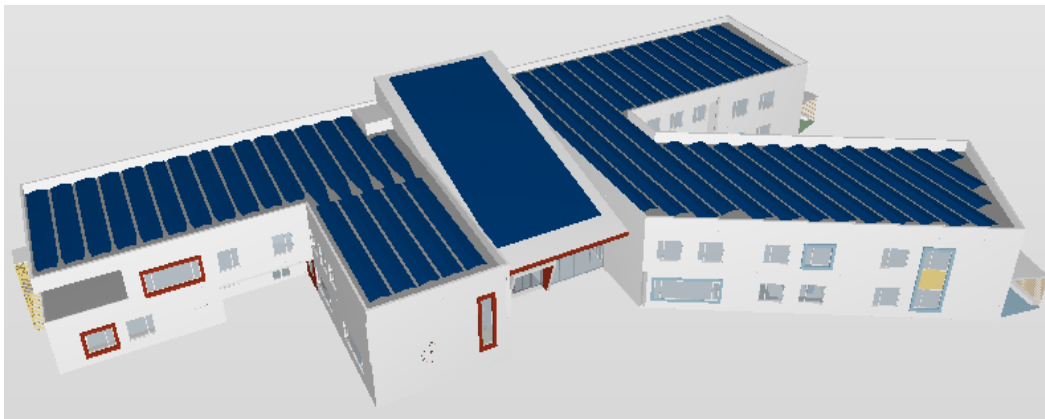
Symbolliste

Symbol	
6.6 Akustikk	
R	Lydreduksjonstall
R_w	Veid reduksjonstall (laboratoriemålt)
R'_w	Veid reduksjonstall (feltmålt)
L	Lydtrykk
L_w	Veid trinnlydnivå (laboratoriemålt)
$L'_{n,w}$	Feltemålt veid normalisert trinnlydnivå (feltemålt)
T	Etterklangstid
$C_{50-5000}$	Omgjøringstall for lavfrekvent spektrum (luftlydisolasjon)
$C_{I,50-2500}$	Omgjøringstall for lavfrekvent spektrum (trinnlydnivå)
6.7 Brann	
REI	Bærende og skillende bygningsdel
R	Bæreevne ved brann
E	Integritet
A	Ubrennbare materialer
A2	Begrenset brennbare materialer
B	Brennbare materialer
S1	Røykintensitet
d0	Mengde brennende partikler

1. Innledning

1.1 Prosjekt Tveten skole

Nye Tveten ungdomsskole er et prosjekt tildelt HR Prosjekt AS (HRP) sitt fagmiljø for arkitektur, rådgivning og prosjektering, engasjert av Porsgrunn kommune som prosjekteringsgruppe. Prosjektet skal etableres som et nybygg på samme tomt som dagens eksisterende skole, og har et totalt bruttoareal på omkring 4500m². Prosjektet gjennomføres som en totalentreprise med en ramme på rundt 200 millioner kroner. Skolen skal romme om lag 360 elever og 45 ansatte, og vil bygges med tradisjonell klasseromsinndeling [1].

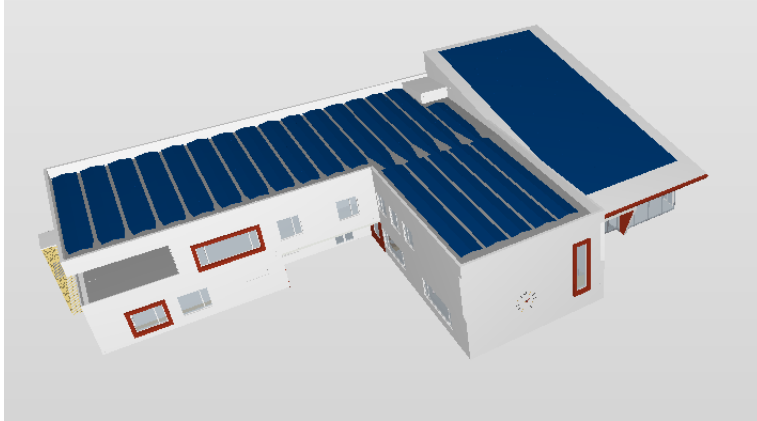


Figur 1 - Arkitektmodell vist i Solibri

1.2 Problemformulering

Hensikten med oppgaven er å dimensjonere et nytt bæresystem bestående av stål og betong, og foreta en alternativsvurdering av et forprosjektet bæresystem i tre fra HRP. Dimensjoneringen baseres på krav fra norsk standard, og vil bli utført i FEM-design, samt kontrollert for hånd. Sammenligningen av bæresystemene vil ta for seg materialenes egenskaper, og gi en indikasjon over hvilke løsning som vil være mest gunstig for diverse kategorier som miljø, akustikk, brann og økonomi.

Oppgaven er avgrenset til å kun se på byggets vestlige fløy og midtparti, se figur 2. Dette gjøres av praktiske grunner, da det ville ført til økte mengder av tilsvarende beregninger å se på hele bygget.



Figur 2 - Avgrenset modell i Revit

1.3 Bakgrunn

Byggebransjen har gjennom lang tid hovedsakelig tatt i bruk byggematerialene stål og betong som bæresystemer av ulike konstruksjoner. I nyere tid derimot, har stadig flere prosjekter begynt å ta i bruk tre. Tre har gode egenskaper som miljøvennlighet og enkel bearbeiding, som sammen med dagens teknologi også gjør materialet godt egnet til bruk i større prosjekter [2]. Med et økt miljøfokus i bransjen er det ofte tre som blir benyttet i nyere prosjekter for å tilfredsstille miljøambisjoner. Nye Tveten ungdomsskole er et av flere nybygg som følger trenden og tar i bruk tre som bæresystem, med flere miljøkrav tilknyttet prosjektet.



Figur 3 - Prospekt nye Tveten skole [3]

Til tross for ny teknologi og økt fokus på tre, kommer en likevel ikke alltid unna bruken av betong. Materialet defineres som mer fleksibelt, samt besitter mer praktiske egenskaper enn tre. Betong egner seg svært godt til større konstruksjoner, da disse stiller strengere krav til bæreevne og bestandighet. Lønnsomhet og effektivitet er også faktorer som kan bidra til at valg av byggemateriale enklere faller på betong. Nye Tveten ungdomsskole er et relativt stort prosjekt, og det vil være nødvendig med betong som fundament. Ut ifra dette vil det foretas en dimensjonering av stål og betong, for å se om dette kan konkurrere med et bæresystem i tre knyttet til miljøambisjoner og flere andre egenskaper.



Figur 6 - Stål på byggeplass [97]



Figur 5 - Betong på byggeplass [98]



Figur 4 - Tre på byggeplass [99]

1.4 Metode

Beregninger og valg i rapporten er blitt utført i henhold til Norsk standard og forskrifter ved bruk av ulike dataprogrammer og håndberegninger.

1.4.1 Revit

Revit 2021 er et av flere nyttige modelleringsprogrammer innenfor bygningsinformasjonsmodellering (BIM). Programmet gir muligheter til god kommunikasjon mellom de ulike aktørene via en felles plattform med en samordningsmodell. Aktører innenfor konstruksjon, arkitektur og design får dermed bedre omstendigheter til å realisere konsept til idé, og generelt bedre flyt mellom fagfeltene.

Revit er benyttet som en modellfunksjon for å få et geometrisk overblikk, og vil videre effektivisere vurderinger av bæresystem. Modellen vil opparbeides ved hjelp av tildelt IFC-fil og plantegninger for konstruksjonen dimensjonert i massivtre. Arkitektmodellen vil hjelpe oss med grov plassering av bærende elementer, men vil ikke være til hinder for eventuelle optimaliseringer. Videre vil modellen være utgangspunkt for beregninger og dimensjonerings i FEM-Design.

1.4.2 FEM-Design 20

FEM-Design er et mer avansert beregnings- og modelleringsprogram, som utfører beregninger ved hjelp av elementmetode-analyser for dimensjonering av enkle og kompliserte konstruksjoner i 2D og 3D. Her er det muligheter for analyser av blant annet statikk, dynamikk, stabilitet, jordskjelv samt dimensjoneringer av stål, betong og tre med stor nøyaktighet. Analysen utføres i en komplett 3D-modell i henhold til selvdefinerte eurokoder og nasjonal standard med tillegg [4]. FEM-Design vil bli benyttet til modellering og dimensjonering av skolebygget.

1.4.3 Ove Sletten programmer (OS)

Ove Sletten programmer er en samling av ulike programvarer for beregning og dimensjonering av diverse laster og konstruksjoner. Disse har et svært enkelt brukergrensesnitt, og gir raske og nøyaktige beregninger. Programmene bygger på norsk standard og lang erfaring innenfor byggeteknikk og programmering [5].

OS-Lastberegning – Vindlast og Snølast

Lastberegning beregner snølast og vindlast med formfaktorer som angitt i «NS-EN 1991-1-3» og «NS-EN 1991-1-4». I programmet legger en inn parametere knyttet til geografi og byggets utforming, og får så ut en fullstendig lastrapport. Verdiene blir videre benyttet i FEM-Design.

V-skive

Programmet beregner kraftfordelingen i vertikale skiver som benyttes i avstivning i et bygg. Videre kan det beregne momenter og skjærkrefter i horisontale dekkeskiver, spenninger og elementkrefter i vertikale skiver, seismiske laster og lastvirkning i DCL [6]. Programmet er benyttet som en avstivningskontroll for bygget.

1.4.4 One Click LCA (2015)

One Click LCA er en brukervennlig og automatisert programvare for livssyklusvurdering, som inneholder verdens største generiske- og EPD database. Programmet gir muligheter til å enkelt beregne miljøpåvirkningen fra bygningsprosjekter og produkter. Her kan det sammenlignes både produkters påvirkning på miljøet, samt ulike prosjektløsninger.

One Click LCA er derfor særst egnet for å sammenligne miljøpåvirkningen mellom bæresystemene, samt muligheter til å optimalisere systemene. Livsløpsanalysen og bruken av One Click LCA gjennomgås nærmere i kapittel 6.1.2.

1.4.5 PTC MathCAD Prime 3.0

MathCAD er et nyttig systematiseringsverktøy som egner seg for håndberegninger. Programmet er benyttet til diverse utregninger og fremførelse av disse.

1.4.6 Standarder

All dimensjonering og utregninger i oppgaven er utført i henhold til gjeldende standarder, forskrifter og tillegg. Oversikt over standarder som er benyttet i oppgaven vises i tabell 1.

Betegnelse	Tittel
NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016	Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner
NS-EN 1991-1-1:2002+NA:2008	Eurokode 1: Laster på konstruksjoner Del 1-1: Allmenne laster - Tetthet, egenvekt og nyttelaster i bygninger
NS-EN 1991-1-3:2003+NA:2008	Eurokode 1: Laster på konstruksjoner Del 1-3: Allmenne laster - Snølaster
NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009	Eurokode 1: Laster på konstruksjoner Del 1-4: Allmenne laster - Vindlaster
NS-EN 1992-1-1:2004+NA:2008	Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger
NS-EN 1993-1-1:2005+A1:2014+NA:2015	Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger
NS-EN 1998-1:2004+NA:2008	Eurokode 8: Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning Del 1: Allmenne regler, seismiske laster og regler for bygninger
NS-EN 8175:2012	Norsk standard: Lydforhold i bygninger – lydklasser for ulike bygningstyper

Tabell 1 - Oversikt over standarder

2. Grunnleggende om stål, betong og tre

Stål

Legeringen stål blir ansett som verdens viktigste byggemateriale grunnet sine mange kvaliteter. Stål betegnes som sterkere og mer varig enn andre materialer, miljøvennlig, fleksibelt og kostnadseffektivt [7]. Rent konstruksjonsteknisk har stål et høyt forhold av styrke kontra vekt, og vektbesparelsen fører blant annet til mindre transport og bedre utnyttelse av bygningsvolum. Til tross for høye klimagassutslipp under produksjon, har stål et lavere uttak av naturressurser da det er 100% resirkulerbart [8]. Det anslås at over 30% av verdens produksjon baseres på resirkulerbart skrap, noe som skiller det fra andre byggematerialer [7]. Bæresystem i stål, som regel i kombinasjon med betong, er det mest anvendte metoden i byggebransjen. Grunnet materialets fordeler kan en dimensjonere med store spennvidder, og ta i bruk søyler og bjelker der det er gunstig. Dette er spesielt en fordel i større bygg der det kan oppstå store spennvidder og lastpåkjenninger.

Betong

Betong er det dominerende konstruksjonsmaterialet i byggebransjen, da det er et svært allsidig og billig materiale. Det anslås at betong står for halvparten av verdens byggematerialer. Betong brukes som både plasstøpte konstruksjoner og prefabrikkerte betongelementer [9]. I nyere tid har derimot flere aktører begynt å ta i bruk mer miljøvennlige byggematerialer. Betongproduksjon er nemlig en miljøversting i bransjen, hvor sementproduksjon alene står for rundt 7-8% av verdens totale CO₂-utslipp [10]. Som bæresystem er betong ofte tatt i bruk sammen med stål da disse utfyller hverandres egenskaper, men kan også bære enkelte konstruksjoner alene.

Tre

Tre har i mindre grad blitt brukt som bæreelement, da egenskapene ikke er like godt egnet til bygging av større konstruksjoner. Likevel har materialet fått et større oppsving de siste årene grunnet ny teknologi, og et økt fokus på miljø i bransjen. Dagens teknologi gjør at en kan ta i bruk hele spekteret av produkter fra bindingsverk, elementer, moduler og stivere, samt gir mulighet for større spennvidder. Dette gjør trebaserte løsninger konkurransedyktige i alt fra landbruks- og forretningsbygg, samt boligblokker og næringsbygg [2]. På nye Tveten skole skal det tas i bruk massiv- og limtre som bærende element. Generelle fordeler med bæresystem i massivtre er at alle vertikale elementer i konstruksjonen kan fungere som bærende elementer, som gir større estetiske friheter. I forhold til stål og betong vil det også være en kortere byggetid knyttet til bæresystemet. I tillegg til miljøaspektet er sentrale egenskaper som fleksibilitet, lav egenvekt og gode brannegenskaper sentrale for valg av tre.

3. Lastgrunnlag

Laster som påføres konstruksjonen regnes ut i diverse regneprogrammer, og i henhold til norske standarder.

3.1 NS-EN 1990 Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner

Grunnlag for prosjekteringen bygger på utredning utført av HRP, og er videre utredet i henhold til standarden «NS-EN-1990 Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner». Dette er en overordnet standard for hele Eurokode-serien, og beskriver grunnlaget for prosjektering og verifikasjon av konstruksjoner, samt kommer med krav til konstruksjonens pålitelighet [11]. Oversikt over brukskategori, pålitelighetsklasse og lastkombinasjoner som er lagt til grunn for beregninger er vist i tabell 2.

Grunnlag for prosjektering		NS-EN-1990
Brukskategori	Klasse 4	[2.3] Tabell 2.1
Pålitelighetsklasse	Klasse 3	Tabell NA.A1 (901)
Last kombinasjon	Bruddgrense	6.10a og 6.10b
	Bruksgrense	6.14a til 6.16b

Tabell 2 - Grunnlag for prosjektering

I standarden er det angitt ulike kombinasjonsfaktorer til hver enkelt last og tilhørende lastfaktor, se tabell 3. Disse legges inn i FEM-Design, slik at beregningene utføres korrekt.

NS-EN-1990			
Punkt NA.A1.2.2(1), Tabell NA.A.1.1 - Verdier for Ψ -faktorer for bygninger			
Laster	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Nyttelast	0.7	0.7	0.6
Snølast	0.7	0.5	0.2
Vindlast	0.6	0.2	0.0
Egenlast	Lastfaktor inneholder ikke kombinasjonsfaktor		

Tabell 3 – Kombinasjonsfaktorer

3.2 NS-EN 1991-1-1 Laster på konstruksjoner

Eurokode (EC) 1 angir bestemmelser for ulike laster på konstruksjoner. Påvirkningene bestemmes for aktuelle «lastsituasjoner» i samsvar med «NS-EN-1990». De aktuelle lastpåvirkningene som blir beregnet er nyttelast, egenlast, vindlast, snølast og ulykkeslast.

3.2.1 Nyttelast

Standarden «NS-EN-1991-1-1 Laster på konstruksjoner» definerer brukskategorien (**A-D**) til bygget i tabell NA.6.1. Bygget omfattes av kategori **C**, definert som arealer der personer kan samles. Kategori **C** er videre definert i underkategorier, hvor skolebygg normalt omfattes av kategori **C₁**, vist i tabell 4. Til sikker side er det valgt å plassere bygget i kategori **C₂** for nyttelast, da skolen også kan falle inn under denne beskrivelsen.

NS-EN 1991-1-1: Tab. NA.6.2		
Underkategori	Verdi	Beskrivelse av areal m/eks.
C₁	3 kN/m ²	Arealer med bord osv., f.eks. skoler, restauranter og leserom
C₂	4 kN/m ²	Arealer med faste seter, f.eks. forsamlingssaler og konferanserom
C₃	5 kN/m ²	Arealer uten hindringer for bevegelse, f.eks. museer og hoteller
C₄	5 kN/m ²	Arealer med fysisk aktivitet, f.eks. dansesal
C₅	5 kN/m ²	Arealer som lett overfylles, f.eks. konsertsaler og idrettshaller

Tabell 4 - Brukskategori for skolebygget

3.2.2 Vindlast

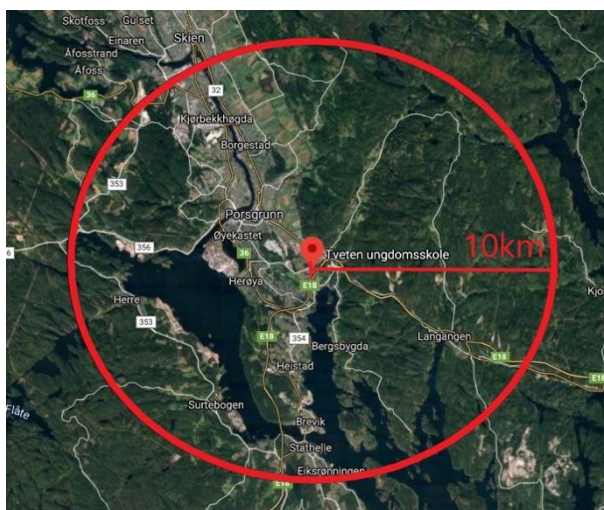
Bygget er lokalisert nærliggende sjø, og kan derav anses som vindutsatt. Når en regner på vindlaster ser man på byggets lokasjon i terrenget, og deler da inn i terrengruhetskategoriene **0** til **IV** som indikerer sonens ruhet fra lav til høy. Bygget er vurdert til terrengruhetskategori **III**, med nærliggende sjø, kategori **I**, 1km ifra. Som figur 7 og figur 9 fremviser, er det en tilstrekkelig strøklengde på flere kilometer inn mot bygget. Dette blir hensyntatt under beregninger av vindhastighet og vindlast, se vedlegg B1.



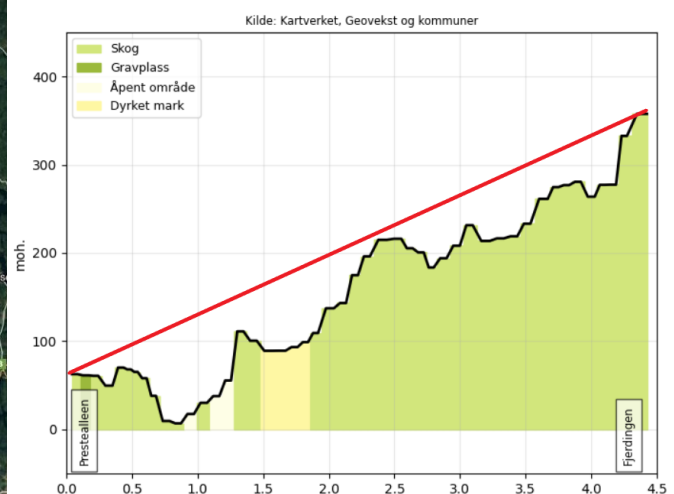
Figur 7 - Avstand til ny ruhetssone

Beregninger ble utført i programmet «OS - Lastberegninger». Alle utregninger er utført i henhold til «NS-EN 1991-1-4 Vindlaster». Referansevindhastigheten $V_{b,0}$ er 23m/s for Porsgrunn kommune. Denne kan reduseres, men de aktuelle faktorene for dette er konservativt satt til 1,0, slik at basisvindhastighet er lik referansevindhastigheten.

Videre må det tas hensyn til om byggested er innenfor en radius på 10km fra nærliggende fjell og skråninger på 30° eller mer. Om dette er tilfellet skal det tas hensyn til en økning av stedvindhastighet. Figur 8 viser at den største skråningen innenfor 10km ikke overstiger 30°, og det er dermed ingen topografieffekter til stede.



Figur 8 - Største skråning innenfor 10km på ca 3,7° (t.h.). Illustrasjon hentet fra Kartverket.



Figur 9 - Opptegnet avstand, 10km radius fra byggeplass (t.v.). Kart hentet fra Google Maps.

I *Lastberegninger* er det opprettet to lasttilfeller, som skiller skråtaket alene med resten av bygget. Videre er det benyttet verst tilfelle for hver retning som utgangspunkt i FEM-Design, med tilhørende projeksjoner, se vedlegg B2.

3.2.3 Snølast

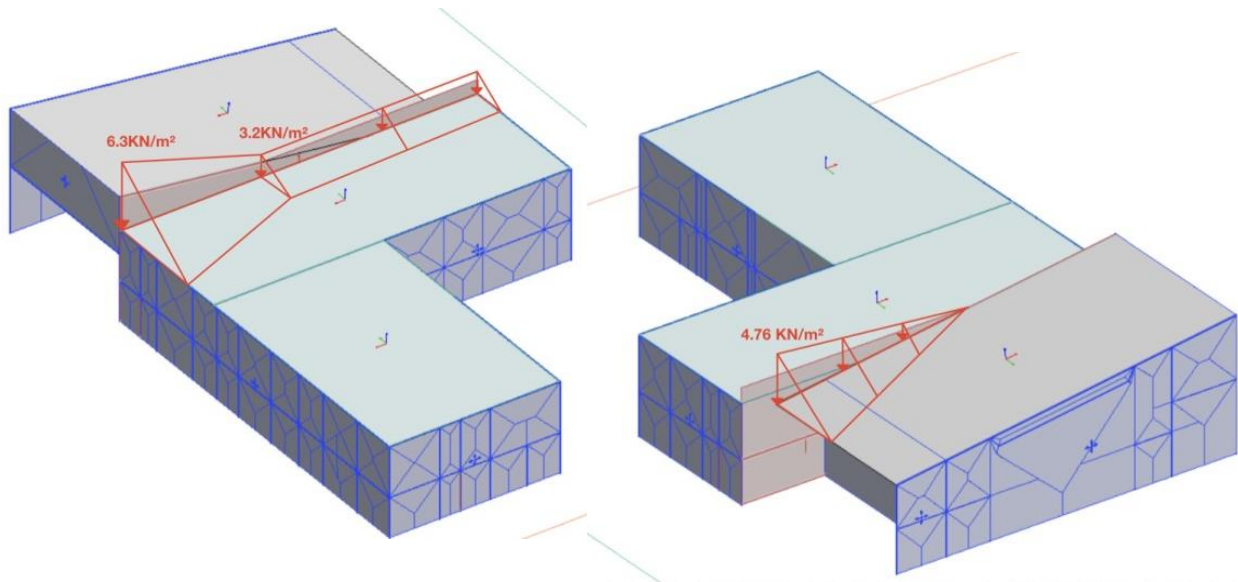
Beregninger for snølast er utført i programmet OS-Lastberegninger, og kontrollert for hånd. Alle utregninger er blitt gjort i overenstemmelse med «NS-EN 1991-1-3 Snølaste».

Kommunens høydegrense på 150 meter overstiges ikke av bygget, noe som medfører at det ikke vil bli et lasttillegg på den karakteristiske snølasten på 4kN/m^2 . Formfaktor er lik 0.8 for flate tak og skråtak med en vinkel på $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$, og gjelder da for hele bygget. Dette fører til en snølast på $S_k = 3.2\text{kN/m}^2$. Eksponeringskoeffisient og termisk koeffisient vurderes begge til normal verdi på 1.0, da det er normal topografi i området og ingen særlige hensyn å ta angående varmetap.

Karakteristisk snølast S_k		
$S_k = S_{k,0} C_e C_t \mu_i$		
Høydetillegg	$\pm \Delta S_k$	0.0kN/m^2
Eksponeringskoeffisient	C_e	1.0
Termisk koeffisient	C_t	1.0
Formfaktor	μ_i	0.8
$S_k = 3.2\text{kN/m}^2$		

Tabell 5 - Karakteristisk snølast med faktorer.

Ettersom at det er høydeforskjell mellom midtpartiet og vestfløyen, må det gjøres ekstra beregninger i henhold til **pkt. [6.2]**. Her blir det tatt hensyn til hvordan snølasten på det flate taket vil få en tilleggslast i områdene ved høydeforskjellen i en bestemt utstrekning, se figur 10.



Figur 10 - Illustrasjon av snølast grunnet fonning

Utrekning av snølast fra fonning er utført i FEM-Design, hvor en forenklet tilnærming måtte innføres grunnet begrensninger i programmet. Forenklingen fører til en konservativ betraktning, se vedlegg B5. Komplette snølastrapport utført i OS-lastberegning samt justering for høydeforskjell kan ses i vedlegg B3 og B4.

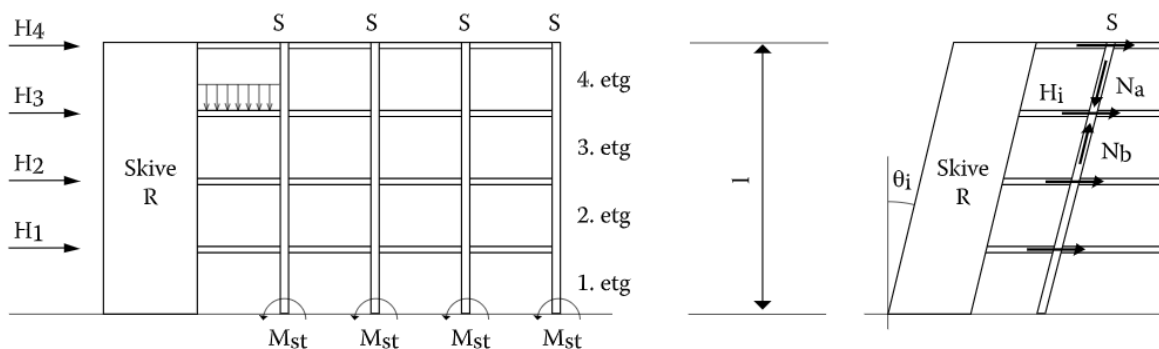
3.2.4 Ulykkeslast

Ulykkeslaster defineres i henhold til «NS-EN-1991-1-7 Ulykkeslaster». Seismisk last fra jordskjelv er per definisjon en ulykkeslast, og har særskilte regler. Utrekning av seismisk last er derimot ikke tilknyttet **EC1**, da denne har en egen standard i **EC8** og vil bli gjennomgått i kapittel 3.3. Brann er også kategorisert som en ulykkeslast, som vil bli gjennomgått i kapittel 6.5. I denne standarden blir derfor påkjøringslast ansett som den mest relevante ulykkeslasten. Skolen ligger ikke ved noen høytrafikkert vei, og trafikkavviklingen er ellers konsentrert slik at store deler av skolens uteareal er bilfritt. Adkomst til bygget med kjøretøy foregår et tilstrekkelig stykke unna selve skolen, og det er antatt strenge trafikale regler knyttet til vareleveringsvei. Området vil derfor være tilstrekkelig isolert fra trafikkert vei, og det velges å ikke utføre ekstra tiltak for å forsterke søyler i fasaden. På grunnlag av dette utelates ulykkeslaster fra beregninger.

3.3 Skjevstillingslast

Skjevstilling, eller helningsavvik, er en form for geometrisk avvik i et bygg, og spesifiseres nærmere i «NS 3490». I en konstruksjonsanalyse skal det tas hensyn til ugunstige virkninger av mulige avvik i konstruksjonens geometri, og i plassering av lastene. Geometriske avvik skal hensyntas for permanente dimensjonerende situasjoner og for dimensjonerende ulykkesituasjoner. Dette er kun nødvendig i bruddgrensetilstander [12, bind B9].

For å regne ut skjevstillingslasten, må en finne den totale tyngdebelastningen til bygget. Utrekningene for skjevstillingslast er utført i FEM-Design, ved å benytte **Deviation**-funksjonen. Programmet beregnet en skjevstillingslast på 0.048kN/m^2 for hvert tilfelle av horisontal retning. Figur 11 illustrerer hvordan skjevstillingslast fungerer på et bygg, der et støttemoment i bunnen av de vertikale skivene motvirker horisontallasten. θ_i tilsvarer helningsavviket som oppstår.



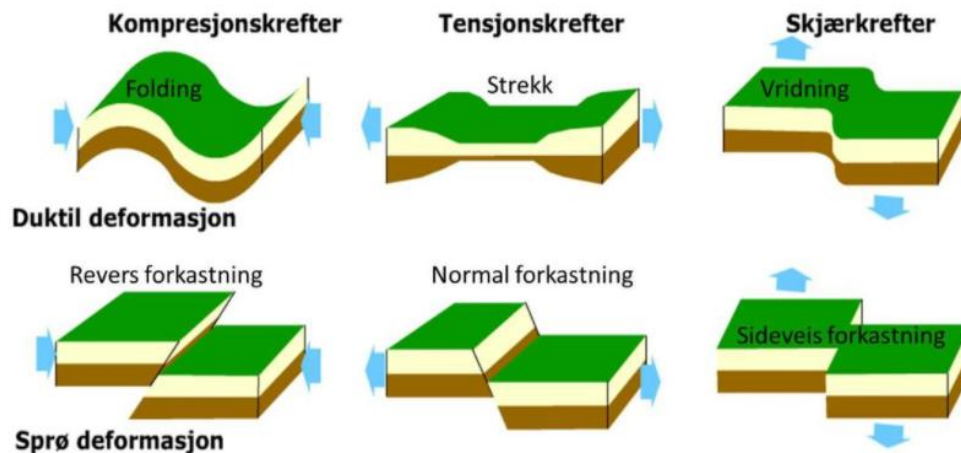
Figur 11 – Skjevstilling illustrasjon [12, bind B9]

3.4 Seismisk last

3.4.1 Opphav til jordskjelv

Når jordplatene beveger seg i forhold til hverandre, støter sammen eller driver fra hverandre, dannes det geologiske fenomenet jordskjelv. Jordskjelv kommer i utgangspunktet av plutselige naturlige brudd i jordskorpen, som igjen sender ut elastiske bølger. Den graden vi fysisk legger merke til de elastiske bølgene avhenger av intensiteten, som avtar med avstanden fra jordskjelvets sentrum. De naturlige bruddene kan glippe i forhold til hverandre siden platene beveger seg kontinuerlig. Dette danner da friksjon som langsomt bygger opp kraftige skjærspenninger, og jordskjelv oppstår. Prinsippet med glippet mellom jordplatene kalles elastisk retur [13].

Jordskjelvene som dannes i Norge kommer derimot fra kontinentale, regionale og lokale årsaker som kontinentaldrift, landheving, sedimentasjon og variasjoner i jordskorpens egenskaper [13], da landet ikke ligger over en kontinental platesprekk.



Figur 12 – Platebevegelser [14]

3.4.2 Jordskjelv i Norge

I bygningsforbindelse kategoriserer vi jordskjelv som seismisk last og påkjenning. Selv om Norge har relativt lav seismisk aktivitet i forhold til andre land i Europa, kreves det likevel å følge jordskjelvstandarden, **EC8**. Denne angir seismiske laster på bygg og konstruksjoner samt hvilke utelatelseskriterier som gjelder [15]. Richterskalaen karakteriserer styrken på jordskjelv fra 1-12, hvor Norge aldri har hatt høyere enn 6. Til tross for at gjennomsnittet av skjelvene i Norge er relativt lave, har likevel enkelte blitt lagt merke til helt opp til 1000km unna, og har ført til skader og konsekvenser. Seismisk last vil fortsette å være et faremoment i Norge, og må derfor tas hensyn til under dimensjonering [13].

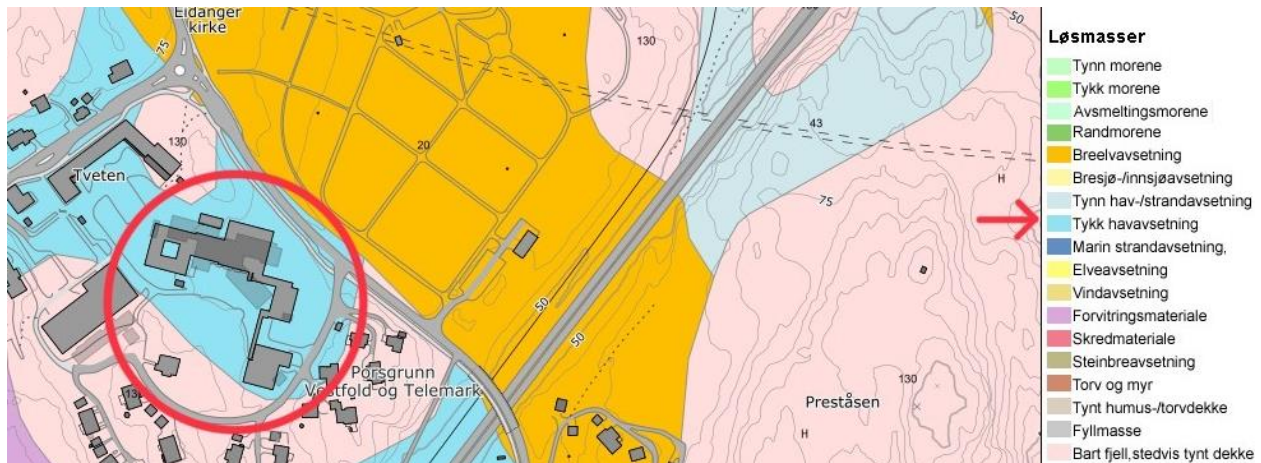
3.4.3 Jordskjelvsanalyse

De områdene i Norge man oftest finner regelmessige skjelv er langs hele kontinentalsokkelen, i Nordsjøen, langs kysten av Vestlandet og Nord-Norge, samt i Oslo-området [13]. Av disse beliggenhetene befinner Porsgrunn kommune seg nærmest Oslo-området, og dermed bør seismisitet vurderes i prosjekteringsfasen og potensielt dimensjoneres for.

I videre seismisk vurdering refereres det til punkter i **EC8**, «NS-EN 1998-1:2004+NA:2008».

Grunntype

Det er nødvendig å kjenne til byggegrunn og hvilke typer løsmasser som ligger i området for å kunne klassifisere grunntypen. Vanligvis oppgis grunntypen av geoteknikker eller ut ifra stedlig kunnskap, da **pkt. 3.1.2(2)** angir at byggegrunnen bør klassifiseres etter verdien av den gjennomsnittlige skjærbølgehastigheten. Det ble utført en undersøkelse av dette i kartverket til Norges Geologiske Undersøkelse (NGU).



Figur 13 - Løsmassekart i byggeområdet med oppført gammel skole og skyggelagt ny skole

Figur 13 viser at byggeområdet består i hovedsak av tykke havavsetninger. Under kategorien tykke havavsetninger befinner det seg ofte marin leire og kvikkleirer i området rundt, noe som kan gi ugunstige forhold for stabilitet [16]. Det er likevel verdt å merke seg at de dominerende jordartene som vises i kartet til NGU kun beskriver de øverste meterne av terrengoverflaten. Figuren viser også antydninger til bart fjell i området, og her er det valgt å kontakte HRP for en mer detaljert geoteknisk og geologisk undersøkelse. Bedriften opplyste at undersøkelsene gjort på stedet vinkler byggegrunnen til grunntype B, som videre benyttes i seismisk analyse [16].

Tabell NA.3.1 – Grunntyper ¹⁾

Grunntype	Beskrivelse av stratigrafisk profil	Parametere ^{2) 3)}		
		$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (slag/30cm)	c_u (kPa)
A	Fjell eller fjell-liknende geologisk formasjon, medregnet høyst 5 m svakere materiale på overflaten.	> 800	–	–
B	Avleiringer av svært fast sand eller grus eller svært stiv leire, med en tykkelse på flere titalls meter, kjennetegnet ved en gradvis økning av mekaniske egenskaper med dybden.	360 – 800	> 50	> 250
C	Dype avleiringer av fast eller middels fast sand eller grus eller stiv leire med en tykkelse fra et titalls meter til flere hundre meter.	180 – 360	15 - 50	70 - 250
D	Avleiringer av løs til middels fast kohesjonsløs jord (med eller uten enkelte myke kohesjonslag) eller av hovedsakelig myk til fast kohesjonsjord.	120 – 180	10 – 15	30 – 70
E	Et grunnprofil som består av et alluviumlag i overflaten med v_s -verdier av type C eller D og en tykkelse som varierer mellom ca. 5 m og 20 m, over et stivere materiale med $v_s > 800$ m/s.			
S ₁	Avleiringer som består av eller inneholder et lag med en tykkelse på minst 10 m av bløt leire/silt med høy plastisitetsindeks ($PI > 40$) og høyt vanninnhold.	< 100 (antydnet)	–	10 - 20
S ₂	Avleiringer av jord som kan gå over i flytefase (liquefaction), sensitive leirer eller annen grunnprofil som ikke er med i typene A – E eller S ₁ .			

¹⁾ Hvis minst 75 % av konstruksjonen står på fjell og resten på løsmasser, og konstruksjonen står på ett kontinuerlig fundament (platefundament), kan grunntype A benyttes.

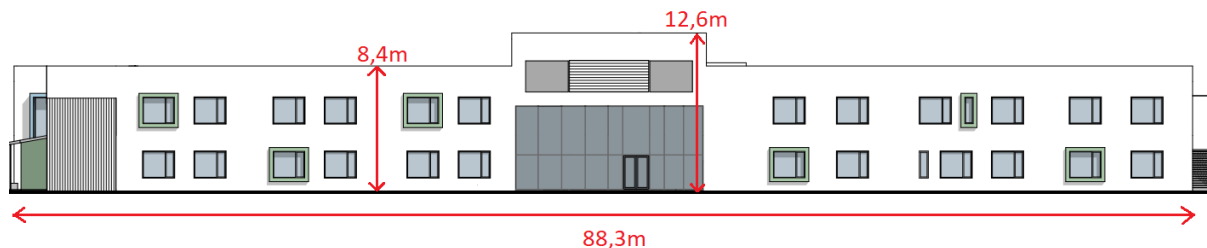
²⁾ Valget av grunntype kan være basert på enten $v_{s,30}$, N_{SPT} eller c_u . $v_{s,30}$ anses som den mest aktuelle parameteren å benytte.

³⁾ Der det er tvil om hvilken jordtype som skal velges, velges den mest ugunstige.

Tabell 6 - Tabell NA.3.1 - Grunntyper

Stivhet

Under jordskjelvanalyse er det nødvendig å ta for seg hele bygget i vurdering av stabiliteten som geometrien tilfører.



Figur 14 - Snitt av fasade fra arkitektmodell

En av bygningsdelene krager ut i sør-østlig retning, noe som gjør midtpartiet til et møtepunkt for tre ulike bygningsdeler. Byggets geometri, samt forholdet mellom høyde og lengde, fører til et lavt og sentrert tyngdepunkt som bidrar til gunstige stabilitetsforhold. Grunnet byggets geometri er det gunstig å dele opp bygget med fuge, og beregne jordskjelv for hver del.

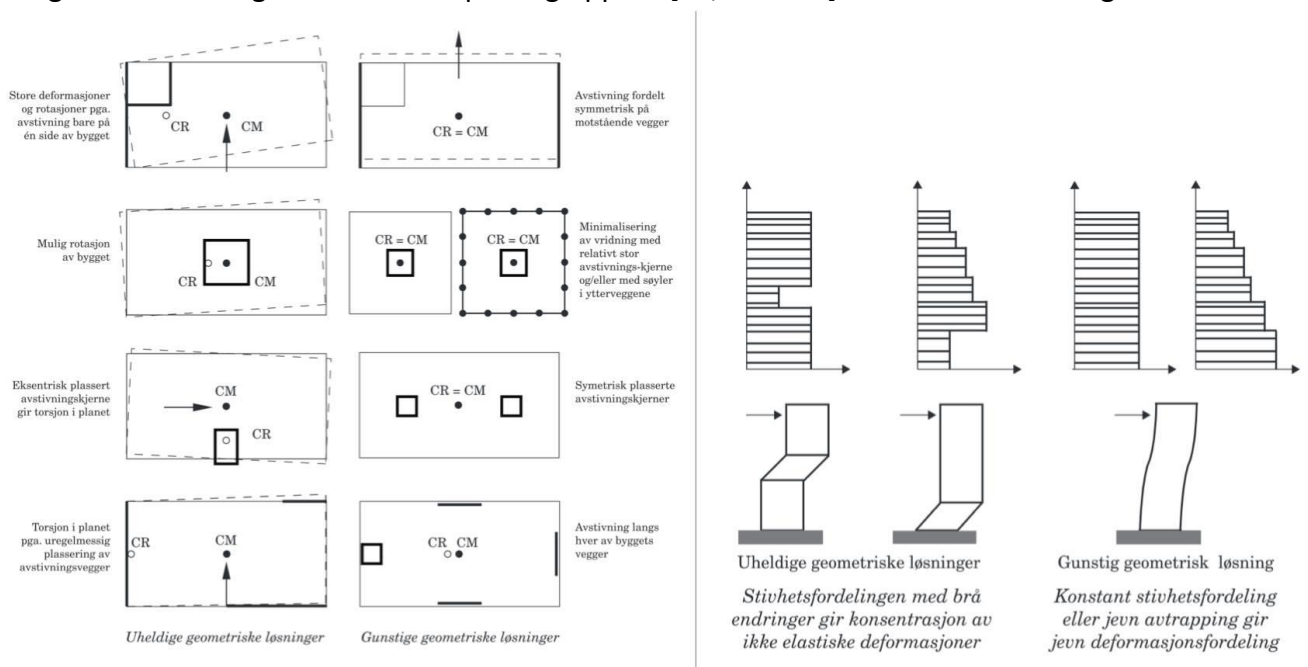
Fuge kan benyttes for å skille ulike bygningsdeler i en konstruksjon og gjøre dem til uavhengige enheter i forbindelse med seismisk last. Fugen skal sørge for at hver konstruksjonsdel kan bevege seg fritt i både x-, y- og eventuelt z-retning. Det er viktig å sørge for at fugen er tykk nok til å utføre oppgaven sin [25].

Den avgrensede modellen betraktes som selvavstivende, og kan benyttes som egen fugeinndeling. Videre analyser vil ta for seg denne modellen.

Regularitet

Regularitet beskrives i **pkt. [4.2.3]**, og tar for seg forholdet mellom masse og stivhet i oppriss og plan. Dersom en konstruksjon ikke tilfredsstillende regularitet, kan den bli utsatt for torsjon og videre deformasjoner når seismisk last påføres.

Punkt [4.2.3.2] og [4.2.3.3] beskriver de kriteriene som inngår for tilfredsstillelse av regularitet. Kriteriene for plan stiller krav til strenge begrensninger i geometrien, som de fleste bygg ikke vil tilfredsstillende [83]. En forenklet vurdering av kriteriene er at det skal unngås store og brå endringer i stivheter og masser i hvert plan og oppriss [12, bind H3]. Dette illustreres i figur 15.



Figur 15 - Prinsippkisser for regularitet i plan og oppriss [12, bind H3]

Når en dimensjonerer for seismisk last, går det et skille mellom konstruksjoner som er regulære og ikke-regulære. For ikke-regulære konstruksjoner stilles det generelt høyere krav til analysemetode, som vist i figur 16. God geometri og symmetri bidrar til regularitet, og gir et mer oversiktlig lastbilde der krefter kan fordeles jevnere på det bærende systemet [25]. Dersom en ikke havner inn under utelatelseskriteriene, er det nødvendig å se på byggets geometri, og derav regulariteten for å kunne fastslå en analysemetode. Utelatelseskriteriene vil bli nærmere gjennomgått senere i analysen.

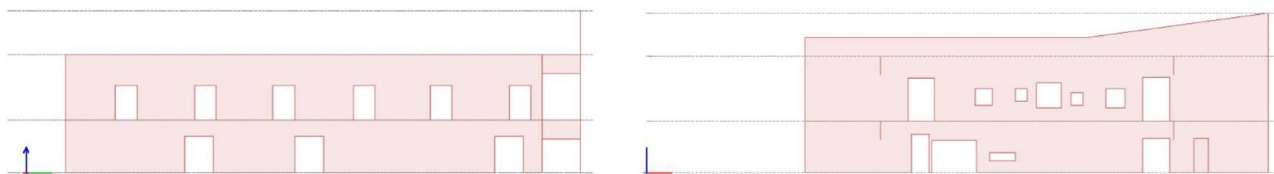
Regularitet i konstruksjonen		Tillatt forenkling (det vil si minstekrav til analyse)	
I planet	I oppriss	Modell	Lineær elastisk analyse
Ja	Ja	Plan	Tverrkraft ^{*)}
Ja	Nei	Plan	Modal
Nei	Ja	Romlig ^{**)}	Tverrkraft ^{*)}
Nei	Nei	Romlig	Modal

^{*)} Tverrkraftmetoden forutsetter at bare en svingeform er dominerende.

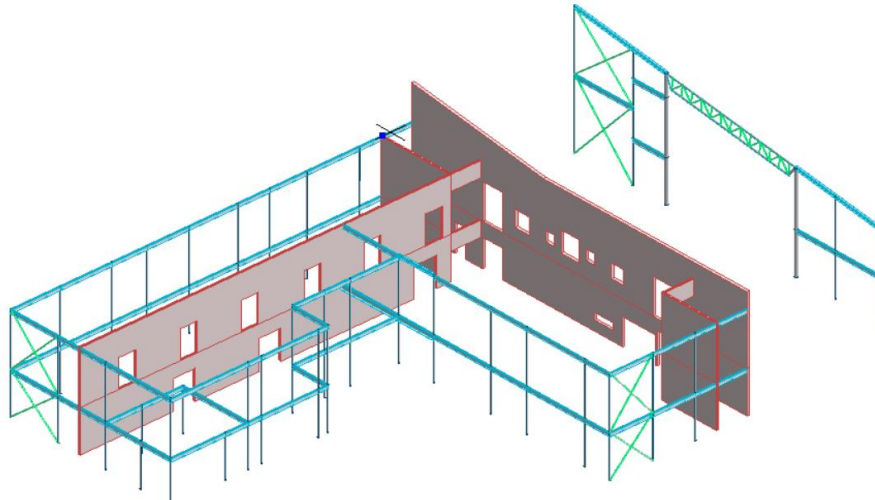
^{**)} Separat plan modell i hver ortogonal retning kan anvendes i seismisk klasse 2 ($\gamma_1 = 1,0$).

Figur 16 - Krav til konstruksjonsanalyse avhengig av konstruksjonenes regularitet [25]

Regulariteten til skolebygget vurderes forenklet ved å hovedsakelig utføre en visuell vurdering, med beregninger som hjelpemiddel dersom det oppstår uklarheter. Uten en slik forenkling ville det oppstått omfattende beregninger og analyser.



Figur 17 - Oppriss av avstivende betongskiver fra FEM



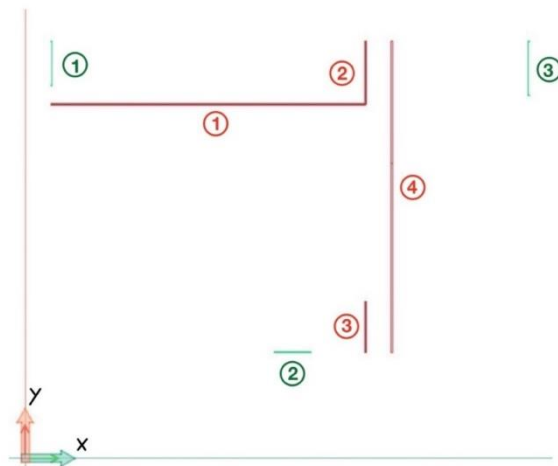
Figur 18 - Rammesystem med avstivende vindkryss og betongskiver fra FEM

Figur 17 og figur 18 viser at ingen brå endringer finner sted mellom etasjene. Øverste mønehøyde inngår ikke i noen etasjer og står kun for teknisk rom alene, og stivhetsavtrappingen vil dermed ikke være av konsekvens for resten av systemet. Geometrien vurderes dermed som tilstrekkelig for regularitet i oppriss.

For å kunne undersøke regulariteten i plan er det som nevnt nødvendig å finne lokasjonene til massesenteret og stivhetssenteret. Her er det valgt å hente ut informasjon om massesenteret fra FEM via en egenfrekvensanalyse, og beregne stivhetssenteret for hånd for å kunne få en nærmere forståelse av det avstivende systemet.

Under beregning av stivhetssenter er det blitt gjort noen forenklinger og forutsetninger basert på konservative og skjønnsmessige vurderinger. Forenklingene bestod av å se bort i fra den skrå delen til veggen som skiller de to partiene, samt utsparingssidene til sjaktene da disse ikke vil bidra avstivende i betydelig grad. Kontroll av avstivende system vil bli gjennomgått i kapittel 5.1.

Under utregning av stivhetssenter er det blitt benyttet et aksesystem som de avstivende delene vil forholde seg til, og som videre vil bli brukt til å beregne koordinatene til stivhetssenteret.



Figur 19 - Aksesystem for de avstivende elementene

	X [mm]	Y [mm]	t [mm]	h [mm]	L [mm]	K _x [Nmm ²]	K _y [Nmm ²]	K _x * X [Nmm]	K _y * Y [Nmm]
Vegg 1	28453	39245	200	8550	34580	1.8 * 10¹⁹		5.2 * 10²³	
Vegg 2	40686	42571	200	8550	6800		1.3 * 10¹⁷		5.5 * 10²¹
Vegg 3	40686	14713	200	8550	5880		8.2 * 10¹⁶		1.2 * 10²¹
Vegg 4	43447	29993	250	9900	34100		2.0 * 10¹⁹		5.9 * 10²³
Kryss 1	6112	43553		8550	4825		8.4 * 10¹¹		3.6 * 10¹⁶
Kryss 2	32538	11765		8550	4000	1.1 * 10¹²		3.6 * 10¹⁶	
Kryss 3	58682	43000		9900	5930		1.4 * 10¹²		6.0 * 10¹⁶
						Σ 1.8 * 10¹⁹	Σ 2.0 * 10¹⁹	Σ 5.2 * 10²³	Σ 5.9 * 10²³

Tabell 7 - Beregning av stivhetssenter

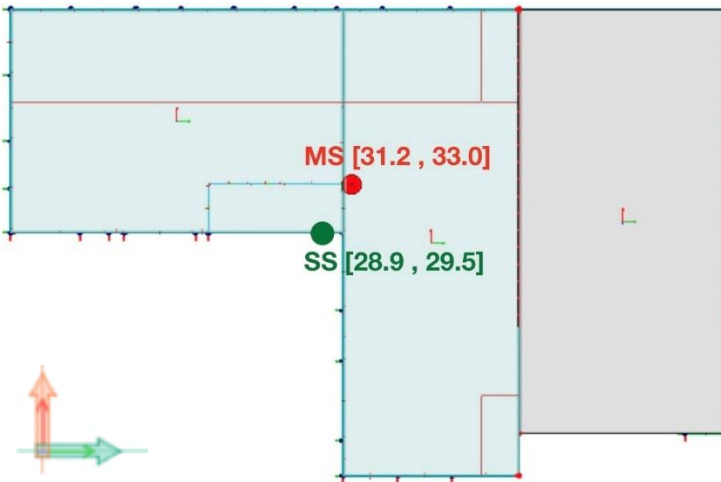
Tabell 7 viser de avstivende delene listet opp med koordinater, dimensjoner og stivhet. Her er det neglisjert stivhet i tykkelsesretning, og dermed er det kun verdi for stivhet i en retning per konstruksjonsdel. Videre ble koordinatene til stivhetssenteret beregnet ved hjelp av formel 1 og formel 2.

$$X = \frac{\Sigma K_x * X}{\Sigma K_x} = \mathbf{28.9m}$$

Formel 1 - x-koordinat for SS

$$Y = \frac{\Sigma K_y * Y}{\Sigma K_y} = \mathbf{29.5m}$$

Formel 2 - y-koordinat for SS



Figur 20 - Stivhetssenter (SS) og massesenter (MS)

Figur 20 viser stivhetssenter plassert ved randen av byggets inntrukne hjørnedel, med noe displasering i forhold til massesenteret. Ut fra disse resultatene kreves det mer konkrete tall på om regulariteten i plan tilfredstilles. Betongelementboken viser til en forenklet metode for å undersøke avstanden mellom MS og SS, basert på standardens metode fra **Pkt. 4.2.3.2(6)**.

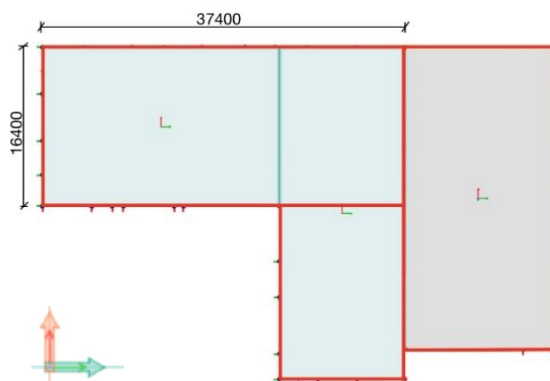
$$I_s = \sqrt{(l^2 + b^2) / 12}$$

Formel 3 – Gulvets treghetsradius

$$e_{0x} \leq 0,30 \times I_s$$

Formel 4 - Største tillate avstand mellom MS og SS

Under utregning av gulvets treghetsradius er bygget forenklet delt opp i deler som kan avviste seg selv, og deretter kun beregnet for delen som inneholder både SS og MS.



Figur 21 - Inndeling av selvavstivende deler

$$I_s = \sqrt{\frac{37400^2 + 16400^2}{12}} = 11.789m$$

$$e_{0x} = e_{0y} = 0.3 * I_s = 3.5m$$

Formel 5 - Treghetsradius og maks avstand

Koordinatene til SS og MS har en differanse på 2.3m i x-retning og 3.5m i y-retning i forhold til hverandre. Som vist i formel 5, havnet maksimal tillatt avstand på 3.5m i begge retninger, og med dette vurderes bygget regulært i plan. Dette blir en veldig forenklet tilnærming, og det bør undersøkes nærmere med kriteriene beskrevet i standarden.

Utelatelseskriterium

Norge defineres som et lavseismisk område, og **EC8** angir derfor prosedyrer til å utelate seismisk påkjenning i dimensjonering. Det er totalt fire kriterier som stiller til grunn, der minst ett av kriteriene må oppfylles for å kunne utelate seismisk påkjenning.

Utelatelseskriterier	Beskrivelse
1) Konstruksjoner i seismisk klasse 1	Pkt. NA.3.2.1(5)P angir at konstruksjoner i seismisk klasse 1 ikke behøver påvisning for tilstrekkelig sikkerhet.
2) Svært lav seismisitet	<p>Pkt. NA.3.2.1(5)P angir at dersom;</p> $a_g * S = Y_1 * (0.8 * a_{g40Hz}) * S < 0.05 * g$ <p>(Definisjonen på svært lav seismisitet)</p> <p>Er videre påvisning ikke nødvendig.</p>
3) Dimensjonerende spektrum mindre enn $0,05 * g = 0,49m/s^2$	<p>Dimensjonerende spektrum ($S_d(T)$) må beregnes med følgende betingelser;</p> <ul style="list-style-type: none"> - Konstruksjonsfaktor (q) valgt til maksimum 1.5 DCL (lav duktilitet). - Det er ingen reduksjon av stivhetsegenskaper etter pkt. [4.3.1(7)]
4) Størrelse på krefter	<p>Pkt. [4.4.1(2)] viser til at dersom konstruksjonen er i seismisk klasse lavere enn IV, kan en se bort fra påvisning av tilstrekkelig sikkerhet hvis skjærkraften på grunnivå eller ved OK stiv kjeller er mindre enn fra andre relevante lastkombinasjoner.</p> $1.0 * F_b < (1.5 * VIND + 1.05 * SKJEV) * \frac{Y_{cBruddgrense}}{Y_{CDLC}}$ <p>Betingelser for utregning;</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kraften må være basert på lineær elastisk analyse av bygget - Konstruksjonsfaktor settes til maks 1.5 DCL - Bygget må tilfredsstille krav for regularitet i plan og oppriss. - Den lineær elastiske analysemodellen skal være representativ for bygget.

Tabell 8 - Utelatelseskriterier for seismisk dimensjonering [25]

Seismisk klasse

For å kunne gjennomføre kriteriene må bygget plasseres i en seismisk klasse.

Den seismiske klassen skal velges ut fra konsekvenser ved sammenbrudd av konstruksjonen, der fare for menneskeliv, tap i økonomi og miljø er de viktigste kriteriene som legges til grunn [12, bind H2]. Nasjonalt tillegg i **EC8** viser til veiledende tabell **NA.4.(902)** som klassifiserer byggverk for seismiske laster. For unntak av skoler og institusjonsbygg velges seismisk klasse lik pålitelighetsklasse [83].

Tabell NA.4(902) – Veiledende tabell ved valg av seismisk klasse

Byggverk	I	II	III	IV
Byggverk der konsekvensene av sammenbrudd er særlig store				X ¹⁾
Viktig infrastruktur: sykehus, brannstasjoner, redningssentraler, kraftforsyning og lignende			(X)	X
Høye bygninger, mer enn 15 etasjer		(X)	X	
Jernbanebruer ²⁾			X	(X)
Veg- og gangbruer ²⁾		(X)	X	(X)
Byggverk med store ansamlinger av mennesker (tribuner, kinosaler, sportshaller, kjøpesentre, forsamlingslokaler osv.)		(X)	X	
Kaier og havneanlegg		X	(X)	
Landbaserte akvakulturanlegg for fisk		X	(X)	
Tårn, master, skorsteiner, siloer	(X)	X	(X)	
Industrianlegg		X	(X)	
Skoler og institusjonsbygg		(X)	X	
Kontorer, forretningsbygg og boligbygg		X	(X)	
Småhus, rekkehus, bygg i én etasje, mindre lagerhus osv.	X	(X)		
Støttmurer med høyde lavere enn 3 m langs vegger i klasse II ³⁾	X	(X)		
Kulverter	X	(X)	(X)	
Landbruksbygg	(X)			
Kaier og fortøyningsanlegg for sport og fritid	(X)			

¹⁾ For byggverk der konsekvensene av sammenbrudd er særlig store, for eksempel ved atomreaktorer og lagringsanlegg for radioaktivt avfall, store dammer og marine konstruksjoner bør jordskjelvriskoen vurderes spesielt, eventuelt basert på en risikoanalyse.

Lagertanker for flytende gass og store hydrokarbonførende rørledninger over land er behandlet i NA til NS-EN 1998-4.

²⁾ Se veiledende tabell for valg av seismisk klasse for bruer i NA til NS-EN 1998-2.

³⁾ For støttmurer langs jernbane, støttmurer langs vegger med høyde over 3 m og støttmurer langs viktige veier (klasse III) benyttes samme seismiske klasse som for vegen eller jernbanen

Tabell 9 - Veiledende tabell ved valg av seismisk klasse - Tabell NA.4(902)

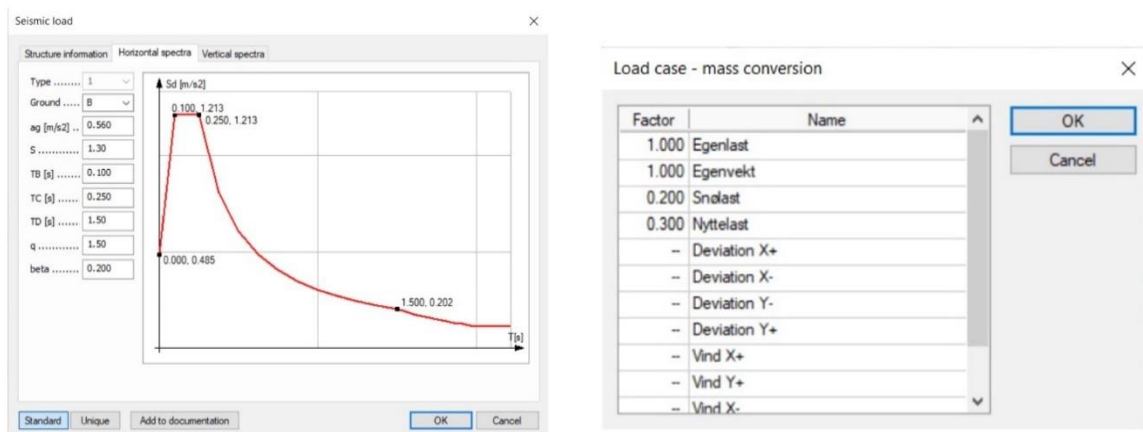
Tabell 9 plasserer skoler og institusjonsbygg i klasse 2 og klasse 3, hvor det vil være mer konservativt å benytte sistnevnte. Det kan likevel argumenteres for klasse 2 dersom prosjektets plassering, geometri og formål fungerer fordelaktig for de seismiske påkjenningene som kan oppstå, og om konsekvensen ved et eventuelt sammenbrudd ikke er av høy grad. En bør riktignok være forsiktig med anslag på lavere seismisk klasse, spesielt på konstruksjoner med høy grad av samfunnsviktighet og offentlig sikkerhet som sykehus, brannstasjoner, redningssentraler og lignende. Skolebygget ble konservativt vurdert til seismisk klasse 3. Utelateliskriteriene med beregninger og parametere vises i vedlegg C1.

Kriterium	Resultat	
1) Konstruksjoner i seismisk klasse 1	Konstruksjonen ligger i seismisk klasse 3.	IKKE OK
2) Svært lav seismisitet	$a_g * S = 0.728 \text{ m/s}^2$ $0.05 * g = 0.49 \text{ m/s}^2$	IKKE OK
3) Dimensjonerende spektrum	$S_a(T) = 0.515 \text{ m/s}^2$ $0.05 * g = 0.49 \text{ m/s}^2$	IKKE OK
4) Størrrelse på krefter	$F_b = 1366.8 \text{ kN}$ $(1.5 * VIND + 1.05 * SKJEV) * \frac{\gamma_{cBruddgrense}}{\gamma_{cDLC}}$ $x - \text{retning} = 777.9 \text{ kN}$ $y - \text{retning} = 776.2 \text{ kN}$	IKKE OK
Konklusjon	<u>Må dimensjonere for seismisk last.</u>	

Tabell 10 - Resultat for utelatelseskriterier

Seismisk i FEM-Design

For å kunne hensynta seismisk last i FEM-design må de vertikale lastene få innstilt omgjøringsfaktorer. Disse regner ut hvor stor andel av lastene som skal opptre som masser til bygget etter **pkt.4.2.4 i EC8**, og **tab. NA.A1.1 i «NS-EN 1990»**. Dette gjøres for at programmet skal få korrekt andel masser i sving under beregning. Videre må data for horisontalt spektrum fylles ut, hvor verdiene er blitt beregnet under kontroll av utelatelseskriteriene, se figur 22.



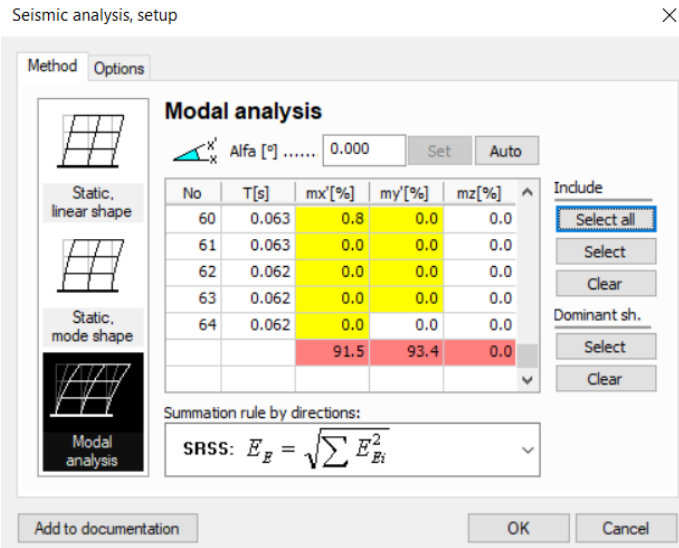
Figur 22 - Horisontalt spektrum (t.v.) og lastomgjøring fra FEM-Design (t.v.)

Siste steg før en analyse er å innføre seismisk last som en lastgruppe. Her benyttes det automatisk generering av seismiske påkjenninger til innføring i lastkombinasjoner. Før en seismisk analyse kan gjennomføres, bør en egenfrekvensanalyse være utført, slik at programmet har tilstrekkelig data på blant annet hvordan bygget opptrer under jordskjelv.

Som konkludert tidligere, tilfredsstiller konstruksjonen prinsipp for regularitet i oppriss, og med dette kan tverrkraftmetoden benyttes for seismisk dimensjonering. Tverrkraftmetoden er en mer brukervennlig metode for håndberegninger, og forutsetter kun én svingeform som dominerende. Siden seismisk last skal håndteres i FEM-Design som en romlig modell, ble det valgt å benytte Modal responspektrumanalysen.

Videre må de ulike svingeformene og massene som egenfrekvensanalysen har beregnet håndteres i innstillingene for seismisk analyse. Her er alle de ulike svingeformene listet opp med hver sin effektive masse i x- og y-retning relativt til den totale eller reduserte massen, med tilhørende svingeperioder. Med den reduserte massen menes den totale massen over fundamentnivå eller over nivå for stiv kjeller.

Responser til alle svingeformer som bidrar betydelig til den globale responsen skal hensyntas i henhold til **pkt.4.3.3.3.1(2)**. Dette kan gjøres ved å oppnå sum av de effektive modale massene for svingeformene på minst 90% av konstruksjonens totale masse, som håndteres i egenfrekvensanalysen. I samme innstilling for seismisk analyse trer **pkt. 4.3.3.5.1(2)b)** inn hvor kombinasjon av de to horisontale komponentene skal hensyntas ved å benytte kombinasjonsregel beskrevet i punktet. Her velges det ut de dominerende effektive massene for hver komponent som representativ for kombinasjonsformel. Når minst 90% sum er oppnådd og dominerende masser er valgt ut, kan den seismiske analysen gjennomføres.



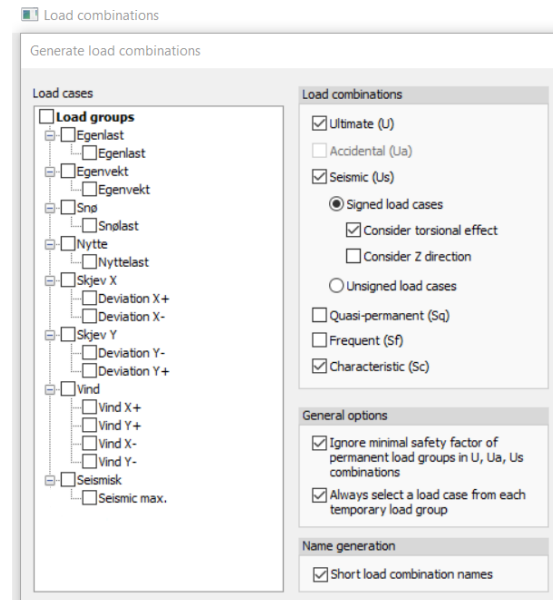
Figur 23 - Resultat for svingeformer i FEM

Den seismiske lasten er en dynamisk last og vil opptre ulikt i forhold til andre statiske laster som snø- og nyttelast. Etter seismisk analyse, hentes «**equivalent loads**» ut, som oppgir torsjonsmoment og horisontal kraft for hver etasje samt totalverdi for hele konstruksjonen. Lastene blir hensyntatt under dimensjonering av bygget.

3.5 Lastkombinasjoner

De ulike lastene bygget påkjennes av må fordeles i forskjellige lastkombinasjoner i FEM-Design. Først må lastene opprettes i **load cases** med tilhørende parametere, og videre opprettes de forskjellige lastgruppene. Her er det viktig å fordele de ulike lastene i riktige grupper for å unngå unaturlige lastkombinasjoner, eksempelvis at vind skulle fungert i negativ og positiv x-retning samtidig. I de ulike lastgruppene defineres gruppene som permanente, varierende og seismisk. Videre genereres det automatisk lastkombinasjoner med hensyn på gruppeinndelingene i **load combinations**. Her settes de innstillingene en ønsker for de ulike lastkombinasjonene, som vist i figur 24. Det ble konservativt valgt å kun se på lastkombinasjoner i tilfellene; bruddgrense (**U**), seismisk (**Us**) og karakteristisk bruksgrense (**Sc**).

No	Name	Type	Duration class (EN 1995 1-1)
1	Vind X+	Ordinary	Instantaneous
2	Vind Y+	Ordinary	Instantaneous
3	Vind X-	Ordinary	Instantaneous
4	Vind Y-	Ordinary	Instantaneous
5	Egenlast	Ordinary	Permanent
6	Egenvekt	+Struc. dead load	Permanent
7	Snølast	Ordinary	Short-term
8	Deviation X+	Deviation	Permanent
9	Deviation X-	Deviation	Permanent
10	Deviation Y-	Deviation	Permanent
11	Deviation Y+	Deviation	Permanent
12	Nyttelast	Ordinary	Medium-term



Figur 24 - Lastkombinasjoner vist i FEM-Design

Det ble det valgt å bruke programmet sin generering av lastkombinasjoner for å få et nærmere innblikk i hvordan FEM-Design opererer. Dette førte til totalt 624 ulike kombinasjoner. De seismiske lastene førte til mange ekstra kombinasjoner, og stod alene for rundt 450 av kombinasjonene. I tabell 11 er det fremvist eksempler for lastkombinasjon av hvert tilfelle.

Lastnr.	Navn	Type	Faktor	Inkluderte laster	
				Vertikal	Horisontal
1	LC1ULS	U	1.35	Egenlast Egenvekt	Skjevlast Skjevlast Y-
			1.05	Nyttelast Snølast	Vind X+
65	LC1ScLS	Sc	1.00	Egenlast Egenvekt	Skjevlast X+ Skjevlast Y- Vind X+
			0.70	Snølast Nyttelast	
113	LC1UsLS	Us	1.00	Egenlast Egenvekt	Skjevlast X+ Skjevlast Y-
			-1.00		Seismisk Fx+Mx
			-0.30		Seismisk Fy+My
			0.20	Nyttelast Snølast	Vind X+

Tabell 11 - Lastkombinasjons eksempler for hvert valgte tilfelle

4 Modell

4.1 Grunnlag

Opparbeidelse og modellering av bæresystem er hovedsakelig planlagt og utført i Revit, hvor IFC-fil fra arkitekt er benyttet til definering av målsetting og videre inspirasjon. Her vil de ulike forslagene til bæresystem bli redegjort, og den resulterende modellen bli kommentert og fremført. De ulike bæresystemene er drøftet og vurdert i samarbeid med veileder fra HVL og HRP.

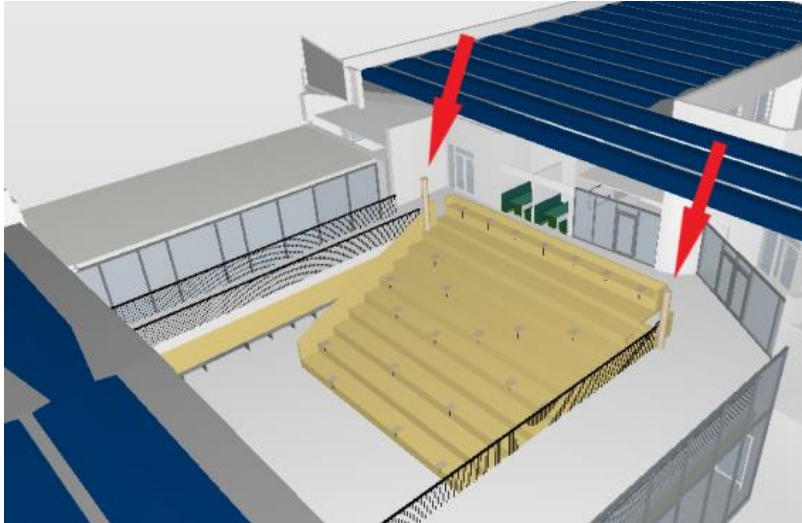
4.2 Valg av bæresystem

Et bæresystem har i oppgave å overføre påkjente krefter ned i grunnen og holde konstruksjonen i likevekt. Å omgjøre et forprosjektert bæresystem i massivtre til stål og betong, krever mye planlegging. Noe som er spesielt med bæresystemer i massivtre er at alle vertikale elementer kan fungere som bærende elementer [85, s.5]. En annen bemerkelse er at det gir gunstigere forhold ved byggetid, da de leveres som enkle og store elementer som kan direkte plasseres. Når bæresystemet skal endres, samt beholde søkelyset på miljø og kostnad, er det nødvendig å ta slike faktorer til betraktning.

Det er tenkt ut ulike løsninger for bæresystem i stål og betong, hovedsakelig på grunnlag av hva som vil gi de mest miljøvennlige og økonomiske løsningene. Det er blant annet unngått stor variasjon i materialtyper, samt begrenset bruken av store elementer. På denne måten kan transport- og produksjonsaspektet minskes som en avgjørende miljø- og kostnadsfaktor.

Under planlegging er det visse forutsetninger en må ta hensyn til. Arkitektens modell som legges til grunn for utarbeidelse av bæresystem, er etablert med en hensikt for hvert rom og element som følge av konseptet med universell utforming.

De ulike bæresystemene som presenteres tar for seg i hovedsak midtpartiet, da dette var den utfordrende delen. Den resterende delen av bygget forble tilnærmet uendret gjennom forslagene og vil bli presentert til slutt. Allrommet som befinner seg i midtpartiet innehar to konstruktive søyler på hver side av samlingstrapp i arkitektens modell, vist i figur 25. Disse søylene vil bli brukt som grunnleggende utgangspunkt for bærende system. Rommet er tiltenkt som et samlingspunkt ved friminutt, foredrag og lignende. Her er det fokusert på å ivareta mest mulig areal tilsvarende arkitektens utforming under planlegging av løsninger.

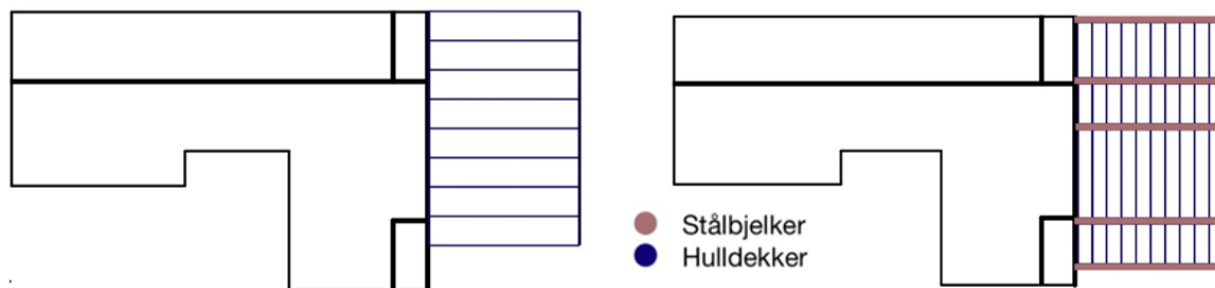


Figur 25 - Konstruktive søyler i arkitektmodell

Bæresystem 1

Det første forslaget startet som et midlertidig overslag, men ble til slutt en grunnpilar for det avgjørende bæresystemet. Forslaget består i hovedsak av hulldekketak som spenner på tvers av vertikalaksene. Hulldekkene ville blitt opplagt langs skillende betongvegg på vest-siden, og bjelkeføringer opplagt på søyler på øst-siden, se figur 26.

Denne løsningen førte til behov for store dimensjoner for hulldekkene om de skulle tåle påkjenning og spennvidde, i tillegg til vekt fra planlagte solceller på taket. Bruken av betongelementer ville dermed ført til massive elementer med stor egenvekt og kostnad. Det ble derfor vurdert bort fra denne løsningen.



Figur 26 - Illustrasjon av bæresystem 1 (t.v.) og bæresystem 2 (t.h.)

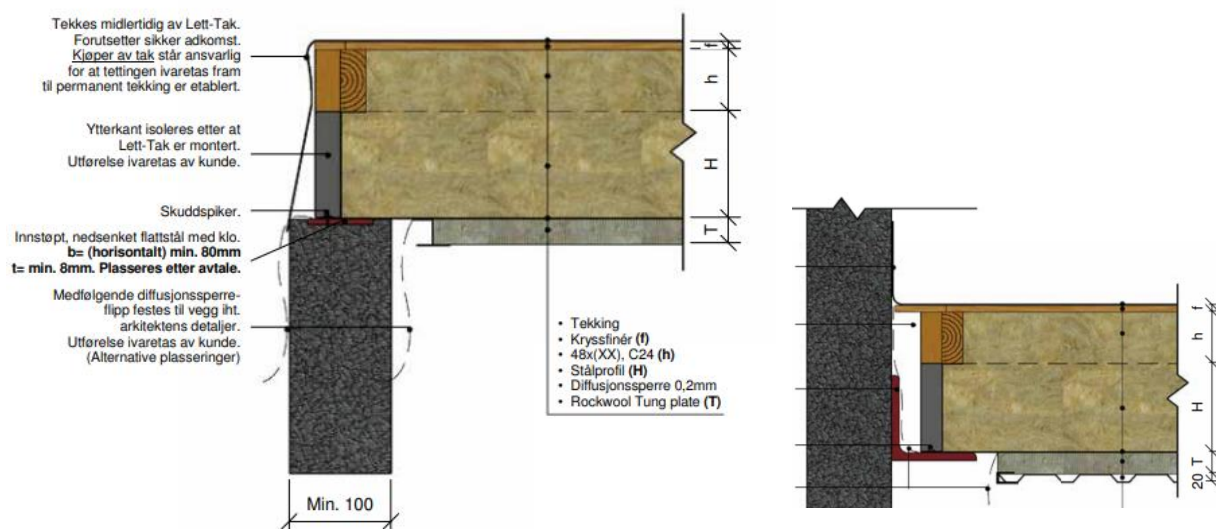
Bæresystem 2

I det andre forslaget ble det fremlagt en løsning hvor en snudde spennvidden til hulldekkene, og heller brukte stålbjelker som primær-bæring. Dette førte til kortere spennvidder for dekkene, og muligheter for å redusere dimensjoner.

Dette ble likevel vurdert som et system som ikke passet for situasjonen, da dette ble ansett som vanskelig å utføre i praksis og lite egnet økonomisk. Her ville også stålbjelkene endt som massive elementer, hvor gitterbjelker trolig ville blitt benyttet over det lange spennet. Dette ville igjen ført til høye kostnader.

Bæresystem 3

Valget falt til slutt på den tredje utredningen, hvor forslag til bæresystem 1 ble utbedret ved å ta i bruk Lett-tak AS sine takløsninger fremfor hulldekker. Takelementene har høy bæreevne i forhold til egenvekt, og består i hovedsak av isolasjon, kryssfinerplater, tekking og forsterkningselementer, illustrert ved figur 27.



Figur 27 - Oppbygging lett-tak (t.v.). Stålvinkel som opplegg (t.h.) [100]

Til tross for at lett-tak har tilstrekkelig kapasitet for situasjonen, kan det oppstå problemer med nedbøyning og feste av himling. Opplysningene for takløsning forutsetter blant annet maks nedbøyning på $L/200$. Dette tilsvarer 7.5cm med midtpartiets spenn, og er ikke problematisk for situasjonen. For å kunne ha rom for mer kapasitet enn opplyst, ble bedriften ble kontaktet angående muligheter for økning av spennvidde og dimensjon, noe de bekreftet som gjennomførbart.

Lett-takelementene vil ha opplegg langs søyle- og bjelkesystem på øst-siden, hvor en gitterbjelke må innføres over spennet til allroms-trappen. På motsatt side benyttes det stålvingler som opplegg som blir boltet i betongveggen, se figur 27. Det ble også vurdert å benytte betongveggen til å støpe på konsoller og utnytte armering i veggen, men grunnet den miljøvennlige vinklingen ble stål benyttet.

Resultatet av de ulike utredningene medførte et bæresystem av stål og betong preget av hovedsakelig økonomiske og miljømessige valg for situasjonen. Vestfløyen består av et leddet rammesystem av hulprofiler, IPE-bjelker og HE-A-bjelker med stålkruss innført i hver «ende» av bygget. Hulldekker brukes som etasjeskille og blir opplagt på rammesystem i stål samt betongskiver, med et ståltak for flat del med funksjon som stiv skive. Modellert bæresystem opparbeidet i Revit er illustrert i figur 28.



Figur 28 - Bæresystem modellert i Revit.

5 Dimensjonering

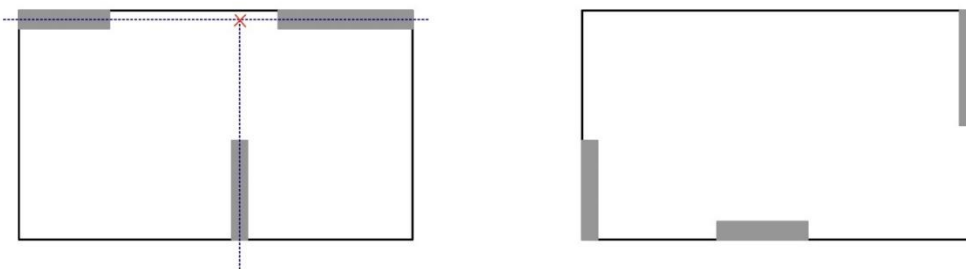
EC0: «Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner», «NS-EN 1990:2002+NA:2008», legges til grunn for prosjekteringen av konstruksjonen. Dette er den overordnede standarden og setter grunnlaget for alle beregninger [17].

5.1 Horisontal påkjenning

Sikring av avstivende system i konstruksjon ved prosjektering er blant de viktigste oppgavene for å ivareta konstruksjonens stabilitet. Her er det først og fremst de horisontale kreftene som må ivaretas på en fornuftig måte. Horisontale laster kommer fra vind, støtkrefter fra større kjøretøy, jordskjelv og tyngdelaster på grunn av små geometriske avvik [84, s.207]. Når en bygningsfasade utsettes for horisontale laster, føres kreftene inn i de horisontale skivene, og videre til de vertikale skivene og ned i fundamentet.

Andre viktige funksjoner til avstivning er å holde sekundærbjelker på plass, slik at de gir tilstrekkelig sideveis støtte til primærbjelker, og dermed hindrer vipping av disse og sideveis knekking av hele takflaten.

For å kunne oppnå likevekt ved vilkårlig lastplassering er det nødvendig at en har minst tre skiver med ulikt skjæringspunkt i skiveaksene. Skulle en ha felles skjæringspunkt for skivene ville likevekt kun blitt oppnådd ved en ensidig retning fra ytre lastpåvirkning, altså i skjæringspunktet. Det er derfor viktig å unngå dette [88].

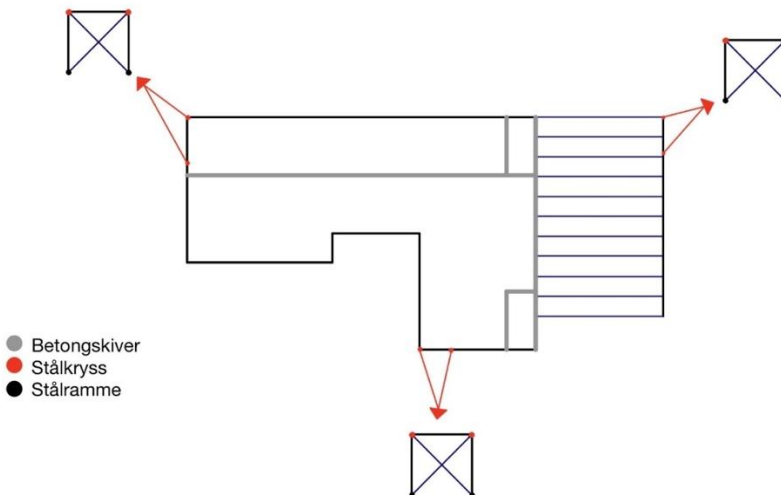


Figur 29 - Felles skjæringspunkt, ustabilt (t.v.). Stabil fastholding (t.h.)

Opparbeidet system og plassering

Som utgangspunkt for plassering av avstivende elementer er det tatt i bruk arkitektmodellen, der de mest gunstige plasseringene for både avstivning og andre faktorer som rømningsveier, akustikk og estetikk er undersøkt.

Det vertikale avstivningssystemet i skolebygget består av to trappesjakter og to veggskiver av plaststøpt betong og tre stålkryss, fungerende kontinuerlig fra fundament. Rammesystemet vil forbli leddet i alle knutepunkt og vil ikke ha avstivende hensikt. De horisontale avstivningselementene består av hulldekker som etasjeskille, og ståltak over vestfløy.



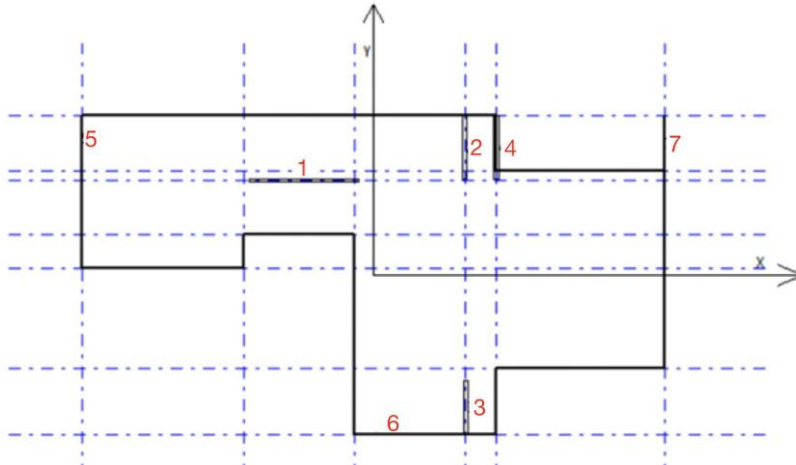
Figur 30 - Vertikale avstivningselementer

Kontroll avstivning

Kontroll av avstivende system er gjort i FEM-Design, V-skive og ved håndberegninger. Ved hjelp av V-skive kan byggets vertikale skiver beregnes med hensyn på horisontale krefter. Før de vertikale skivene legges inn i programmet, tegnes det opp et modulnett som definerer byggets geometri for etasjene. I programmet fungerer alle skivene kontinuerlig gjennom etasjene, og regnes som fast innspent i fotpunkt [18].

Hensikten var å kontrollere avstivning ved å redusere de to dominerende veggene, for å gi rom for eventuelle tilpasninger. Av den 37m lange veggen som strekker seg gjennom hele vestfløyen i x-retning, brukes kun 9.8m av veggen som avstivende. I veggen som ligger i y-retning mellom midtpartiet og vestfløyen på 34m, brukes de 6.8m som går parallelt med den nordlige sjakten som avstivende. Trappesjaktens utsparingssider ses bort i fra som avstivende elementer.

I V-skive er det kun mulig å legge inn skiver av betong, og det ble derfor utført håndberegninger for å finne tilsvarende tykkelser og stivhet for stålkryssene, se vedlegg D1. Denne forenklingen endte med ganske lave tykkelser for stålkryssene, og i figur 31 kan en se at det er store forskjeller mellom betongskivene (skive 1-4) og vindkryssene (skive 5-7).



Figur 31 - Plassering av skiver, sett i etasje 1

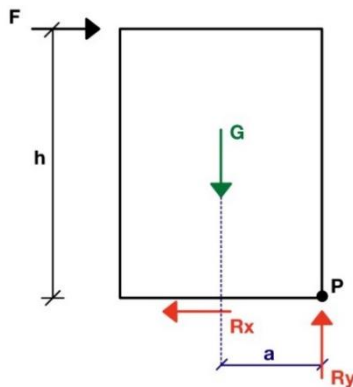
Ettersom at V-Skive ikke tar hensyn til skrått tak i etasjer, blir midtpartiet noe ukorrekt under opptegning. Dette fører til at hele bygget ender opp med å få samme høyde som vestfløyen, og teknisk rom blir ikke med i beregningen. De fleste skivene har mest tilknytning til vestfløyen, og det ble konkludert med at tilnærmingen var tilstrekkelig for utregningene. Horisontale vindlaster hentet fra Lastberegninger, samt skjevstillingslaster påsettes systemet. Vindlastene må omgjøres slik at de virker som linjelast på etasjeskillerne. Vertikale laster i form av egenlast til de vertikale skivene er også tatt hensyn til i kontrollen.

Reaksjonskreftene for de vertikale skivene ble beregnet i bruddgrensetilstand. I tabell 12 fremvises resultantkreftene i bunn av hver skive, hvor skivene vil få størst belastning av skjær og moment. I tillegg vises den største forskyvningen som forekommer på toppen av skivene. Det er også små forskyvninger for samtlige betongskiver, mens vindkryssene vil ha noe større verdier. Se vedlegg D2 for ytterligere resultater.

Skive	Forskyvning [mm]	Skjærkraft [kN]	Moment [kNm]
1	0.3	370	2566
2	0.4	259	1731
3	0.4	194	1208
4	0.2	157	981
5	3.3	74.2	452
6	2.2	34.1	194.4
7	1.1	98	712

Tabell 12 - Resultantkrefter og forskyvning for hver skive

Et bygg anses som stabilt når de ulike bygningsdelene forblir i stabil likevekt når påførte krefter oppstår [12, bind B8]. På grunnlag av dette velges det å kontrollere avstivningsegenskapene til det reduserte systemet ved å kontrollere veltemomentet skivene utsettes for, opp mot skivenes stabilitet. Moment beregnet i V-skive benyttes som veltemoment, mens stabiliseringsmoment fra egenvekt blir regnet for hånd. For egenvekten benyttes det konservativt lastfaktor på 0.9 i bruddgrense for global likevekt etter «NS-EN 1990».



Figur 32 illustrerer hovedkreftene under en slik beregning. En ytre kraft F danner kraftpar med friksjonskraften fra underlaget R_x som igjen danner momentet, $M_v = F * h$, som vil forsøke å velte skiven. Opplagerkraften R_y vil sammen med tyngden G danne stabiliseringsmomentet, $M_s = G * a$, som skal forhindre oppløft i bunnen av angrepspunkt. Her vil da skiven ha sin største kapasitet mot oppløft når R_y tvinges ut til punkt P, der momentarmen blir størst [19].

Figur 32 - Relevante krefter i en oppløftssituasjon [19]

	G [kN]	Arm [m]	M_s [kNm]	M_v [kNm]	Utnyttelse [%]
Skive 1	370.8	4.9	1816.9	2566.0	141.2
Skive 2	257.0	3.4	873.9	1731.0	198.1
Skive 3	222.2	2.94	653.3	1208.0	184.9
Skive 4	321.3	3.4	1092.4	981.0	89.8

Tabell 13 - Utnyttelser for oppløft, betongskiver

For vindkryssene hentes det ut påført egenvekt fra FEM-Design, som virker over angrepspunkt for oppløft. Deretter vurderes oppløftskraften tilhørende veltemomentet, F_o , opp mot egenvekten. For enkelhetens skyld, blir stålkryssene sett på som en stiv skive under beregning. Videre vil skive 5, 6 og 7 være definert som kryss 1, 2 og 3.

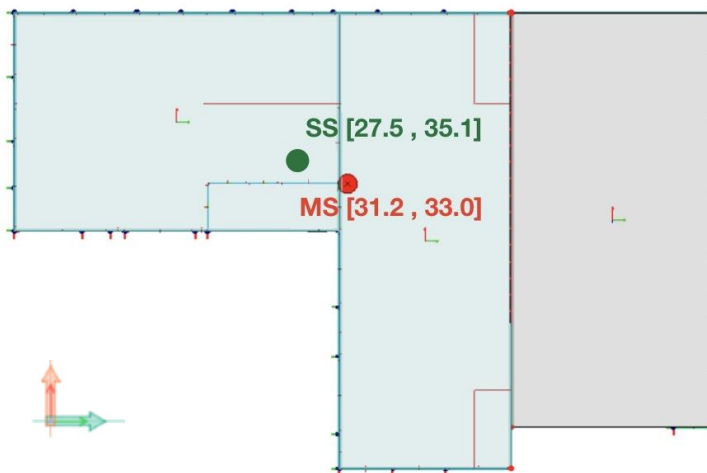
	M_v [kNm]	F_o [kN]	Egenvekt [kN]	Utnyttelse [%]
Kryss 1	452	93.4	80	117
Kryss 2	194.4	48.5	95.7	50.8
Kryss 3	712	120	127	94

Tabell 14 - Utnyttelser for oppløft, vindkryss

Resultatene fra tabell 13 viser at kun skive 4 vil kunne motstå oppløft fra ytre krefter ved hjelp av egenvekten alene. Det vil være noe usikkerhet knyttet til moment i bunn av skivene, da det oppstod konflikter mellom byggets geometri og begrensningene til V-skive. For de resterende skivene vil det være nødvendig å ta hensyn til utnyttelsesgraden under dimensjonering av fundament. Det er også viktig å merke seg at ingen andre vertikale laster enn egenvekt til skivene er tatt med i V-skive. Disse lastene vil virke avstivende og motvirkende på oppløftsituasjonene, samt gjøre utslag under dimensjonering av fundament.

Tabell 14 viser at kun kryss 1 ikke vil kunne forhindre oppløft ved hjelp av egenvekt. Kryss 3 er imidlertid høyt utnyttet, og bør kontrolleres mer grundig knyttet til fundamentdimensjonering. Det vises også i snitt et lavere påført moment i motsetning til betongskivene, noe som tyder på at programmet har hensyntatt kraftfordeling på grunnlag av de ulike stivhetene og likevekten mellom skivene.

Videre ble det regnet ut nytt stivhetssenter for det reduserte systemet for å få et innblikk over geometrien til de ulike skivene. Beregning for nytt stivhetssenter finnes i vedlegg D4.



Figur 33 - Stivhetssenter og massesenter for redusert system

Figur 33 viser det nye stivhetssenteret som har forflyttet seg mer inn i konstruksjonen. Figuren viser også at y-koordinaten har forflyttet seg nærmere, og mer gunstig i forhold til massesenteret. Det vil trolig oppstå nye koordinater for massesenteret, men siden betongskivene tar opp majoriteten av de vertikale bygningsdelenes masse, kan det tenkes at massesenteret vil forflytte seg i samme retning som det nye stivhetssenteret.

Kontrollene ble som nevnt utført for å undersøke muligheter for endringer i avstivende system, og resultatene gir rom for endringer innenfor de gitte lokasjonene. I videre beregninger benyttes det opprinnelige systemet.

5.2 Vertikal påkjenning

Under kontroll for de vertikale påkjenningene er hovedsakelig utnyttelsesgrad og deformasjon brukt som utgangspunkt for vurdering i FEM-Design samt ved håndberegninger.

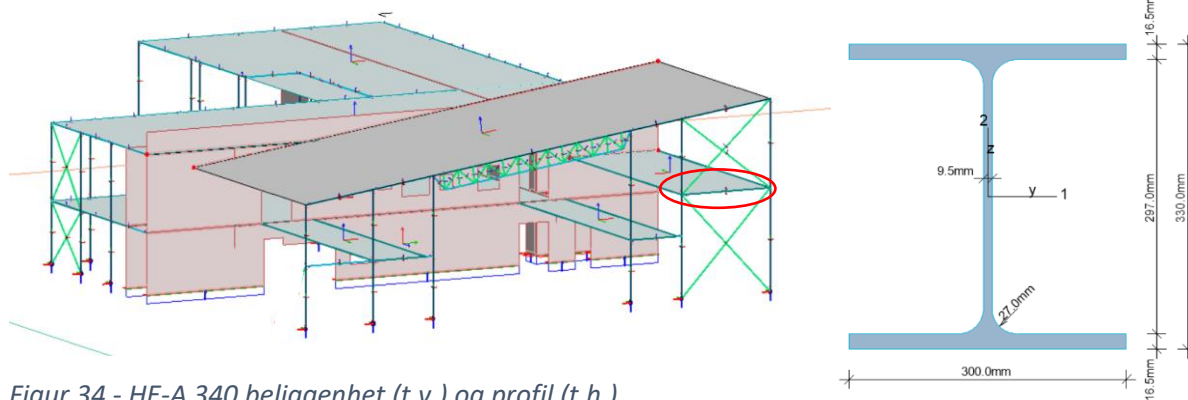
Deformasjonene kontrolleres i forbindelse med en maksimal deformasjon på $L/300$ i karakteristisk tilstand.

5.2.1 Bjelker

Bjelkene i bæresystemet er av forskjellige profiler i HE-A og IPE, samt et hatteprofil. Totalt inneholder systemet 75 bjelker, der alle er av stålqualität S355. Her blir det sett nærmere på hatteprofilene, i tillegg til kontrollberegninger i henhold til FEM-modellen på en bjelke av HE-A 340 og HE-A 300.

HE-A 340

HE-A bjelken benyttes som bæring for et HD 400 profil tilhørende teknisk rom, og er størst utsatt for moment om sterk akse i konstruksjonen.



Figur 34 - HE-A 340 beliggenhet (t.v.) og profil (t.h.)

I tillegg til momentpåkjenningen, er bjelken utsatt for strekkrefter, samt skjærkrefter om svak akse i samme lastkombinasjon. Etter kontrollberegning havnet skjærutnyttelsen inn under utelatelseskriteriet, og blir dermed sett bort ifra i kombinert virkning. Aksialtrykk og knekking ble også undersøkt, men endte med lave nok verdier til at dette også ble sett bort i fra, se utregning i vedlegg E1. Bjelken ble da kontrollert for moment om sterk akse med kombinert vipping, vist i tabell 15.

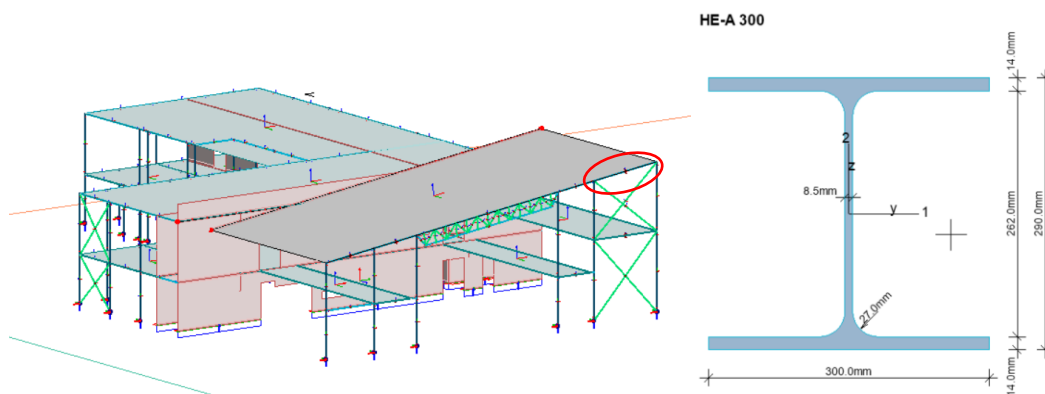
Kontroll	Utnyttelse	
	Håndberegninger	FEM-Design
Kombinert moment og aksial	54.2%	54.0%
Vipping	53.3%	53.0%

Tabell 15 - HE-A 340 Kontrollberegning av FEM-Design

I tillegg er den utnyttet for en deformasjon på 87%, som blir dimensjonerende. Dette var også grunnlaget for bruken av et HE-A profil fremfor et IPE-profil, da dette profilet er sterkere om begge akser. I tillegg viste det seg økonomisk gunstig å endre profil fremfor økning i IPE-dimensjon.

HE-A 300

Dette profilet ligger i tverrsnittsklasse 3, og det velges å kontrollere bjelken i Von. Mises spenningskontroll. I tillegg kontrolleres det for vipping samt kombinert knekking og moment om sterk akse.



Figur 35 - HE-A 300 beliggenhet (t.v.) og profil (t.h.)

Tabell 16 fremviser utnyttelsene kontrollert for hånd, sammenlignet med utnyttelsene fra FEM-Design. For kombinert knekking og moment ble det tatt i bruk ulike metoder for utregning av interaksjonsfaktorene, noe som kan ha bidratt til avvikene vist i tabellen.

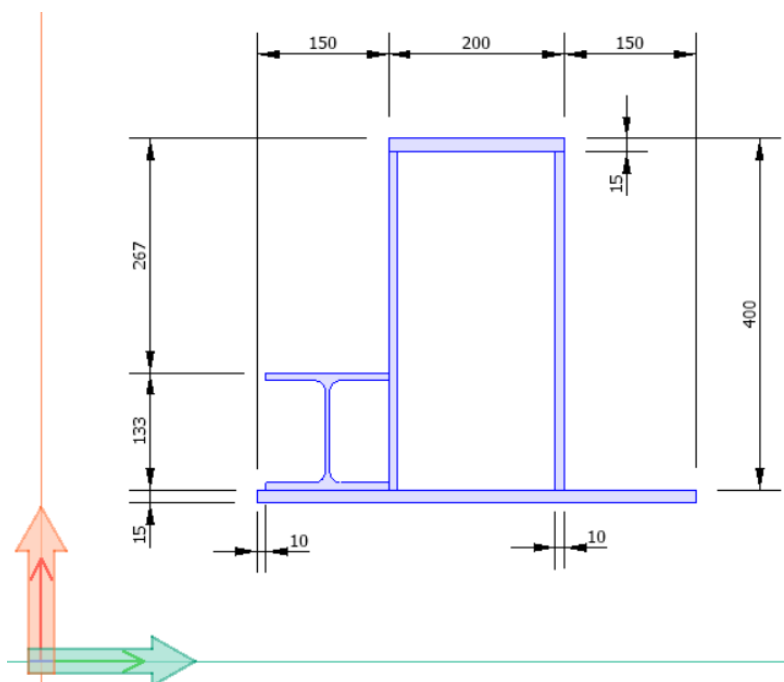
Kontroll	Utnyttelse	
	Håndberegninger	FEM-Design
Skjærspenning	32.3%	32.0%
Normalspenning	28.3%	28.0%
Vipping	51.4%	51.0%
Knekking og moment	49.5%	52.0%

Tabell 16 - HE-A 300 Kontrollberegning av FEM-Design

Bjelken er 78% utnyttet for deformasjon, noe som medfører at denne blir dimensjonerende for denne bjelken. Se fullstendig utregning i vedlegg E2.

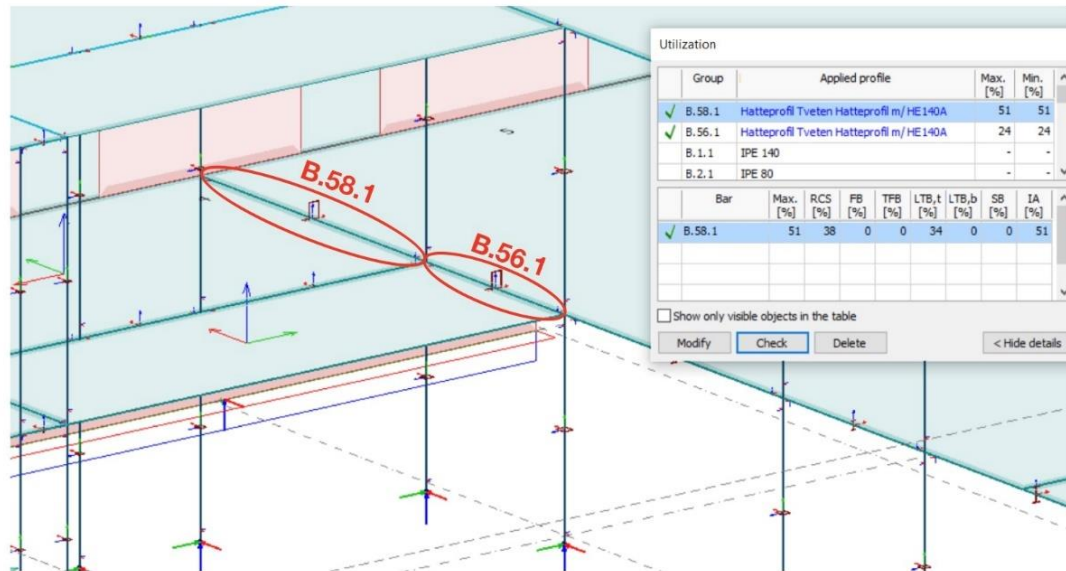
Hatteprofil, HSQ 415:200x500 15/15-10

I den vestlige fløyen befinner det seg et overgangsområde for hulldekkene, hvor HD 400 må erstatte HD 265 grunnet et lengre spenn mellom oppleggene. En slik overgang fører også til at ivaretagelse av gulvhøyde må hensyntas, og med dette er det dimensjonert et hatteprofil for situasjonen. Hatteprofilens oppgave er å forhindre ujevnheter og høydeforskjeller i overgangspunktet for de to ulike hulldekkene. Profilets dimensjoner er utredet ved tolkning av diverse hatteprofiltabeller og vurderinger for situasjonen, se figur 36. Som høyderegulerende element er det benyttet et HE-A 140 profil, da dette profilet hadde dimensjoner som tilfredsstilte situasjonen.



Figur 36 - Dimensjoner hatteprofil fremvist i section editor i FEM-Design

Profilen er opprettet i funksjonen **Section Editor** i FEM-Design, som gir muligheter for egendefineringer, endringer og opprettelse av profiler. Her kan et allerede eksisterende profil overføres fra FEM-biblioteket og videre redigeres etter egne behov, eller brukes som utgangspunkt for andre forutsetninger. Etter en har ferdigstilt det ønskelige profilet, bestemmes tekniske spesifikasjoner under, og etter, overføring til FEM-biblioteket. Her må det blant annet bestemmes om stålet skal være varmformet, kaldformet eller sveist, hvor valget falt på sistnevnte.

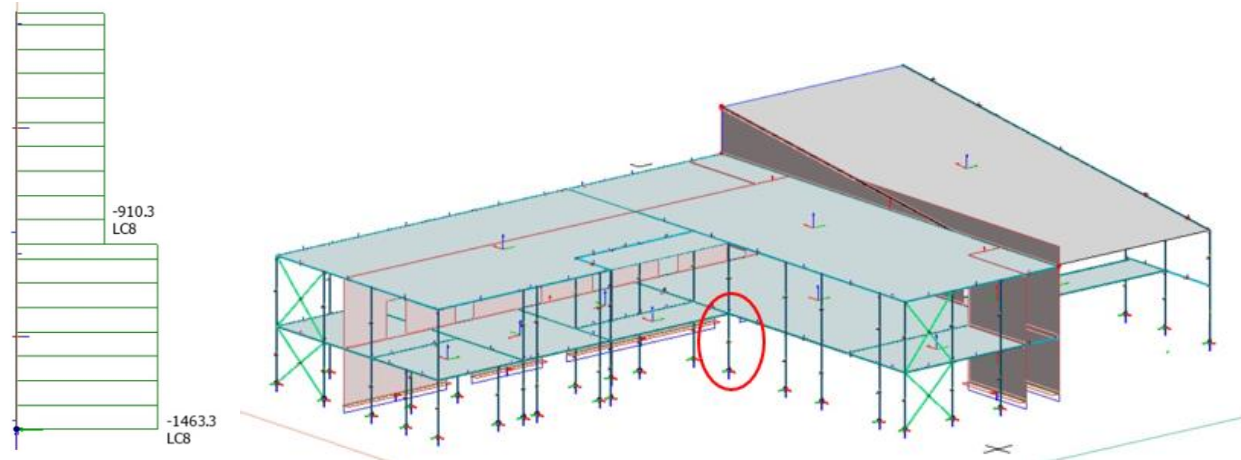


Figur 37 - Utnyttelser hatteprofil

Etter en gjennomgående analyseberegning av bygget i programmet, endte profilene med utnyttelser på henholdsvis 51% og 24% i kombinasjon av alle relevante krefter, noe som tyder på delvis underutnyttelse av profilet. Det ble konkludert med at det ikke var mye rom for endringer av profilet i forbindelse med utnyttelsesgraden. Profilene er utnyttet for deformasjoner på 29% og 8%, og vil dermed ikke være dimensjonerende.

5.2.2 Søyle

Det er totalt 70 søyler i bygget, hvorav samtlige er kaldformede hulprofiler utført i stål med kvalitet S355. Det foretas her en kontroll av stålsøylen som er mest påkjent av aksialkraft i bygget. Denne er lokalisert ved byggets innvendige hjørne, vist på figur 38. Søylen har dimensjonene KKR 200x200x10.



Figur 38 - N-diagram i bruddgrense for valgt søyle og søyle over (t.v.). Verdier i [kN], grønt indikerer trykk. Beliggenhet (t.h.).

Søylene blir påkjent av en dominerende aksialkraft og vil få veldig lite skjær og moment om begge akser i gitt lastkombinasjon, se N-diagram i figur 38. I vedlegg E4 er det foretatt en overslagskontroll av aksialkraften fra FEM-design, som gir en differanse på 5%. Tatt tilnærmingene i betraktning, samsvarer verdiene tilstrekkelig for videre beregninger med FEM-Design sine resultater.

Stålsøylene er kontrollert i bruddgrense med å bruke kombinasjonsformler for aksialkraft med moment om begge akser, i tillegg til diverse andre kontroller. Det vil ikke bli tatt hensyn til vipping da en setter reduksjonsfaktor lik 1.0 for hulprofil.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad \begin{array}{l} = 0.770 \quad \text{Håndberegning} \\ = 0.808 \quad \text{FEM-design} \end{array} \quad 95\%$$

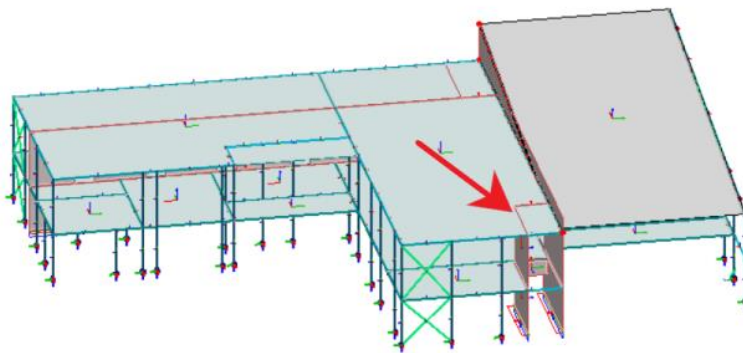
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad \begin{array}{l} = 0.769 \quad \text{Håndberegning} \\ = 0.808 \quad \text{FEM-design} \end{array} \quad 95\%$$

Formel 6 - (6.61) og (6.62) kombinert virkning.

Den opptredende skjærkraften vil omfattes av utelatelseskriteriet på 50% for skjærkraftkapasitet, og er derfor ikke tatt hensyn til i kombinert virkning. Beregnet total utnyttelse blir 77% for begge formler i formel 2. Dette gir et avvik på 5% fra beregninger utført i FEM-analysen. Søylen har en utnyttelse på 5% for deformasjon, og vil derfor ikke være dimensjonerende. Se vedlegg E3 for fullstendig utregning av KKR 200x200x10.

5.2.3 Vegger

Det var ønskelig å undersøke armeringsbehov og deretter armere for dette i den sørlige trappesjakten ved hjelp av FEM-Design sine hjelpemidler.



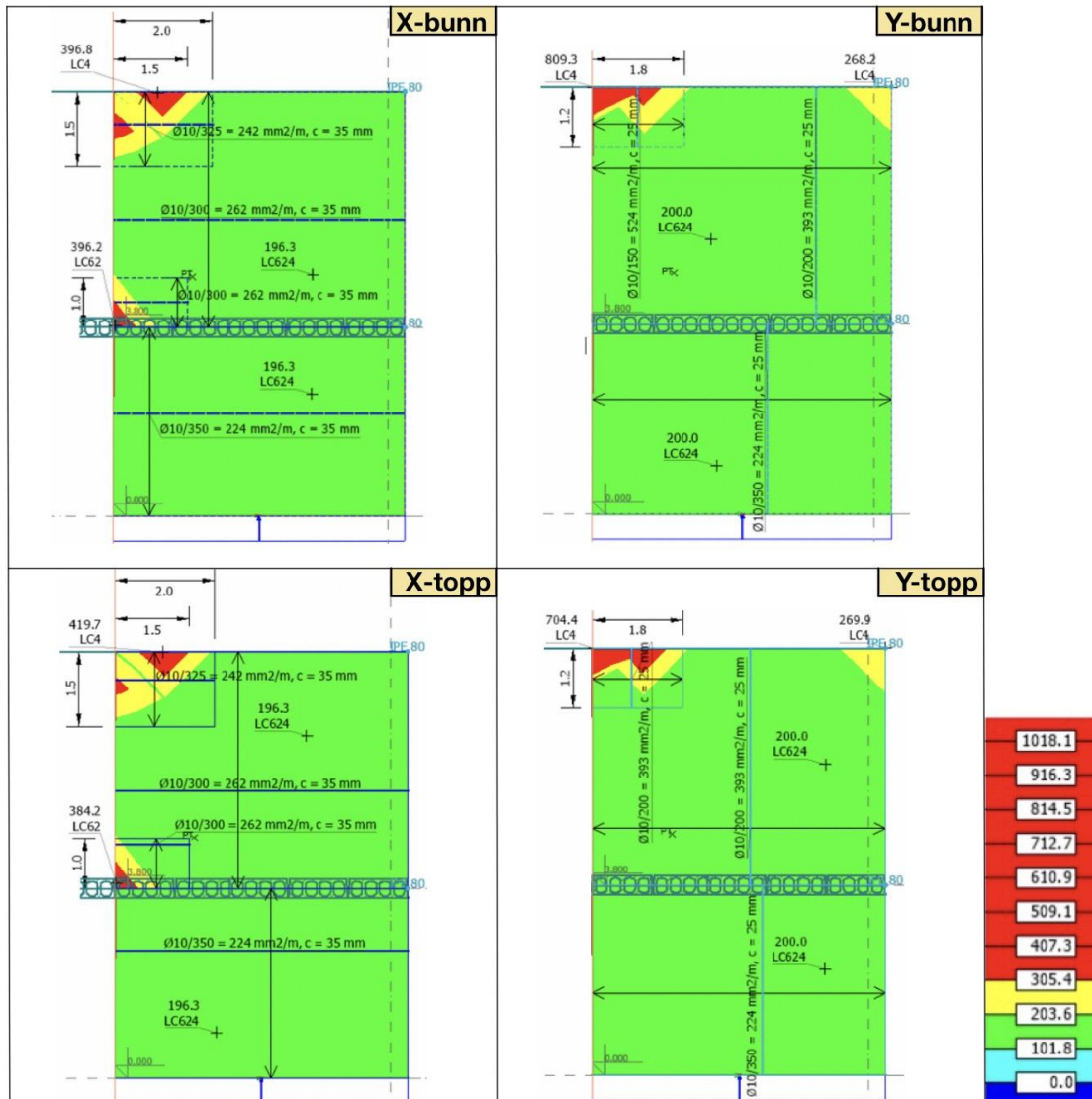
Figur 39 - Valgt betongskive for armering

Etter en analyse kan utnyttelsen til veggen samt armeringsbehovet undersøkes ved hjelp av kommandoene i **RC design**. Her illustreres behovene på de ulike stedene i veggen ved hjelp av blant annet en fargepalett som kan justeres etter egne preferanser. Armeringen til betongveggene opptrer som et rutenett på hver side, som programmet definerer som x-topp og x-bunn, og tilsvarende for y-retning. Da betongskiven ble modellert, ble også det lokale aksesystemet opprettet. Programmet bruker aksesystemet til definering av topp eller bunn med hensyn på fortegnet til z-aksen.

Som en ekstra sikkerhet ble minimumsarmering beregnet for hånd og kontrollert opp mot oppgitt nødvendig armering. **Pkt. NA.9.6.2 og 9.6.3** belyser minste armeringsareal for vertikalarmering og horisontalarmering for vegger. Punktene henviser til at formel for vertikalarmering gjelder for begge sider av veggen totalt mens for horisontalarmering gjelder det per side, se tabell 17.

Retning	Krav	Minimumsarmering
Vertikalarmering	$A_{S,vmin} = 0.002 * A_c$	$A_{S,vmin} = 0.002 * 200mm * 10000mm = 400mm^2$
Horisontalarmering (Innervegger)	$A_{S,hmin} = 0.15 * A_c * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}}$	$A_{S,hmin} = 0.15 * 200mm * 1000mm * \frac{3.2MPa}{500MPa} = 192mm^2$

Tabell 17 - Minimumsarmering for horisontal og vertikal retning



Figur 40 - Armeringstegning med nødvendig armering tilhørende lastkombinasjons-oppHAV.

Figur 40 viser fullstendig armeringstegning til sjaktskiven med nødvendig armering påsatt for de aktuelle områdene. Her er det brukt Ø10 for samtlige stenger med varierende senteravstander, da store deler av vegger kun hadde behov for minimumsarmering. Figuren viser at noen hjørner har et høyere armeringsbehov, noe som trolig kommer av høyere spenninger i knutepunkt for horisontalt og vertikalt bæreelement. Dette er hensyntatt med å innføre nødvendig tilleggsarmering.

Etter innlagt armering, gjøres det kontroller for utnyttelsen til skivene. Disse kontrollene kan gi en indikator på om det er områder, i for eksempel spenningsutsatte hjørner, som krever høyt armeringsareal. Her kan det oppstå veldig små områder med et så høyt armeringsbehov at en ikke vil klare å hensynta dette.

	X-bunn	Y-bunn	X-topp	Y-topp	Utnyttelse
Skive 2etg	Ø10 C300 Tillegg: Ø10 C325 Ø10 C300	Ø10 C200 Tillegg: Ø10 C150	Ø10 C300 Tillegg: Ø10 C325 Ø10 C300	Ø10 C200 Tillegg: Ø10 C200	X-bunn: 84% Y-bunn: 88% X-topp: 85% Y-topp: 90% Dimensjonerende: 90%
Skive 1etg	Ø10 C350	Ø10 C350	Ø10 C350	Ø10 C350	X-bunn: 87% Y-bunn: 89% X-topp: 87% Y-topp: 89% Dimensjonerende: 89%

Tabell 18 - Oversikt armering og utnyttelse vegg

5.2.4 Gangbro

I allrommet er det to gangbroer som knytter den vestlige-, og østlige delen av bygget i 2. etasje. Disse er tiltenkt som en fremkomstvei, samt et samlingspunkt under arrangementer i allrommet. Gangbroene vil derfor kunne bli høyt belastet, og dette er en av flere faktorer som må tas høyde for under dimensjoneringen. Begge broene har en spennvidde på rundt 15 meter, og er fritt opplagt på bjelke og stålinkel langs betongvegg. For å opprettholde universell utforming av allrommet [9], ønskes det ikke å tilføye en søyle for å korte ned på spennvidden. Det er derfor vurdert å ta i bruk hulldekker som kan spenne hele lengden.

Under valg av nyttelast for gangbro kan broen plasseres i kategori **C1** for skole, og få en nyttelast på 3kN/m^2 . Det velges likevel å benytte kategori **A** for balkonger og verandaer, da dette gir en økning av nyttelasten til 4kN/m^2 . Dette ses på som den mest gunstige vurderingen ut ifra de tiltenkte belastningene til gangbroene.

Bestemmelse av hulldekke baseres på spennvidde og laster. Videre må det gjøres utregninger for laster av dynamisk karakter, forårsaket av både menneskelig aktivitet og eventuelle maskiner fra yrkesrom. Det stilles krav til konstruksjonenes svingeegenskaper av sikkerhets- og bruksmessige årsaker for å unngå at det oppstår resonansfenomener [94]. Kriteriene tar for seg både konstruksjonens påkjenning og menneskelig følsomhet.

De konstruktive påkjenningene relaterer en ofte til deformasjoner og spenninger, og defineres ut ifra konstruksjonsstandardene. Kravene kan indirekte bidra til å unngå uønskede svingninger. Bruksegenskapene bestemmes ut ifra internasjonale og nasjonale retningslinjer, og er relatert til akselerasjon, hastighet og varighet [94].

Aktivitet	Frekvens
Gange med kontinuerlig gulvkontakt	1.4 – 2.6 Hz
Løping med diskontinuerlig gulvkontakt	2.0 – 3.5 Hz
Hopping / Rytmask hopping på stedet	1.8 – 3.4 Hz

Tabell 19 - Typiske frekvenser ved menneskelige aktiviteter [94]

Hulldekke	Svingning
HD 400	3.14 Hz
HD 500	3.96 Hz

Tabell 20 - Utreget egenfrekvens av aktuelle hulldekker.

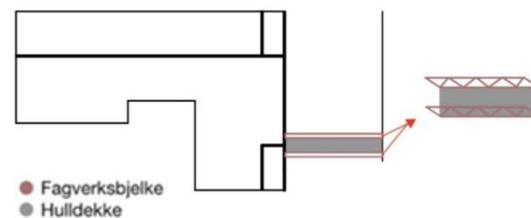
I tabell 20 er det fremvist resultat av utregnet egenfrekvens, se vedlegg A2 for fullstendig utregning. Et dekke har i teorien et uendelig antall resonansfrekvenser, så det en fokuserer på under vurdering av vibrasjonsforhold er dekkets laveste resonansfrekvens [94]. Sammenlignet med tabell 19 som angir frekvenser som kan oppstå under menneskelig aktivitet, ser man at HD 500 må tas i bruk for å få gangbroene til å oppleves mer stabile for brukerne. Det ønskes generelt å ligge på minimum 4Hz for slike gangbroer for å unngå at mennesker oppfatter de som ustabile, men bør heves ved et økt aktivitetsnivå.

Det er verdt å merke seg at utregningene tar for seg en enklere kontroll som kun ser på bjelkeelementet isolert med egenvekter. I realiteten vil flere faktorer som lettvegger og fugging kunne virke som demping og avstivninger, slik at en vil ha en litt større stivhet enn utregnet i tabell 20. Dette vil riktignok ikke utgjøre nok endring i resultat av svingning til at valg av HD 500 skrinlegges.

En alternativ dimensjonering av gangbroene ville vært å bruke rekkverket som et bærende element. Dette kan utføres ved å benytte gitterdragere med et lettere hulldekke opplagt på bjelkene, se figur 41. På denne måten kan bruken av HD 500 unngås, som en ofte ønsker å begrense unødig bruk av grunnet sin pris og størrelse. I tillegg ville det vært mer gunstig å ta i bruk gitterdragere når en dimensjonerer for svingninger, da gangbroen ville fått en høyere egenfrekvens. I likhet med HD 500 ville det vært tilknyttet en del utgifter til en slik løsning, da gitterdragere er generelt dyrt, og krever ekstrakostnader som brannisolering og tilpasningsarbeid. I tabell 21 er det fremlagt kostnad tilknyttet hver løsning for den største gangbroen. For fullstendig utregning, se vedlegg G3. Kostnader og priser er hentet fra Norsk Prisbok.

Løsning	Kostnad [NOK]
HD 500	kr 145 580,00
Gitterdrager	kr 239 746,00

Tabell 21 - Kostnad gangbroer



Figur 41 - Alternativ gangbro, gitterdragere

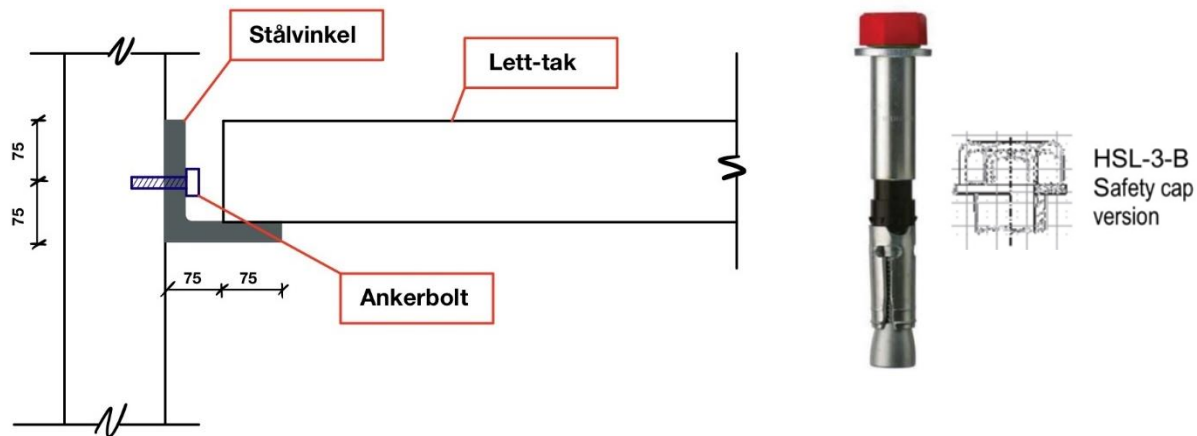
Valget falt på HD 500 for gangbroene da det besitter gode kvaliteter knyttet til bæring og brann, i tillegg til å være den billigste av fremlagte løsninger.

5.2.5 Opplegg lett-tak

Det var av interesse å undersøke forbindelsen til lett-taket relatert til gitterdragere og stålvinkelforbindelsen, med håndberegninger og FEM-analyse tatt i bruk som hjelpemiddel.

Bolteforbindelse

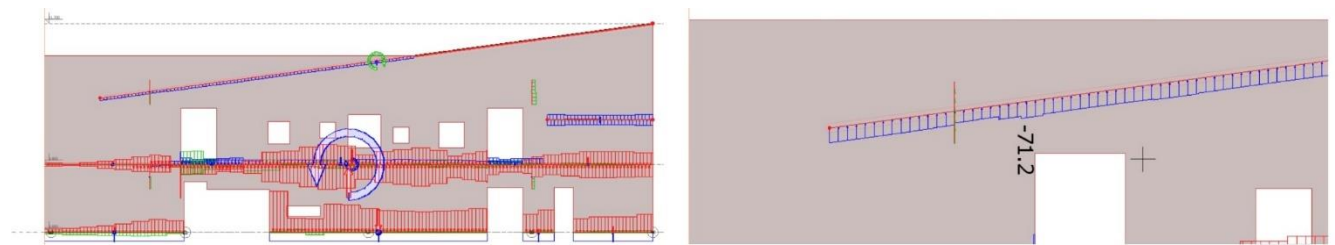
Opplagerforbindelsen til lett-taket var ønskelig å beregne for hånd, og er utført ved hjelp av Hilti sine tabeller for bolteforbindelser utsatt for skjær og strekk. I dialog med Lett-tak AS ble det opplyst om anbefalt vinkeldimensjon på 150x150x12 som opplegg, se figur 42. Denne dimensjonen er blitt benyttet til dimensjonering av bolteforbindelse.



Figur 42 - Illustrasjon av opplegg for lett-tak (t.v.). Valgt ankerbolt HSL-3-B (t.h.) [95]

Vinkelen fungerer kontinuerlig langs betongveggen og det planlegges mekaniske ankerbolter med beregnet senteravstander langs hele lengden på 31.4m. Tiltent boltttype er HSL-3-B, som er en ekspansjonsbolt med innebygd momentkontroll i mutterhatten for økt sikkerhet, se figur 42. Det tenkes at lett-taket kan være utsatt for svingninger som følge av variasjon i vindlast og lav egenvekt. På grunnlag av dette er det ønskelig med en solid og sterk bolt som kan motstå de eventuelle påkjenningene. Et alternativ kunne vært å ta i bruk limanker, som er godt egnet for slike situasjoner. Hilti opplyser derimot at ekspansjonsbolten er godt egnet for store strekk- og skjærbelastninger, samt dynamiske laster, og er derfor blitt benyttet i forbindelsen.

Skjærkrefter som boltene vil bli utsatt for, hentes fra FEM-analyse under **Conection forces i Maximum of load combinations** og benyttes i beregning. Kraftene er reaksjonskreftene som følge av skråtakets, og overliggende lasters, belastning på opplegget langs betongveggen. Dette blir dermed den dimensjonerende kraften for forbindelsen.



Figur 43 - Reaksjonskrefter for forbindelse

Ser i figur 43 at dimensjonerende skjærkraft for opplegg havner på 71.2kN/m i bruddgrensetilstand. Videre beregnes opptredende moment for bolt, og deretter strekkraften som følge av dette, med hensyn på dimensjonene til stålvinkel.

$$M = 71.2 \text{ kN} * 0.075 \text{ m} = 5.34 \text{ kNm/m}$$

$$\text{Strekk: } S = \frac{M}{e} = \frac{5.34 \text{ kNm/m}}{0.075 \text{ m}} = 71.2 \text{ kN/m}$$

Formel 7 - Dimensjonerende moment og strekkraft for bolteforbindelse

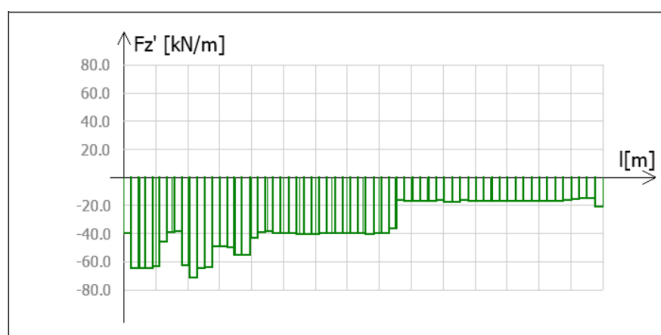
Her blir strekkraften lik skjærkraften grunnet symmetri i stålvinkel. Videre benyttes Hilti sine tabeller for uthenting av boltedimensjoner på grunnlag av de beregnede skjær- og strekkreftene.

Mean ultimate resistance

Anchor size	Non-cracked concrete						Cracked concrete					
	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M8	M10	M12	M16	M20	M24
Tensile $N_{Ru,m}$ [kN]	31,1	39,2	47,9	66,9	93,5	122,9	15,9	21,2	34,2	47,8	66,8	87,8
Shear $V_{Ru,m}$												
HSL-3, HSL-3-B, HSL-3-SK ^{a)} , HSL-3-SH ^{a)} [kN]	43,0	68,0	95,8	133,8	187,0	245,3	40,0	56,0	68,4	95,6	133,6	175,6
HSL-3-G ^{b)} [kN]	36,1	48,1	75,1	118,5	187,0	-	36,1	48,1	68,4	95,6	133,6	-

Tabell 22 - Valg av bolt fra Hilti [95]

Tabell 22 viser at M16 bolt har kapasitet for skjær, men ikke strekk per løpemeter. Nødvendig senteravstand regnes ut til å bli 670mm, for å oppnå tilstrekkelig strekkapasitet per løpemeter. Dette tilsvarer 47 bolter langs hele lengden. Det velges likevel å redusere senteravstand til 600mm til sikker side. Nødvendig bolteforbindelse for stålvinkel settes til **53stk M16 HSL-3-B c/c 600mm**.



Figur 44 - Skjærkraftdiagram for opplagerlengden

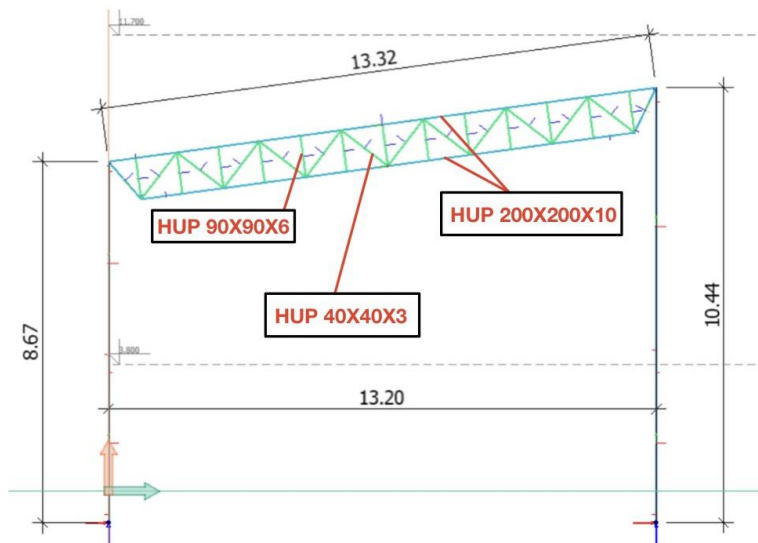
Figur 44 viser at det er rom for justeringer av dimensjoner og senteravstander langs opplagerlengden. Bolteforbindelsen vil resultere i en totalpris på omkring 19 000 kroner for hele lengden, i henhold til priser fra byggevarekjeden Motek. Denne kostnaden er ikke utslagsgivende for den totale kostnaden av stål i bygget, og det vil heller ikke pådra seg store

miljømessige konsekvenser ved å ikke justere etter disse faktorene. På grunnlag av dette ble det derfor konservativt valgt å bruke samme bolt og senteravstand for hele lengden.

Gitterdrager

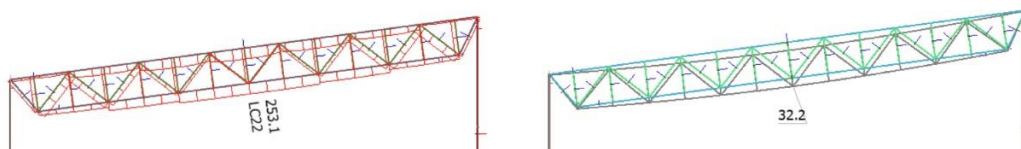
Fagverket spenner 13.2m i luftlinje, og har dimensjoner og profiler som vist i figur 45. For videre dimensjoner var det ønskelig å oppnå 45° vinkler til kraftoverføring og symmetri langs hele lengden for stavelementene. Dette ble noe utfordrende med det begrensede lengdemålet, og det ble dermed gjort tilpasninger i endene som kompensasjon for symmetri ellers i lengden.

De vertikale stagene har lengder på 1m, mens skråstagene på 1.4m. Dette ble ansett som den beste løsningen for situasjonen for å oppnå tilstrekkelig høyde, samt god geometri mellom stagene. Det var i utgangspunktet mest ønskelig å oppnå lik profiltipe gjennom hele fagverket, men grunnet kraftfordelingen ville dette ikke egnet seg økonomisk.



Figur 45 - Målsatt fagverk med profildeling

I kontroll av fagverk vil spennings- og nedbøyningstilstanden til systemet bli fremført og kommentert. Figur 46 viser de maksimale påkjenningene for tilstandene på fagverket. Fagverket er utnyttet rundt 70% i forhold til flytespenningen, og har en nedbøyning på rundt $L/400$. Nedbøyningen er ikke av konsekvens for underliggende bygningsdeler eller interiør.



Figur 46 – Påkjenninger for fagverk. Maks spenning i $[N/mm^2]$ (t.v.), maks nedbøyning i $[mm]$ (t.h.).

6 Sammenligning

Det vil her bli utført sammenligninger av bæresystemene, og bli sett nærmere på ulikheter knyttet til tre hovedpunkter. Temaene som vil bli gjennomgått er klima og miljø, akustikk og brann.

Klima og miljø vil bli gjennomgått i form av en livsløpsanalyse, i tillegg til gjennomgang av krav og mulige tiltak til kommunens miljøambisjoner om å bli et passivhus, nullutslippsbygg og oppnå BREEAM-sertifiseringen Excellent. Sammenligningen av materialenes egenskaper knyttet til akustikk og brann vil bli gjennomgått på generell basis, og sett på eventuelle tiltak og løsninger. Sammenligningene tar kun for seg de bærende elementene, eksklusive tak og fundament.

6.1 Klima og miljø

Verden står ovenfor store utfordringer knyttet til klima, og i 2015 ble det vedtatt en juridisk forpliktende og internasjonal klimaavtale kalt Parisavtalen. Denne avtalen har som mål å begrense de prognoserte klimaendringene verden står ovenfor. Avtalen ble inngått av samtlige medlemsnasjoner i FN. Hovedpunktene til Norge er å redusere klimagasser med minst 50 % i år 2030 sammenlignet med 1990, samt å bli klimanøytral i 2030 [20]. «*Norge skal ta en lederrolle med å kutte utslipp både nasjonalt og internasjonalt, og vi skal gjøre det i et tett samarbeid med EU [...] og vi skal legge til rette for grønn omstilling i næringslivet*», sier finansminister anno 2021, Jan Tore Sanner (H) [21]. For å oppnå disse kravene kreves det en enorm omstilling i samfunnet, helt fra forbruker til næringslivet.

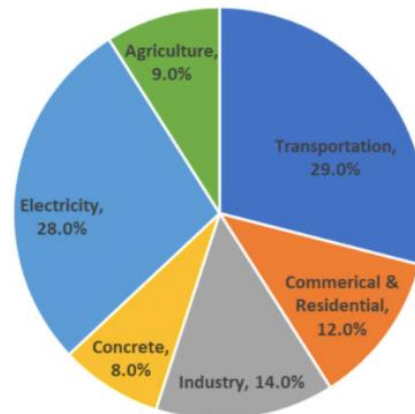
Byggesektoren stod i 2015 for 40% av verdens totale energibruk og klimagassutslipp [22]. I takt med at verdens befolkning øker, stiger også behovet for flere bygg. For å minske bygg sitt klimaavtrykk, kreves det derfor at en tar i bruk mer miljøvennlige metoder i både byggeprosess og byggets funksjoner. Dette gjør at det er spesielt interessant å se om det er forskjell i skolebyggets klimaavtrykk basert på hvilket bæresystem som blir benyttet.

6.1.1 Generelt om materialenes miljøpåvirkning

Betong

Hele 8% av verdens CO₂-utslipp skyldes betongproduksjon, se illustrasjon i figur 47. Til sammenligning ville betong vært verdens tredje største karbondioksid utslipper, om man sammenlignet med enkelt nasjoners utslipp [23].

Utslippene forekommer hovedsakelig av sementproduksjonen, som er en sentral del av betongdannelse. Sement produseres ved oppvarming av nedknust kalkstein hvor CO₂ blir brent, og det er under denne kjemiske prosessen, kalt kalsinering, at majoriteten av utslippene skjer. Oppvarming av ovner og transport er også medvirkende faktorer til det høye utslippet [24].



Figur 47 - CO₂-utslipp fordelt på næringsliv illustrert ved et sektordiagram [23]

Stål

Stål er betraktet av mange som verdens viktigste byggemateriale. I likhet med betong, er produksjonen svært energikrevende og innebærer høye utslipp av drivhusgassen CO₂. Omtrent 7% av verdens totale CO₂-utslipp skyldes stålindustrien [8], likevel må en vurdere mer enn bare de høye utslippene når en skal bedømme stålets bidrag til klimakrisen. Stål er nemlig lett å resirkulere, og kan gjenbrukes tilnærmet uendelig [8]. Dette gir stål en langt mer bærekraftig livssyklus enn betong, men vil likevel ha et tilnærmet likt klimaavtrykk grunnet nyproduksjon. I nyere tid har stålindustrien begynt å jobbe mer målrettet for å kunne redusere disse utslippene. Et eksempel på dette er at avfall under produksjon av stål som tidligere ble dumpet, som slagg og støv, blir nå 100% utnyttet. Et annet biprodukt fra stålproduksjon som tas i bruk, er avgasser. Disse blir i dag brukt til produksjon av strøm, og gir strøm til ca. 15 millioner mennesker hvert år i Europa [8].

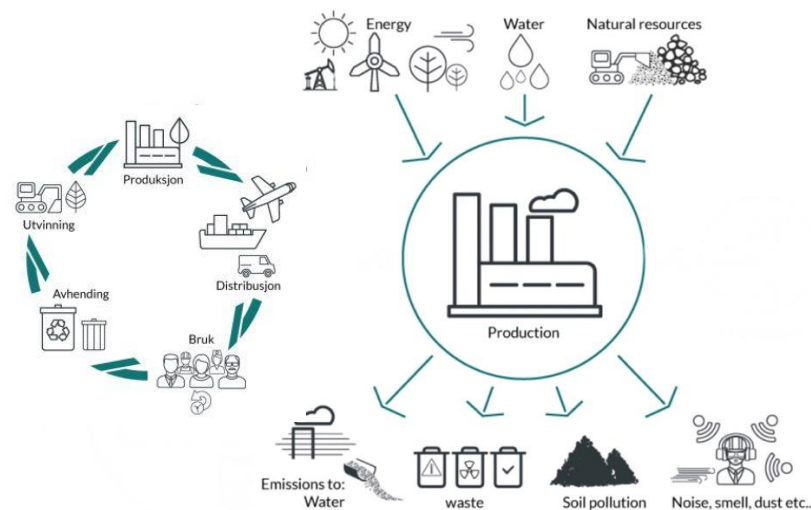
Tre

Tre er derimot betraktet som et langt mer miljøvennlig alternativ enn overnevnte. Produksjon av trelementer har svært liten innvirkning på miljøet, forutsatt at råstoffet kommer fra en bærekraftig forvaltet skog. Gjennom fotosyntesen kan tre ta opp og lagre CO₂ i trærne, og senere i treproduktene. I tillegg kreves det lite fossil energi i fremstilling av treprodukter, og den interne energibruken er hovedsakelig basert på klimanøytral bioenergi. Dette vil i sum gi en positiv CO₂-effekt [26].

6.1.2 Livsløpsanalyse (LCA)

Etter ønske fra kommunen skal «Nye Tveten skole» bygges med massivtre, og oppfylle en rekke krav for å innfri diverse miljøambisjoner. For å undersøke om det prosjekterte bæresystemet i stål og betong kan være konkurransedyktig miljømessig med massivtre, er det derfor interessant å utføre en livsløpsanalyse av bæresystemet.

Livssyklusvurdering er en systematisk analyse av et produkts livsløp. Denne omfatter diverse kartlegginger fra start til slutt, eller «vugge til grav». Analysen gir en indikasjon på produktets bærekraft og evaluerer dens miljøpåvirkning [27]. LCA benyttes ofte i tidligfasen av prosjektutredninger da det kan identifisere de viktigste miljøproblemene for systemet, og når disse vil oppstå [28]. På denne måten kan miljøbelastningen kartlegges på ulike systemer før en bestemmer seg for ønskelig løsning. Analysen gir også mulighet for å sammenligne spesifikke produkt med konkurrerende, og blir derfor ofte brukt av produsenter til markedsføring. På samme måte kan en sammenligne de ulike løsningers miljøavtrykk, og bestemme seg for hvilke som vil bli mest gunstig i prosjektet.



Figur 48 - Visualisering produkters livsløp og produksjonens påvirkninger på omgivelser [29]

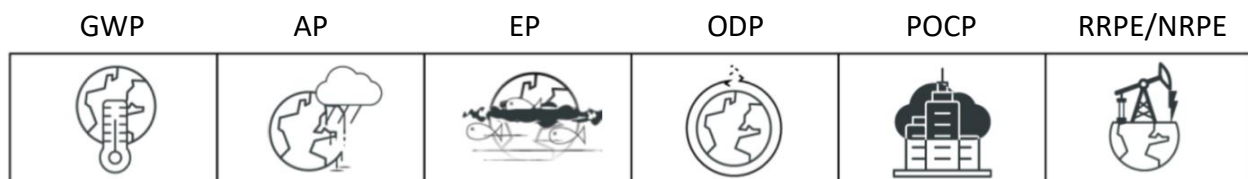
Bæresystemene er analysert i programmet One Click LCA. Mengdene av stål og betong er hentet fra modell i FEM-Design. For bæresystemet i tre er det utført et anslag på mengder av tiltenkte materialer i samarbeid med bedrift, se vedlegg F5. Dette ble utført da prosjektet enda er i forprosjekteringsfasen, og har dermed ikke en konkret utførelse ferdig. Det er blitt gjort noen forenklinger av konstruksjonsdeler i utredningen av bæresystem, og disse vil også bli utelatt for tresystemet. Bindingsverk for yttervegger inkludert i begge systemer.

LCA utarbeides ved hjelp av ulike miljødeklarasjoner, såkalte EPD (*Environmental Product Declaration*). En EPD er et kortfattet dokument som beskriver miljøprofilen til et produkt eller tjenestes miljøvirkning på en standardisert og objektiv måte. En henter informasjon om produkter i databasen til EPD Norge som er basert på internasjonale standarder (ISO 14020). Dette gjør at produkter kan sammenlignes på tvers av landegrensene, og gir dermed muligheter til å velge bedre produkter basert på miljødeklarasjonen [30]. I analysen er det i hovedsak tatt i bruk spesifikke produkter fra velkjente produsenter, da disse ofte er mer miljøvennlig enn de generiske verdiene, og dermed aktuelle valg. I tillegg til materialenes EPD, er det flere andre variabler en må ta til betraktning for å utføre en livsløpsanalyse. Dette inkluderer parametere som mengder, transport, beregningsperiode, og brutto areal for bæresystem.

Prosjekteringen tar utgangspunkt i å benytte lokale leverandører av de ulike materialene. Dette valget baseres på at det minker transportavstanden, og dermed miljøavtrykket knyttet til transport. Spesielt i stål og betong er det mange valgmuligheter, og nærmeste leverandører er lokalisert henholdsvis 33km og 12km fra anleggsplass. Leverandør av massivtre derimot er ikke like utbredt i Norge, men i 2019 åpnet Splitkon verdens største massivtrefabrikk i Buskerud [31]. Fabrikken har som mål å ta opp kampen med utenlandske produsenter, og er lokalisert 150km unna skolen. Transport av tre vil derfor gi litt større miljøbelastning i livsløpsanalysen. Nevnte leverandører er ikke kontaktet da dette er en tiltenkt løsning, men antas plausibelt.

Miljøpåvirkningsindikatorer

Livsløpsanalysen tar for seg bæresystemenes miljøpåvirkning. Det vil her bli utført analyser på diverse miljøpåvirkningsindikatorer som er med på å danne miljøprofilen til komponentene. Dette gir muligheter for å identifisere om det er enkelte miljøtilfeller som krever bedre tiltak, til tross for at helheten gjerne er tilfredsstillende. I One Click LCA er det seks miljøpåvirkningsindikatorer som inngår i beregningene, vist i figur 49. Hva hver enkelt innebærer vil bli nærmere gjennomgått.



Figur 49 – Miljøpåvirkningsindikatorer [32]

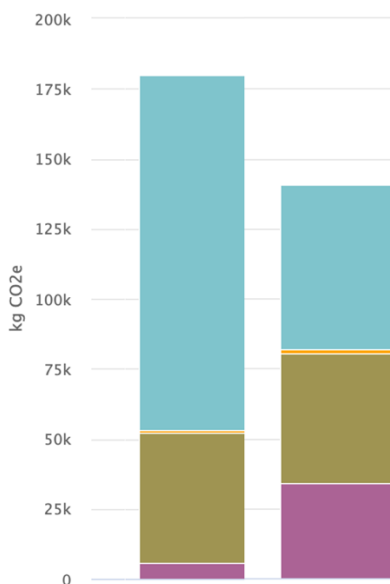
Livssyklusinformasjon							
Produkt		Konstruksjon		Bruk		Slutten på livet	
A1	Råmaterialeforsyning	A4	Transport til byggeplass	B6	Energibruk	C1	Dekonstruksjon og riving
A2	Transport					C2	Transport
A3	Produksjon					C3	Avfallshåndtering
						C4	Avfallsavhending

Tabell 23 – Livssyklusinformasjon (informasjon oppgitt med One Click LCA sine farger for kategoriene)

Som nevnt tar en livsløpsvurdering for seg en systematisk analyse av et produkt fra «vugge til grav». Denne analysen bryter ned produktets livssyklus til forskjellige trinn, og i tabell 23 vises kategoriene som inngår i LCA. Livssyklusinformasjonen gir oss mulighet til å evaluere hvert trinns miljøpåvirkning, og en kan dermed identifisere hvor en kan optimalisere resultatene.

Klimagassutslipp (GWP – Global warming potential)

Dette er en måleenhet som brukes til å sammenligne klimagassenes oppvarmingseffekt. GWP angir akkumulert oppvarmingseffekt i forhold til CO₂ over et gitt tidsrom. En høy GWP indikerer at den gitte gassen har varmet opp jorden desto mer, sammenlignet med CO₂. En omtaler enhetene som CO₂-ekvivalenter [33]. På figur 50 er det illustrert de to bæresystemers klimagassutslipp fra ulike kategorier.

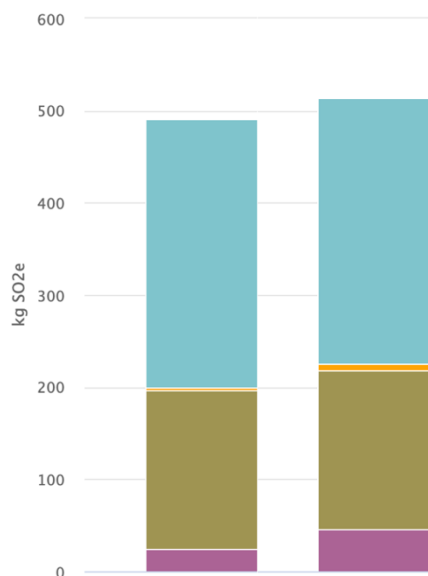


Figur 50 - Sammenligning klimagassutslipp

Figuren viser at utslipp knyttet til materialer gir desidert størst utslipp for stål og betong. Dette skyldes at produksjonen av materialene er svært energikrevende og basert på fossilt brensel, mens det for tre er basert på klimanøytral bioenergi, som i sum gir en positiv CO₂-effekt [26]. Det er også mest utslipp totalt knyttet til stål og betong. Det er tatt i bruk resirkulerte materialer i stål, samt enkelte lavkarbons betongelementer. Dette gjør at miljøutslippene er noe lavere enn det normalt ville vært om samtlige materialer var nyprodusert. Videre kan en bemerke seg at transportutslipp kun er merkbart for tre, da avstanden til byggeplass er en god del lenger enn for stål og betong. Til tross for lenger avstand gir det lite utslag totalt.

Energi utslippene vil være like, mens det vil være et betraktelig større utslag på utslippene knyttet til slutten på livet for trematerialene. Dette kan forklares med at trematerialene vil på slutten av sin levetid ha en naturlig nedbryting som frigir CO₂ fra dens karbonlagring. Treprodukter har lang levetid og kan resirkuleres slik at den gunstige karbonlagringen fortsetter, men vil til slutt nedbrytes og dermed frigjøre store mengder CO₂. Disse mengdene inngår derimot i den naturlige karbonsyklusen, og bidrar til dannelse av ny biomasse i voksende skog. Treavfall kan tas i bruk som CO₂ nøytral bioenergi som erstatter fossile energikilder [34], og vil derfor ikke være så negativt som diagrammet tilsier. En kan konkludere med at systemet i tre vil ha et lavere, og mer bærekraftig, klimagassutslipp enn stål og betong.

Forsuring (AP – Acidification potential)



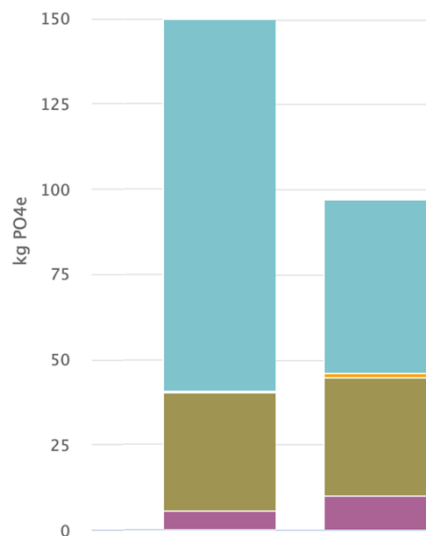
Figur 51 - Sammenligning forsuring

Forsuring er målet på det potensielle bidraget til økt surhet fra ulike kilder. En slik surgjøring kan oppstå på ulike måter, deriblant luftforurensing og sur nedbør. Forsuring kan føre til skade på innsjøer og elver med fatale konsekvenser for enkelte arter og mikroorganismer, samt landlevende planter og dyr. Viktige næringsstoffer kan gjennom sur nedbør løses opp og øke tilgjengeligheten til giftige metaller. En tar i bruk et referankestoff for å angi faktorens påvirkning, og måles i kg SO₂-ekvivalenter. Det er flere stoffer som kan bidra til forsuring, hvor de tre mest forsurende utslippene er svoveldioksid, ammoniakk og nitrogenoksid [32].

Figur 51 indikerer at begge systemer har et tilnærmet likt potensiale til forsuring. Materialenes innvirkning er svært lik, men det vil være litt større potensial for tresystemet, da nedbryting og håndtering av treavfall, samt dens transportlengde, vil bidra i større grad enn ved stål og betong.

Eutrofiering (EP –Eutrophication potential)

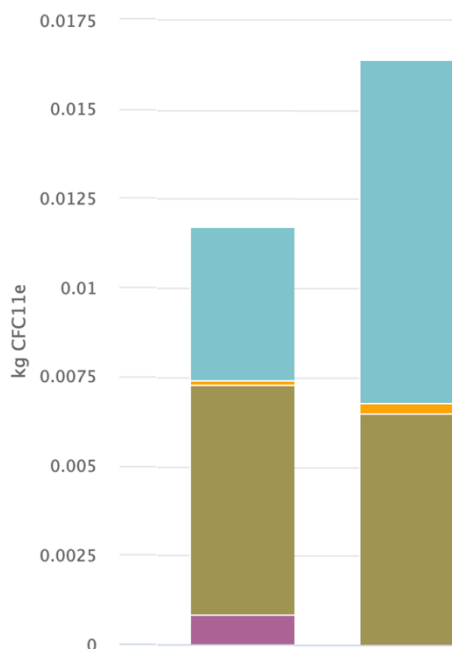
Eutrofiering er en prosess i vann hvor en får økt planteproduksjon forårsaket av økt tilførsel av næringsalter [32]. Denne prosessen har forekommet naturlig gjennom flere millioner år, men har fått en akselerasjon i både hastighet og omfang gjennom menneskelig aktivitet [35]. Eutrofiering fører til oksygenvinn i nærliggende bunnvann, og er en ledende årsak til svekkelse av mange ferskvannøkosystemer.



Figur 52 - Sammenligning eutrofiering

Bæresystemet i stål og betong har et større bidrag til eutrofiering enn tre, som vist i figur 52. Mulige bidrag til dette kan være finere partikler og støv, som steinstøv fra byggeprosessen som flukter fra området, og kan ende opp i vann [36]. Disse kan inneholde næringsaltet nitrogen og dermed føre til eutrofiering. For tre kan næringsalter som nitrogen oppstå under gjødsling i skogdrift [37]. Tre har også en liten mengde utslipp av nitrogen gass knyttet til transport, samt et større utslag på slutten av livet, men likevel ikke nok til at det har et lavere eutrofieringspotensiale enn stål og betong.

Ozonlaguttømming (ODP - Ozone Depletion Potential)

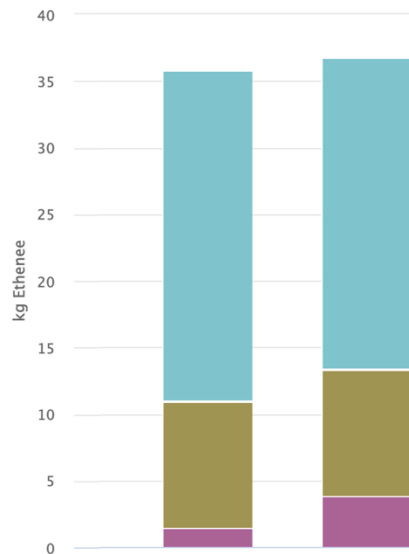


Figur 53 - Sammenligning ozonlaguttømming.

Denne miljøpåvirkningsindikatoren tar for seg nedbryting av ozonlaget. Dette vil virke negativt på miljøet da ozon fungerer som en strålingsregulering av solstråler [32]. Brytes ozon konsentrasjonen ned vil det føre til økt oppvarming av jorden, og skader på diverse økosystem [38].

Figur 53 viser at bæresystemet i tre vil ha et større potensiale for ozonlaguttømming, da materialet gir et mye større potensial enn stål og betong. Det er derimot verdt å merke seg at det ikke er utslag for tre på slutten på livet, mens det derimot er litt påvirkning knyttet til dette punktet i stål og betong. Dette kan knyttes til fremmedmaterialer og forurensinger som kan ha påvirket betongen.

Fotokjemisk oksidasjon (POCP – Photochemical ozone creation potential)

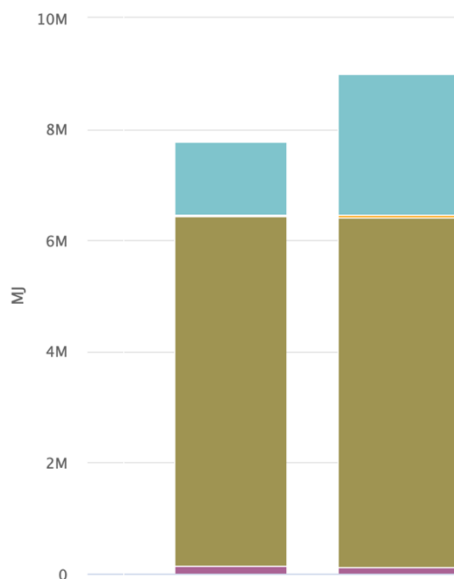


Figur 54 - Sammenligning fotokjemisk oksidasjon.

Fotokjemisk oksidasjon, også kalt smog, er en luftforurensing som oppstår når organiske stoffer og nitrogenoksider i atmosfæren reagerer kjemisk grunnet solstråling i lavere luftlag. En bruker luftens innhold av oksiderende stoffer som mål, og relaterer som regel mengdene oksidanter i henhold til ozon påvirkning [32].

Her vil bæresystemene være ganske like, men tre vil ha et litt større potensial til fotokjemisk oksidasjon. For materialer ser man i figur 54 at det er litt høyere tilvirkning knyttet til stål og betong, men tre sitt potensielt høye utslipp i livssluttsfasen bidrar til at det ender litt høyere.

Total bruk av primærenergi (Primary energy)



Figur 55 - Sammenligning primærenergi

Primærenergi er en betegnelse på de forskjellige energiformene slik de finnes i naturen, før de gjennomgår noen form for omforming [39]. Lettere sagt er det de energiråstoffene vi utvinner direkte fra naturen, og som ikke er i en slik form at sluttbrukerne kan nyttiggjøre seg av direkte [40]. Det eksisterer både fornybar og ikke-fornybar primærenergi, blant annet vind-, sol-, vannfalls- og kjerneenergi.

Som vist på figur 55 er det energi, altså elektrisitetsbruken som vil være den dominerende faktoren i bruken av primærenergi. Denne er derimot lik for begge systemer og derav ikke like interessant for sammenligningen. En ser at det er hovedsakelig i materialer forskjellen ligger, og at det er større bruk av primærenergi for tre. Dette kan knyttes til energikrevende prosesser under transport og tilvirkning, da sistnevnte vil benytte seg av fornybare former for primærenergi.

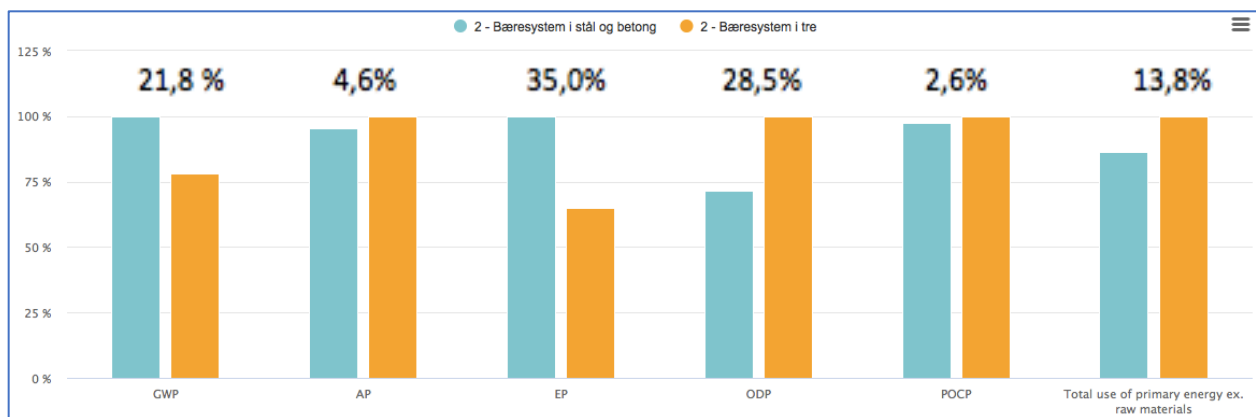
Resultat

I tabell 24 fremvises bæresystemenes totale miljøpåvirkning knyttet til de ulike trinnene i livsløpet som vist i tabell 23. I vedlegg F2 vises det en resultatfordeling for hvert bæresystem fordelt etter livssyklusstadium.

Sektor	Klimagassutslipp kg CO ₂ e	Acidification kg SO ₂ e	Eutrophication kg PO ₄ e	Ozone depletion potential kg CFC11e	Formation of ozone of lower atmosphere kg Ethenee	Total use of primary energy ex. raw materials MJ
A1-A3 Byggematerialer	1,27E5	2,91E2	1,09E2	4,32E-3	2,48E1	1,31E6
A4 Transport til byggeplassen	5,6E2	2,58E0	5,61E-1	1,11E-4	3,16E-2	1,59E4
B6 Energibruk i drift	4,66E4	1,72E2	3,46E1	6,47E-3	9,52E0	6,3E6
C1-C4 Livsløpets slutt	5,75E3	2,48E1	5,58E0	8,28E-4	1,43E0	1,37E5
D Utover livsløp (ikke inkludert i totalen)	-3,7E4	-6,37E1	-2,13E1	-6,79E-4	-5,07E0	-3,88E5
Total	1,8E5	4,91E2	1,5E2	1,17E-2	3,58E1	7,77E6

Sektor	Klimagassutslipp kg CO ₂ e	Acidification kg SO ₂ e	Eutrophication kg PO ₄ e	Ozone depletion potential kg CFC11e	Formation of ozone of lower atmosphere kg Ethenee	Total use of primary energy ex. raw materials MJ
A1-A3 Byggematerialer	5,85E4	2,89E2	5,11E1	9,63E-3	2,34E1	2,54E6
A4 Transport til byggeplassen	1,55E3	7,14E0	1,56E0	3,06E-4	8,75E-2	4,41E4
B6 Energibruk i drift	4,66E4	1,72E2	3,46E1	6,47E-3	9,52E0	6,3E6
C1-C4 Livsløpets slutt	3,39E4	4,6E1	1,01E1	5,22E-7	3,8E0	1,22E5
D Utover livsløp (ikke inkludert i totalen)	-2,01E5	-2,14E2	-3,41E1	-4,03E-7	-2,26E1	-3,54E6
Total	1,41E5	5,15E2	9,73E1	1,64E-2	3,68E1	9,01E6

Tabell 24 - Total miljøpåvirkning fra livsløpsvurdering. Stål og betong vist øverst, tre nederst.

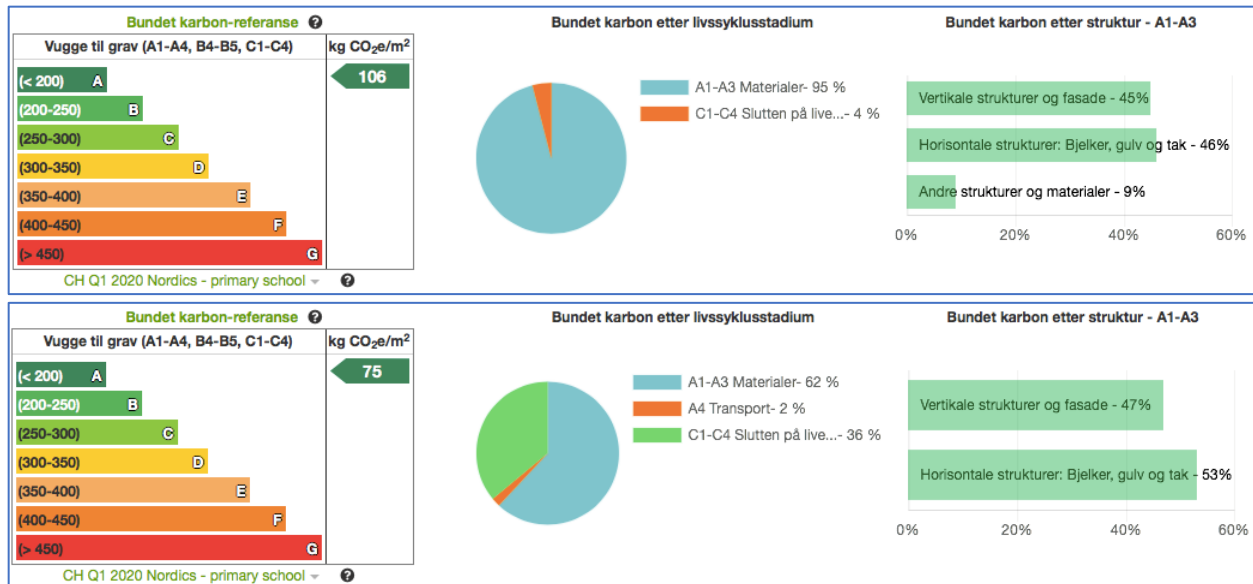


Figur 56 - Sammenligning - alle påvirkningskategorier. Differanse oppgitt i prosent (%) over stolpene.

Oversikt over alle miljøpåvirkningskategorier bæresystemene har blitt vurdert etter i livsløpsanalysen ses i figur 56. Stål og betong har de mest gunstige resultatene knyttet til fire av seks kategorier, hvor klimagassutslipp (GWP) og eutrofiering (EP) er unntaket. Det er likevel flere kategorier som har svært jevne resultater, og derav ikke stor fordel for systemet. Det kan likevel konkluderes med at dette er positive resultater for det dimensjonerte bæresystemet som virker å være bedre enn tre, men som nevnt må resultatene leses nøye. I mange av kategoriene er det store utslipp knyttet til slutten på livet til tresystemet, noe som har gitt store utslag. Da tre vil frigjøre store mengder CO₂ på slutten av sitt liv, vil dette være karbon som har vært lagret i trematerialet i flere tiår, og videre tar del i den naturlige karbonsyklusen. Utslippet vil derfor bidra til dannelse av ny biomasse i voksende skog, og vil altså kunne tas opp igjen i nytt trevirke, fremfor å bli slippet ut til klodens ozonlag. I analysen er det tatt i bruk CLT med biogen karbonlagring på 687kg CO₂e/m³ som naturlignok gir et større utslag på mange av kategoriene. En kan derfor konkludere med at begge systemer fremstår som miljøvennlige alternativer etter gjennomgang av de ulike miljøpåvirkningsindikatorne, og at stål og betong noe overraskende kan konkurrere miljømessig med tre.

Bundet karbonreferanse

I tillegg til hver enkelt miljøpåvirkningsindikator vil en få et overordnet resultat knyttet til LCA. Dette kalles bundet karbonreferanse, og beregnes for en fast 60-års vurderingsperiode for alle materialer inngått i bygget. Denne tar for seg mengder- og transport av materialer, samt nødvendig materialutskifting i byggevalueringsperioden og levetidsprosessering. Effektene inkluderer derimot ikke resirkuleringspåvirkning, og beregnes alltid per brutto interne område m². Karbonreferansen tar for seg alle nødvendige effekter, og angir så et totalutslipp i kg CO₂e/m². Totalutslippet er igjen inndelt i kategoriene A-G, hvorav A er ønskelig. Klassifiseringen tar i bruk standarder knyttet til hvilken type prosjekt som blir utført. For Tveten skole er det blitt tatt i bruk «CH Q1 2020 Nordics – Primary school», som er en database for Skandinaviske skoleprosjekter. Databasen inkluderer data i karbonreferansen basert på manuelle analyser tilknyttet sammenheng, fullførbarhet og plausibilitet av miljøvennlige byggeprosjekter. Det totale utslippet til bæresystemene vises i en bundet karbon-referanse vist på figur 57.



Figur 57 - Sammenligning – Bundet karbon-referanse. Stål og betong vist øverst, tre nederst.

Begge bæresystemene faller innunder den ønskede kategorien A med god margin, med henholdsvis 106- og 75kg CO₂e/m² for stål og tre. Til tross for et nokså likt totalutslipp, hvor tre kommer best ut, er det store forskjeller i hvor utslippene skjer for hvert av systemene. Spesielt verdt å merke seg er at tre har 36% av utslippene tilknyttet «sluttet av livet», mens stål og betong kun 4%. Dette skyldes at stål, som bæresystemet hovedsakelig består av, er 100% fornybar og ikke vil ha en slutt. De små utslippene vil da skyldes betongen som vil slippe ut karbon når det knuses. For tre vil utslippene ved livsslutt hovedsakelig være en del av den naturlige karbonsyklusen, og derfor være mindre skadelig. Ser man på utslippene etter struktur ser man at det er ganske likt for «vertikale og horisontale strukturer» for begge system. Stål og betong har også 9% av karbon-referansen tilknyttet «andre strukturer og materialer» som vil være innlagt armeringsjern til betongveggene.

Karbonreferansen viser at begge systemene gir gode resultater knyttet til byggets livsløp, men at tre vil være det mest miljøvennlige alternativet. Som nevnt er det blitt gjort en del utelatelser og forenklinger da analysen kun har tatt for seg det avgrensede bæresystemet. LCA vil være såpass begrenset at det kan knyttes usikkerhet rundt resultatene, og karbonreferansens utslipp vil øke betraktelig ved en mer komplett analyse. Det er derfor tilknyttet stor usikkerhet til hvor miljøvennlig hvert bæresystem vil være, eller om de vil forbli i klasse A. Da byggene krever en god del mer materialer enn de som er tilknyttet bæresystemene, er det å forvente at klassen vil kunne endres.

Analysen kan til tross for usikkerheten gi en indikasjon på om systemene virker å være miljøvennlige, og forholdet de imellom. En kan ut ifra livsløpsanalysen konkludere med at bæresystemet for tre er det mest miljøvennlige, men at stål og betong systemet utmerker seg positivt. Dette indikerer at det kan konkurrere med det generelt mer miljøvennlige elementet for å oppnå kommunenes overordnede mål om et miljøvennlig prosjekt. Det vil riktignok kreves en mer fullstendig analyse enn utført, for å kunne konkludere.

6.1.3 BREEAM

BREEAM er Europas ledende miljøsertifiseringsverktøy for bygninger, og har vært i bruk siden 1990. I likhet med andre land tas verktøyet i bruk også i Norge, og har i en egen tilpasning kalt BREEAM-NOR. Dette er den eneste metoden landet tar i bruk for sertifisering av bærekraftige bygg, og er utviklet av Grønn Byggallianse, tett samarbeidet med bygg- og eiendomsnæringen i Norge [41]. Formålet er å motivere til bærekraftig bygging og design gjennom hele byggeperioden til et prosjekt, fra tidlig fase til overlevering av bygget. BREEAM-NOR har vist seg som et effektivt verktøy for å samkjøre de ulike aktørene i et byggeprosjekt, og innføre bærekraftig tenkning i alle ledd.



Figur 58 - De ni kategoriene som vurderes under BREEAM-sertifisering [42].

For å få et BREEAM-NOR sertifikat må byggherren betale en registrerings- og sertifiseringsavgift [43], og vil totalt koste 64 000 kroner for dette prosjektet. Det er riktignok mulig å få sjekket byggets BREEAM kategori kostnadsfritt, men en offisiell sertifisering vil da ikke følge med. BREEAM-NOR sertifikatet kategoriseres i fem ulike nivåer; Pass, Good, Very Good, Excellent og Outstanding, hvorav sistnevnte er det beste. Nivåene baserer seg på dokumentert miljøprestasjon i ni kategorier, vist i figur 58.

Innad i hver kategori er det emner med egne kriterier, eller tiltak som kan gjøres for å redusere miljøpåvirkningen fra bygget. Kategoriene er igjen inndelt i en gitt poengsum, hvor alle utgjør en totalsum på 100. For å få høyest mulig sertifiseringsnivå på bygget, må det utføres flest mulig tiltak [44]. En fullstendig BREEAM-analyse krever at alle ni kategoriene tas med i betraktning, og da denne oppgaven får en begrensning på hvilke kategorier det kan tas hensyn til, vil det bli umulig å utføre en helt komplett BREEAM-analyse. De aktuelle kategoriene vil være; energi, transport, materialer, avfall, arealbruk, økologi og forurensning.

Prosjektet har som krav å oppfylle klassifiseringsnivået «Excellent», altså en poengsum på minimum 70%. Skolebygget vil da være av de 10% beste nybyggene sett på BREEAM-sertifisering, og bidra til å oppfylle kommunens ambisjoner om å lage et foregangsbygg innenfor miljø og klima. For å oppnå dette vil det foreligge ekstra kostnader i form av tiltak og løsninger.

BREEAM-klassifisering	Poengsum i %	Beskrivelse (% bygg innenfor kategori)
Outstanding	≥ 85	Innovasjon (1%)
Excellent	≥ 70	Beste praksis (10%)
Very good	≥ 55	Svært god praksis (25%)
Good	≥ 45	Gjennomsnittlig god praksis (50%)
Pass	≥ 30	Standard god praksis (75%)
Uklassifisert	< 30	Ikke i samsvar med BREEAM

Figur 59 – Referanseverdier for BREEAM-klassifisering for nybygg.

Mulige tiltak

HRP er i forprosjekteringsfasen og er derfor ikke avgjort hvilke tiltak som skal tas i bruk for å oppnå BREEAM kravet, samt bli kategorisert som et nullutslippsbygg og passivhus. Under vil det derfor bli foreslått noen nøkkeltiltak som er blitt drøftet, og er aktuelle for å oppnå klassifisering Excellent, basert på teori og tidligere BREEAM-sertifiserte bygg.

Isolasjon og tetthet

Sentrale elementer i nullutslippsbygg er å unngå luftlekkasjer og kuldebroer, og bidrar også til en god poengsum i BREEAM-sertifiseringen. Bygget dimensjoneres til å ha 300mm isolasjon i yttervegger for å kunne oppnå dette. Videre potensielle tiltak vil kunne være og ta i bruk 3-lags vinduer med isolert karm, som er de eneste vinduene som gir en ønsket U-verdi under 0.8. Bedre isolering fører til lavere U-verdi, som igjen bidrar til å redusere energiforbruket til oppvarming og en jevnere innetemperatur [45]. Det er også gunstig med en kvadratisk bygningsutforming, da en ønsker å ha så lite fasade- og takareal som mulig kontra gulvareal. Dette er ikke tilfellet ved Nye Tveten skole, og det må derfor utføres andre tiltak for å kompensere for dette.

Ressurser og energi

VVS anleggene skal fremme et godt innemiljø og et lavt energiforbruk. Tiltak som behovsstyring og LED-belysning er sentrale komponenter til et redusert energibruk. Dette innebærer at rom som ikke er i bruk, eller har tilstrekkelig luftkvalitet, reduserer bruken av energi til lys, varme og ventilasjon. Dette gjøres med automatiske detektorer, som for eksempel LED-belysning som kan justere sin intensitet etter rommets tilstedeværelse og dagslys [46].

Fornybar elektrisitet er også en positiv faktor som gir utslag på totalscoren. Dette kan oppnås ved bruken av solceller, som skal dekke hele skoletaket. Solcellene skal sørge for å dekke byggets elektriske varmebehov og spesifikk elektrisk forbruk til bygget. I tillegg skal den fornybare elektrisiteten som produseres på bygget dekke ekstra energi på grunn av krav knyttet til nullutslippsbygg, se kapittel 6.1.5.

Hovedvarmekilde for oppvarming av bygget skal være varmepumpe basert på energibrønner. Denne skal ha et naturlig kjølemedie og levere varme til rom, ventilasjon og vann.

I tillegg til oppvarming, kreves det energi til kjøling. Som kjøleanlegg benyttes varmepumpens energibrønnanlegg. En annen løsning for å effektivisere nedkjøling kunne vært å ha et adiabatisk forkjølingssystem og solavskjerming. Et slikt system vil kunne redusere effekt- og energibehovet, og muliggjøre et kostnadseffektivt kjøle- og varmeanlegg [46].

Materialer og helse

For å tilfredsstille material og helse kategoriene i BREEAM, er det essensielt å bruke materialer som bidrar til et lavt klimagassutslipp, ikke er miljøskadelige og bidrar til et godt innemiljø. Dette oppnås blant annet ved bruk av solceller som reduserer CO₂-avtrykket. Med å ta i bruk lavemitterende stoffer på større overflater, og leverandører med et miljøstyringsystem, kan en også redusere byggets drivhusgass-avtrykk betraktelig [47]. Ut ifra nødvendige behov og miljøkrav kan en også implementere såkalte grønne tak, altså et område dekket av vegetasjon, istedenfor solceller over hele taket.

Transport og bevegelse

Tilrettelegging for parkering av sykler, samt reduserte muligheter for parkering og ferdsel av biler stilles det også krav til i BREEAM. Det dimensjoneres derfor kun 12 parkeringsplasser for biler etter kravet om 1 bil per 4 ansatte. Det vil også etableres opp mot 300 sykkelplasser på skolen, noe som er godt over minimums kravet gitt for kategorien Excellent. Skillet mellom harde og myke trafikanter må også det tas høyde for under dimensjonering hvor en ønsker trygge områder for byggets brukere. Dette tas det blant annet høyde for under plassering av bygget på den eksisterende tomten.

Overordnet

Nevnte tiltak bygger alle på prosjektets miljøfokus, hvor spesielt bruken av solcelleanlegg, fornybare energikilder og piloter for nullutslippsbygg er de mest sentrale strategiene for å oppnå de ulike miljøkravene. Da det ikke er mulig å gjennomføre en komplett BREEAM-analyse her, kan en likevel være optimistisk på at det er mulig å oppfylle kommunens krav. HRP har satt sin poengambisjon til å være 79.5%, noe som vil være godt innenfor kravet på 70%. Det største utslaget mellom en potensiell BREEAM-sertifisering av bæresystemene vil være materialenes miljøpåvirkning. Materialene vil naturligvis gi ulikt resultat på miljøutslipp og byggets bærekraft, og det kan tenkes at det mer miljøvennlige materialet tre vil komme noe bedre ut. Bruken av fornybare energikilder og tilrettelegging av bygget vil derimot være likt. Uten å utføre en fullverdig sertifisering vil en ikke kunne bestemme byggets kategori, men det vil være oppnåelig å tilfredsstille kravet basert på tidligere prosjekt og erfaringer.

6.1.4 Passivhus

Et av kommunens miljømål er at bygget skal kunne defineres som et passivhus, som vil si at bygningen skal bruke passive tiltak for å redusere energibehovet sitt betraktelig. Med passive tiltak tenker man som regel på bedre varmeisolasjon, utnyttning av solenergi og varmegjenvinning [48].

Energiltak	Minstekrav
U-verdi for dører og vinduer	$\leq 0,80 \text{ W/m}^2\text{K}$
Normalisert kuldebroverdi for hele bygningen	$\leq 0,03 \text{ W/m}^2\text{K}$
Årsgjennomsnittlig temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner	$\geq 80 \%$
SFP-faktor (vifteeffekt) for ventilasjonsanlegg	$\leq 1,5 \text{ kW} / (\text{m}^3/\text{s})$
Lekkasjetall ved 50 Pa	$\leq 0,60 \text{ h}^{-1}$

Tabell 25 - Passivhuskrav for byggtekniske løsninger og ventilasjonssystem (standard)

Norge er det eneste landet i Europa som har en egen standard knyttet til passivhus. «NS 3700» og «NS 3701» definerer kravene til henholdsvis boliger og yrkesbygg, og kommer her med krav til varmetapstall, oppvarmingsbehov, energiforsyning, samt bygningsdeler og komponenter [49]. I tabell 25 er det definert minstekrav til byggetekniske løsninger og ventilasjonssystem for å sikre energieffektive løsninger. Disse oppfylles ved bruk av gode materialer og tilstrekkelig mengde isolasjon. Det vil ikke bli gått gjennom konkrete løsninger, men for å illustrere vil det bli tatt i bruk 3-lags glass med isolert karm siden det er det eneste som oppfyller minstekravet på U-verdi til vinduer. Andre komponenter vil derimot ha større valgfrihet.

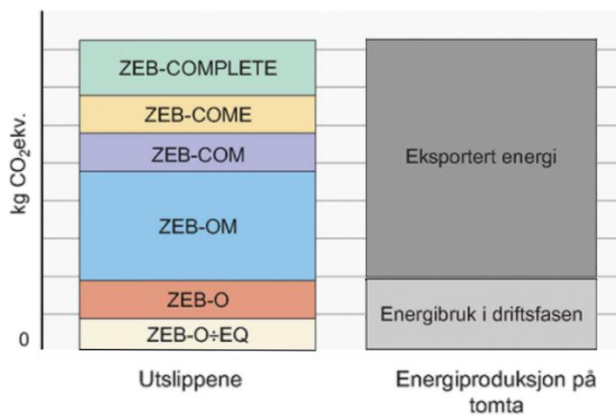
Standarden forteller også om hvilke energikilder byggets oppvarming skal baseres på, og stiller følgende krav: «levert energi fra el og fossile brensler må være mindre enn netto energibehov

fratrukket 50% av netto energibehov til varmtvann». Dette gjør at en må ta i bruk fornybare energikilder, og kan oppnås ved bruk av blant annet solfangere eller diverse varmepumpe løsninger [49], noe som vil være tilfellet ved prosjektet.

Passivhus har også flere fordeler i tillegg til miljøaspektet, som lavere driftsutgifter grunnet lavere energibehov, samt bedret komfort. Motsatt kan kravene gi arkitektoniske hindringer og ekstra kostnader. Passivhus er likevel et godt tiltak mot å kutte i klimagassutslipp i bygninger.

6.1.5 Nullutslippsbygg, ZEB-OM

Videre skal bygget bli definert som et nullutslippsbygg, som vil si at bygget sitt totalregnskap ikke bidrar med utslipp av klimagasser til atmosfæren. Dette innebærer at eksport av fornybar energi, produsert på bygningens tomt, skal kompensere for klimagassutslippene forårsaket fra bygget [50]. Det er per dags dato ikke en nasjonal eller internasjonal definisjon på nullutslippsbygninger, og det norske forskningscenteret ZEB (Zero Emissions Buildings) har derfor definert seks ulike ambisjonsnivåer. Desto flere faser fra byggets livsløp som er inkludert, desto mer ambisiøs vil målsetningen om en nullbalanse være. Nye Tveten skole skal ha ambisjonsnivået ZEB-OM. Denne målsetningen vil inkludere at byggets fornybare energiproduksjon kompenserer for klimagassutslippene fra energibruk i bygningens drift (O), i tillegg til produksjonen av byggematerialene (M) gjennom hele livsløpet til bygget. Det er verdt å merke seg at det kun er et par prosjekter i Norge som har tilfredsstilt disse kravene, og dette er derfor en veldig ambisiøs målsetning. Kravene vil derfor være premissgivende for hele prosjektet og designet til bygget for å kunne realiseres.



Figur 60 - Prinsippkisse av ZEB-ambisjonsnivåer [51]

Det er planlagt at skolens tak skal være dekket av solceller. For å dekke ZEB-OM kravet må solcellene produsere mer energi enn byggets forbruk, slik at kravet om å eksportere overskudds energi kan bli overholdt. En må derfor i tillegg til å utføre energiberegninger, lage en livsløpsanalyse for å kunne beregne ZEB-balansen. Forskjellen mellom bæresystemene vil derfor være mengden drivhusgasser hvert systems materialer slipper ut, som igjen vil ha innvirkning på hvor stor mengde energi solcellene er nødt til å produsere. Det er derfor viktig at begge systemer tar i bruk materialer med lave CO₂-utslipp. For å oppnå kravet skal det i prosjektet tas i bruk ulike pilotbygg fra ZEB som gir et mangfold av løsninger. Gjenganger i disse pilotene er bruken av solceller og varmepumper, samt energibesparende løsninger. Gjennom disse ni ulike pilotene til forskningscenteret er det blitt dokumentert at en kan tilfredsstille kravene med bruken av tre, men også stål og betong [52].

Livsløpsanalysen av det avgrensede bæresystemet gir en indikasjon på miljøavtrykket til systemene. Resultat i figur 57 viser at tre har minst utslipp, men at stål og betong systemet også virker å ha et positivt miljøregnskap. Det vil riktignok kreves en mer komplett livsløpsanalyse for å kunne fastslå energibalansen. Gjennom bruken av pilotprosjektene, i tillegg til livsløpsanalysens indikasjon, kan det tenkes at kravene knyttet til ZEB-OM er like oppnåelig for begge bæresystem.

6.2 Økonomi

I en bransje med store utslipp av drivhusgasser, tradisjonelle byggemetoder og et økt søkelys på miljø, sier det seg selv at forandringer er sårt tiltrengt. Nye løsninger blir stadig foreslått, testet og iverksatt for å få bransjen på rett spor mot en mer miljø- og klimavennlig tilnærming. Likevel går en ikke alltid for den mest miljøvennlige løsningen. Økonomi er den mest dominerende faktoren innenfor byggebransjen, og med nye løsninger forekommer det ofte mer tilleggskostnader enn ved de tradisjonelle. Dette fører til at ønsket om klimavennlige bygg ofte blir skrotet, og for å tilfredsstille miljøkrav må en derfor ofte la det gå på bekostning av det økonomiske aspektet. Økonomi er derfor en viktig post under forprosjekteringsfasen, og er ofte den som avgjør hvilket bæresystem og løsninger som skal benyttes. Under forprosjekteringen av Nye Tveten skole kom det som krav å oppnå de miljømessige kravene med massivtre. Som det fremvises i kapittel 6.1 virker miljøkravene å kunne bli oppfylt med et alternativt bæresystem i stål og betong. I slike tilfeller hvor flere bæresystem innfrir byggherrens krav er det ofte det økonomiske som avgjør valg av utførelse.

6.2.1 Materialkostnad

En måte å anslå hvilket bæresystem som vil være billigst, kan være å sammenligne materialkostnadene. Dette er likevel litt mer komplekst enn å bare regne på mengder og pris da det vil være indirekte kostnader knyttet til materialenes byggetid. Videre vil det være ulike materialer og mengder tilknyttet systemenes ikke-bærende strukturer. Utregningen gir derfor et grovt anslag på størrelsesorden på kostnadene, med forbehold om nevnte unøyaktigheter. Det er hentet enhetspris på elementer fra Norsk Prisbok (v2020-02), som er et oppslagsverk for den norske byggebransjen. Enhetsprisen inkluderer diverse kostnader for materiale som festemateriell, armering, brann- og akustikktiltak, isolasjon med mer.

Bygningsdel	Mengde	Totalt	Bygningsdel	Mengde	Totalt
Dekke	1051m ²	kr 1 314 905,-	Dekke	1051m ²	kr 2 608 036,-
Bærende vegger	628m ²	kr 1 483 476,-	Bærende vegger	1800m ²	kr 2 410 200,-
Sjakt	124m ²	kr 279 054,-	Sjakt	350m ²	kr 868 700,-
Søyler	13 510kg	kr 429 792,-	Søyler	110m ²	kr 56 760,-
Bjelker	7089kg	kr 335 616,-	Bjelker	1065m ²	kr 675 210,-
Totalt		kr 3 842 616,-	Totalt		kr 6 618 906,-

Tabell 26 - Kostnad bæresystem stål og betong (t.v. i blå) og massivtre (t.h. i grønn)

Stål og betong

I tabell 26 er det en oversikt over ulike elementmengder med tilhørende kostnader. Valg av typer og størrelser er blitt bestemt gjennom dimensjonering i FEM-Design. Enhetspriser for materialene tar for seg detaljer knyttet til oppføring og branntiltak for stål, og pris for gysing og fuging for hulldekker. Utregningene har ikke tatt hensyn til avkapping, men kun mengde stål, og total pris vil ligge på rundt 3.9 millioner. Se vedlegg G1 for fullstendig utregning.

Tre

Mengder tre er hentet fra mengdenotat utført i samarbeid med HRP, se vedlegg F5. Bygningsdelene er utført i massivtre, med unntak av søyler og bjelker som er tiltenkt i limtre. De bærende veggene vil omfatte yttervegger og enkelte innervegger.

Enhetsprisene tar kun for seg materialet og merkostnad knyttet til overflater, og ikke akustikk og branntiltak. Ser i tabell 26 at et estimat for prisen vil ligge på rundt 7 millioner.

Sammenligning

Bæresystemet i stål og betong er estimert til å være den billigste løsningen, og vil koste rundt 60% av prisen i tre. Dette bekrefter at de mer tradisjonelle materialene fremdeles er billigere, til tross for en positiv utvikling innenfor teknologi og produsenter av tre. Kostander for tre har derimot hatt en synkende kurve de seneste årene, og vil fortsette å bli mer konkurransedyktig økonomisk med et økende marked av produsenter og produkter.

Utrekningene vil som sagt gi et anslag på størrelsesorden, snarere enn et konkret punkt for å konkludere hvilket bæresystem som vil være billigst. Da spesielt bærende vegger vil være ulike, ville beregningene blitt mer representative om en tok for seg mer enn bare byggets bæresystem. Det er også en liten usikkerhet knyttet til overslagsberegningene av mengder tre, men dette vil ikke endre resultatet nevneverdig. Videre sammenligning vil derfor være å regne mer nøyaktig på materialkostnadene, samt å anslå beregnet byggetid. Kostnadsbesparelser tilknyttet byggetid er en av de største fordelene under bygging med tre, og vil kunne balansere totalregnskapet mer ut. Selv om materialkostnader er betraktelig billigere for stål og betong vil variabler som byggetid og bearbeiding av materialene være svært ulike, og ha store utslag for totalrammen på prosjektet. Basert på erfaring og dagens marked, kan det likevel antas at bæresystem i stål og betong vil være mest økonomisk.

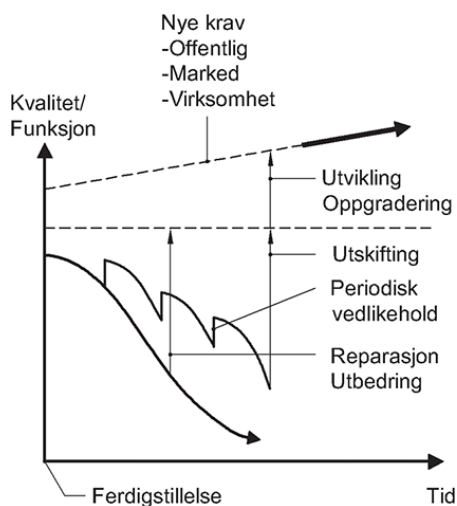
6.2.2 Klimakvoter

Da en ser på materialet tre som mer miljøvennlig, kan klimakvoter være et kompenserende alternativ for miljøutslipp ved bruk av stål og betong. Klimakvoter er en tillatelse til å slippe ut en viss mengde klimagasser, hvor en betaler en gitt sum for hvert tonn CO₂ en slipper ut. Norske bedrifter tar del i et kompenseringsystem regulert av EU, hvor det er et bestemt antall kvoter som kan kjøpes og selges. Kvotesystemet til EU er en av tre grunnpilarer for å oppnå det fastsatte målet med å redusere 40% av utslippene i 2030 i forhold til 1990 [53]. Fordeler med et slikt system er at det gir mulighet for å handle kvoter på tvers av Europas grenser, noe som sikrer at reduksjonene skjer der hvor det er mest økonomisk hensiktsmessig [54]. Økte utslipp fra en bedrift tilsvarer reduserte utslipp fra en annen, noe som er gunstig da skadevirkning av utslipp er uavhengig av lokasjon. Typiske klimakompenserende tiltak er investeringer gjennom fornybar energi, energieffektivisering og den mest effektive og anvendte metoden er treplanting. Indirekte konsekvenser for bruken av slike kvoter er positive sosiale og økonomiske effekter i spesielt utviklingsland der prosjektene typisk finner sted [55].

Da vi i dette prosjektet ikke har helt konkrete tall på størrelsesorden på det dimensjonerte prosjektet i stål og betong, kan en ikke sammenligne det med den forventede totalrammen på rundt 200 millioner kroner i tre [1]. Ved å ta utgangspunkt i materialkostnads beregningen, kan en løsning være å bruke den trolige differansen på kjøp av klimakvoter. Dette vil kunne føre til at det dimensjonerte bæresystemet indirekte vil få et mer miljøvennlig regnskap enn det i tre. Norsk stålforbund klimakompenserer for bruk av stål, og snittpris ligger på 65 øre i ekstrakostnad per kilo «Grønt Stål» [56]. Grønt stål vil ikke være helt CO₂ fritt, men fungere reduserende på totalmengden utslipp. Det kommer frem i LCA at det dimensjonerte bygget slipper ut 31kg CO₂e/m² mer enn det forprosjekterte. Stål står for i underkant av 10% av utslippene, noe som gjør at det kreves mer kjøp av klimakvoter enn å bare ta i bruk grønt stål. Da dette er en detaljert prosess som krever mer data tilknyttet byggets totalpris og utslipp, er det ikke blitt gjennomført en grundig utregning av hvor mye klimakvoter som skal til for å få et mer miljøvennlig klimaregnskap enn tre.

For illustrasjonens skyld kan en henvise til et eksempel om en matbutikk bygd i 2019, utarbeidet av norsk stålforbund. Bygget ble dimensjonert i massivtre for en totalramme på 28.5 millioner kroner, og samme prosjekt fikk et pristilbud i stål på 20 millioner kroner. Om en hadde brukt hele prisdifferansen på 8.5 millioner til å kjøpe klimakvoter, hadde en endt opp med et stålbygg som ble 40% mer miljøvennlig enn bygget i tre [57]. Dette understreker at en kan ta i bruk ulike tiltak som klimakvoter for å få et bedre miljøregnskap, samtidig som at det vil være den mest lønnsomme løsningen.

6.3 Levetidsbetraktninger



Figur 61 – Kvalitet og funksjon for en bygning sett i et levetidsperspektiv [59]

Alle nye bygg settes opp med en forventet levetid, der byggets komponenter og bygningsdeler skal fungere optimalt. Vedlikehold har mye å si for levetiden til et prosjekt, og det er derfor nødvendig å anslå intervallene for vedlikehold og utskiftninger så nøyaktig som mulig. Det er ønskelig å unngå problematikk i planlegging og budsjettering av vedlikeholdet. Porsgrunn kommune har et maritimt klima, som må tas hensyn til under valg av spesielt kledning, for å motstå fukt på en tilstrekkelig måte.

6.3.1 Levetid stål og betong

Stål har meget god bestandighet, med lite eller ingen behov for vedlikehold. Eventuelle behov vil heller ikke være så vanskelig å vedlikeholde, da det stort sett gjelder overflatebehandling. Stål påvirkes også minimalt av miljøet, og er et ubrennbart og flammesikkert materiale, med en rekke andre gode egenskaper [60]. Det som kan påvirke levetiden til stål er hovedsakelig korrosjon, noe som kan forhindres ved å varmforsinke stålet. Dette vil gi materialet en levetid på 50-100 år avhengig av de klimatiske forholdene, samtidig som det ikke vil kreve mye vedlikehold [61].

For betong bestemmes levetiden ut ifra omgivelsene og betongkvaliteten. Gode betongkonstruksjoner forventes å ha en levetid på 50-200 år, uten å måtte utføre vedlikehold av betydning. Det kan likevel kreves omfattende vedlikehold eller riving allerede etter 20-30 år, dersom betongen ikke er godt nok egnet for miljøet. Konstruksjonens miljøeksponering er derfor viktig å hensynta for å oppnå en lengre levetid.

For bygget oppført i stål og betong vil det lønne seg å ta i bruk vedlikeholdsfrie plater utenpå kledningen. Steni-fasadeplater er ofte tatt i bruk, da de både er vedlikeholdsfrie og har lang levetid [62]. Fasadeplatene har også en funksjonsgaranti på 60 år, og trenger minimalt med vedlikehold, som igjen reduserer levetidskostnadene [63].

6.3.2 Levetid tre

Behovet for vedlikehold er noe større i en trekonstruksjon, og består hovedsakelig av overflatebehandling i form av beis, maling eller olje. Skolens kledning blir mest utsatt for klimapåkjenninger, og overflatebehandling må utføres for å beskytte mot påkjenninger som sollys, oppfukning og soppangrep [64]. Spesielt fukt er svært farlig, da dette fører til deformasjoner og sprekkdannelser, og videre misfarging og råte. Fukt reduserer levetiden betraktelig, og vedlikeholdsfri trekledning av type Møre Royal eller tilsvarende tas i bruk. Dette vil gi materialet en motstandsgaranti i opptil 50 år mot råte [65].

6.4 Akustikk

God akustikk i bygninger er et veldig viktig kriterium. Et dårlig lyd miljø påvirker kommunikasjon og produktivitet, samt helse til en viss grad. Det er derfor svært viktig med god akustikk på Tveten ungdomsskole, slik at lærerne og elevene får en god hverdag uten forstyrrelser fra støy.

Det stilles forskjellige krav til romakustikk etter rommets brukskategori, og det vil være forskjell på hva kravene er i et undervisningsrom, kontorlandskap og fellesareal i boligbygninger. Det overordnede kravet vil være at brukere ikke skal oppleve plagsom etterklang, eller ha problemer med å forstå tale, viktige meldinger og lydsignaler [66, §13-8]. Støy kan oppstå utenfor bygget, inne i selve rommet og i tilstøtende rom, og forplanter seg videre på flere måter. For å hindre dette tar bygningsakustikk for seg lydisolasjon mellom rom, trinnlydnivå, romklang og støy i bygget [67]. Det er i hovedsak viktigst å isolere for lyd i vegger og dekker. Da det kun er tatt i bruk stål i søyler og bjelker, vil dette ikke være nødvendig å ta hensyn til. Det vil være ulikt hvordan bygningsakustikken hensyntas mellom bæresystemene ettersom materialene har forskjellige akustiske egenskaper.

6.4.1 Lydkrav

Lydkrav for nye skolebygg bestemmes etter Plan- og bygningsloven og gjeldende forskrift fra TEK som baseres på «NS 8175». Standarden gir grenseverdier for lydtekniske egenskaper for rom i ulike bygningskategorier. Grenseverdiene angis i klasse A, B, C og D. Dersom grenseverdiene i klasse C oppfylles, vil forskriftens intensjoner være oppfylt, men grenseverdiene regnes ikke som god lydstandard med mindre de er i klasse B [68].

Lydkrav		Luftlydisolasjon [dB]		Trinnlydnivå [dB]	
		Klasse B $R'_w + C_{50-5000}$	Klasse C R'_w	Klasse B $L'_{n,w} + C_{l,50-2500}$	Klasse C $L'_{n,w}$
Boliger	Mellom boenheter, og boenheter og fellesareal.	58	55	48	53
	Mellom rom internt i boenhet	43	-	63	-
Kontorer	Mellom kontorer, kontorer og fellesarealer	40	(37)	58	(63)
Skoler	Mellom klasserom, og klasserom og fellesareal	52	48	58	63
Barnehager fritidshjem	Mellom rom for søvn og hvile, og andre fellesrom	52	48	53	58

Tabell 27 - Lydkrav til enkelte bygningstyper gitt i NS 8175, der lydklasse C angir minimumskrav.

Tabell 27 viser lydkravene for luftlydisolasjon og trinnlydnivå, der minimumskravet er 48dB R'_w for luftlydisolasjon, og 63dB $L'_{n,w}$ for trinnlydnivå.

6.4.2 Påvirkningskategorier for lyd

Luftlyd

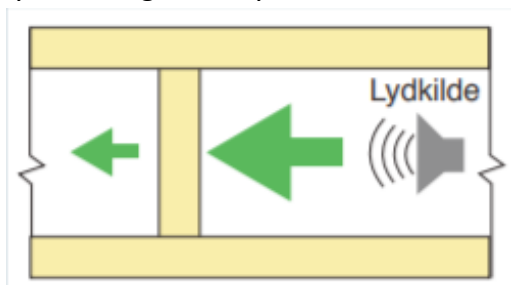
Luftlyd er lydbølger som spres ut i rommet fra en lydkilde, eksempelvis en stemme eller en høyttaler. Når en lydbølge treffer en bygningsdel, blir den satt i svingninger, og deler av bølgene vil stråle ut på baksiden av bygningsdelen. Lydreduksjonstallet, R , tilsier forskjellen i utstrålt effekt på baksiden og innfallende effekt på framsiden, og ønskes så høyt som mulig. Et veid reduksjonstall, R_w , tar hensyn til at øret ikke oppfatter lyden like godt i alle frekvensområder, og brukes for å karakterisere luftlydisolasjonen av et konstruksjonselement i laboratorium. R'_w angir veid feltmålt reduksjonstall for en konstruksjon i et bygg som er ferdig [69].

Trinnlyd

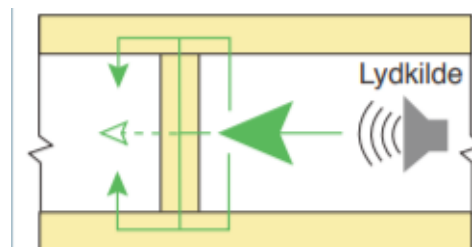
Trinnlyd er lyden som høres når noen går i etasjen over, og andre lydkilder som dunking og slag. Lyden oppstår ved vibrasjoner i materialet, og valg av material i etasjeskillere har derfor innvirkning på hvor mye trinnlyd som oppstår. Lette materialer som tre settes enklere i vibrasjon, og vil gi et høyere lydnivå enn for eksempel tyngre støpte dekker. Enkelt sagt er det tettheten i etasjeskilleren som gir grunnlaget for lydnivået [70]. Lydtrykket, L , ønskes så lavt som mulig, og kan måles i enten et laboratorium eller i det ferdige bygget. Normalt gjøres det korreksjoner som gjør målingene uavhengige av mottakerrommets absorpsjonsevne (møbler og innredning) [69].

Direktetransmisjon

Dette er lyd som beveger seg direkte gjennom skillevegger, se figur 62. En skillevegg med mer tyngde vil øke evnen for lydisolasjon. Direktetransmisjon gjelder både for luftlyd og trinnlyd. En oppbygning av massivtreelementer vil fungere som en bedre lydisolator enn en løsning med trebjelkelag eller stendervegger [69]. I likhet med tre, vil en betongvegg være bedre på lydisolering desto tykkere den er.



Figur 62 – Direktetransmisjon [69]



Figur 63 - Flanketransmisjon [69]

Flanketransmisjon

Lyd beveger seg også via flankerende konstruksjoner, som vil si at den beveger seg i overgangen mellom gulv og vegg, se figur 63. Dette kalles flanketransmisjon, og er et begrep som også brukes om all lydoverføring som ikke går direkte gjennom en skillekonstruksjon. Eksempler på hvor flanketransmisjon kan oppstå er ved utettheter, mekanisk sammenkobling, kanaler og over himling [68]. Når en skal velge konstruksjonsdeler og knutepunkt, er det viktig å ta hensyn til flanketransmisjon, for å unngå unødvendig støy.

Etterklangstid

Etterklangstid, T , er et mål på hvor lang tid det tar for lyden i et rom å svekkes, og måles i sekunder. Mer nøyaktig er dette den tiden det tar før energien av den diffuse lyden er sunket med 60dB i lydtryknivå, eller en milliondel [71]. Etterklang kan sammenlignes med ekko fra vegger, tak og gulv, hvor lyden reflekteres mellom alle overflatene. For hver gang lyden reflekteres vil også noe absorberes, og slik gjentar det seg helt til lyden dør ut. Gjenstander som er i rommet vil også absorbere lyden, som møbler og personer. En lang etterklangstid kan oppfattes som slitsom og reduserende for taleforståelsen, noe som er ugunstig for undervisning og samarbeid [72].

Bruksområde	Klasse B T (sek)	Klasse C T (sek)
I trapperom, skoler	1.0	1.3
Fellesareal og korridor, skoler Trapperom/fellesgang i barnehager	0.8	0.9
Oppholdsrom i barnehage, lokaler for SFO, og førsteklasse-rom Undervisningsrom, møterom, sløydsaler og andre rom med støyende aktiviteter	0.5	0.6
Undervisningslandskap	0.3	0.4
Større undervisningsrom/auditorier og andre undervisnings- og personalrom	Fastlegges spesielt	Fastlegges spesielt

Tabell 28 - Grenseverdier for lengste etterklangstid i skoler, barnehager, lokaler for SFO, og førsteklasse-rom. Etter NS 8175

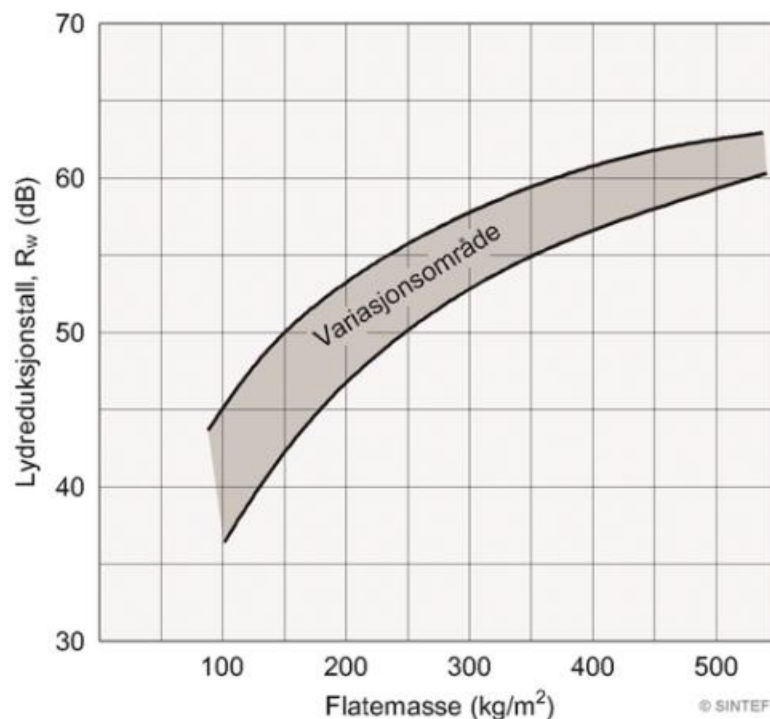
Tabell 28 viser grenseverdiene for de ulike rommene i et nytt skolebygg, der klasse C er minstekravet og klasse B tilsvarer god lydstandard [73].

6.4.3 Lyd i gipsvegger

Med unntak av de bærende betongveggene, vil de fleste rom skilles av vegger satt opp med doble gipsplater på hver side av stenderen. Dette oppfyller gitte krav for lydklasse B og C med gitt brannklasse [74]. Gipsplater er godt egnet som lydskillende bygningsdeler, og har et gunstig forhold mellom vekt og stivhet, noe som gjør at platene effektivt kan absorbere lydenergi. I tillegg har gipsplater små materialbevegelser ved varierende fukt- og temperaturforhold. Dette gjør det lite sannsynlig at det dannes riss i materialet, og minker også mulighetene for lydlekkasjer [75].

6.4.4 Lyd i betong

Som materiale er betong veldig tungt, noe som gjør det godt egnet mot gjennomgang av luftlyd, da det vil oppstå lite svingninger. I urbane strøk og områder med mye trafikk, er det mer naturlig og kostnadseffektivt å velge betong for å unngå støy og skape et bedre innemiljø. Lydisolerende konstruksjoner må være enten tunge, stive, massive, eller utføres som dobbeltkonstruksjoner. Betongen besitter mange av disse egenskapene, og er derfor et enklere materiale å jobbe med når det kommer til lydisolasjon i bygget [76].



Figur 64 - Sammenheng laboriemålt lydredusjonstall og faldemasse [77]

Oppbygning av konstruksjon	
Tykkelse på betong [mm]	Flatemasse [kg/m ²]
120	275
150	345
180	415
200	460
250	575

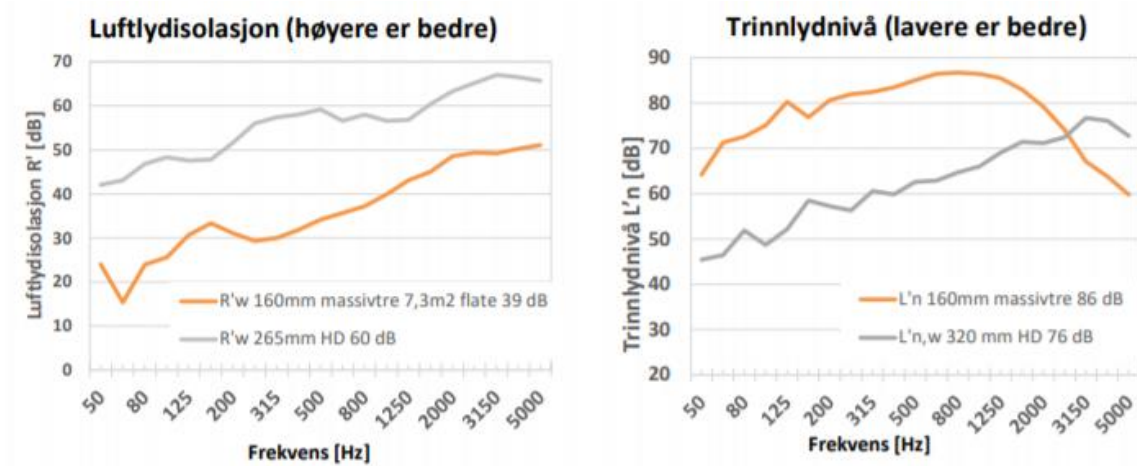
Tabell 29 - Flatemasse til forskjellige betongtykkelser [77].

For betong bestemmes lydreduksjonstallet først og fremst av flatemassen, og på figur 64 kan en se sammenhengen mellom laboratoriemålt lydreduksjonstall og veggens flatemasse [77]. Minstekravet til lydreduksjonstall for skoler ligger på 48dB, og dette er oppnåelig med en relativt lav flatemasse, avlest til rundt 130-230kg/m². I tabell 29 kan en se flatemassen til forskjellige tykkelser av betongvegger uten tilleggskonstruksjoner. Betongveggene i Tveten ungdomsskole skal være 200mm og 250mm, og en får da lydreduksjonstall på omkring 60dB for begge. Dette er godt innenfor klasse B sitt krav på 52dB og indikerer god kvalitet. Sammenlignet med massivtre, har 200mm betong cirka samme flatemasse som et massivtredekke på 1000mm [78].

6.4.5 Lyd i tre

Generelt forbinder en ikke tre med god lydisolasjon. For å bedre de lyddempende egenskapene til konstruksjonen kan det være en mulighet å gi panelet en utforming, eller å bygge opp elementet. En slik løsning kan være massivtre med akustisk demping [79]. Spesielt trinnlyd i etasjeskillere og flanketransmisjon er viktig å ta hensyn til i en trekonstruksjon. I bygninger der det stilles krav til lydisolering, er det ofte nødvendig å kombinere tre med andre materialer som gipsplater, isolasjon eller lydisolerende plater. For å hindre vibrasjoner og forplantning av lyd i bygget, vil også bæresystemet og knutepunktkoblingene være svært viktige faktorer [69]. Knutepunktene må dimensjoneres for både lastpåkjenninger og bygningsakustikk. Om et knutepunkt er knyttet sammen av tre mot tre, vil det føre til flanketransmisjon og overføring av vibrasjoner. Etasjeskillere er også kritisk for et bæresystem av tre, grunnet problemer med trinnlyd som enkelt forplanter seg ned i etasjer. Her vil det være nødvendig med mye lydisolering for å kunne oppnå gitte krav. Lydisolerende tiltak kan være å inngå lag med vibrasjonsdemping og vekt for gulv, mens for veggkonstruksjoner ta i bruk doble vegger med få koblingspunkt, stående på lydisolerende klosser [80]. Fugetetting, isolasjon og elastiske mellomlegg er også vanlige tiltak som benyttes for å tilfredsstille akustiske krav.

Tre er som materiale fire til fem ganger lettere enn betong, og har en mye lavere tetthet [81]. For å oppnå samme tyngde som et betongelement, må bygget settes opp med veldig tykke massivtrekonstruksjoner, som gjør det mer krevende å tilfredsstille lydkravene. I figur 65 er det gjort en sammenligning mellom betong og massivtre for luftlydisolasjon og trinnlydnivå. Her ser en at det ofte vil være fordelaktig å ha betong framfor massivtre, men at trinnlydnivået kan bli noe høyere for betong om frekvensen blir opp mot 3000Hz. Det er rundt denne frekvensen at mennesker starter å oppfatte høyere lyder som lavere [82], og det er veldig uvanlig at lydene som oppstår i et skolebygg har så høy frekvens.



Figur 65 - Luftisolasjon og trinnlydnivå i hulldekke og massivtre (t.v.) betong (t.h.) [78]

Etter gjennomgang av bygningsakustikk og nødvendige tiltak, kan det konkluderes med at bæresystemet i stål og betong vil være mer gunstig for konstruksjonen. Det vil foreligge mer nødvendige tiltak for å tilfredsstille kravene for skolebygg i massivtre, og dette vil igjen ha innvirkning på prosjektets økonomi og miljøbelastning.

6.5 Brann

Det stilles krav og forutsetninger til sikkerhet ved brann i Plan- og bygningsloven, og etter byggt teknisk forskrift TEK 17 §11. Forskriften i TEK17 stiller krav til tilfredsstillende sikkerhet for mennesker, dyr, materielle verdier, og for miljø- og samfunnsmessige forhold [66]. De forskjellige materialene har svært ulike brannegenskaper, noe som gjør dette til et interessant punkt å sammenligne.

6.5.1 Risiko- og Brannklasser

Utarbeiding av branddimensjonerende tiltak bestemmes etter hvilke klasse bygget tilhører i §11-2 og §11-3 i TEK17. En deler byggets risikoklasser inn i seks, og klassifiserer bygget ut ifra gitte kriterier som vist i tabell 30.

Risikoklasse	Beregnet for sporadisk opphold	Alle kjenner til rømningsforholdene og kan bringe seg selv i sikkerhet	Beregnet for overnatting	Liten brannfare ved forutsatt bruk
1	Ja	Ja	Nei	Ja
2	Ja/Nei	Ja	Nei	Nei
3	Nei	Ja	Nei	Ja
4	Nei	Ja	Ja	Ja
5	Nei	Nei	Nei	Ja
6	Nei	Nei	Ja	Ja

Tabell 30 - Bestemmelse av risikoklasse

Det er forutsatt at byggets hovedfunksjon er skoledrift da samtlige aktiviteter og formål vil falle under det. Bygget plasseres derfor i risikoklasse 3.

Brannklasse	1	2	3	4
Konsekvens	Liten	Middels	Stor	Særlig stor

Tabell 31 - Beskrivelse av brannklasser

Byggverk, eller ulike deler av byggverket, skal plasseres i brannklasse ut fra den konsekvensen en brann kan forårsake skade på liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø. Bygninger i risikoklasse 3 med høyst to etasjer og BRA mindre enn 800m² per etasje kan plasseres i klasse 1 [66]. Bygget plasseres derfor som følge av preaksepterte ytelser i §11-3 i brannklasse 1, se brannprospekt i vedlegg H1. Som vist i tabell 32 er det likevel ytelser i prosjektet som samsvarer med brannklasse 2, som følge av planlagte avvik fra VTEK.

Plan	Risikoklasse	Tellende plan	Brannklasse
1	3	Ja	1
2	3	Ja	
Teknisk mellometasje	2	Nei	

Tabell 32 - Bestemmelse av brannklasse

6.5.2 Bæreevne og stabilitet ved brann og eksplosjon

Hovedformålet med å stille branntekniske krav til bærende konstruksjoner er å oppnå tilstrekkelig bæreevne og stabilitet under brannpåkjenning. Ved dimensjonering skal det medregnes termisk påkjenning fra den brannenergien og det forventede brannforløpet i byggverket. Målet er at byggverket ikke kollapser, men bevarer sin stabilitet og bæreevne i tilstrekkelig tid til rømning, redning og slokking, se vedlegg H1. Det er angitt ulike tider for ulike bygningsdeler og brannklasser i §11-4. For brannklasse 1 vil 30 minutter være dimensjonerende, vist i tabell 33.

Bygningsklasse	Brannklasse		
	1	2	3
Bærende hovedsystem	R 30 [B 30]	R 60 [B 60]	R 90 A2-s1, d0 [A 90]

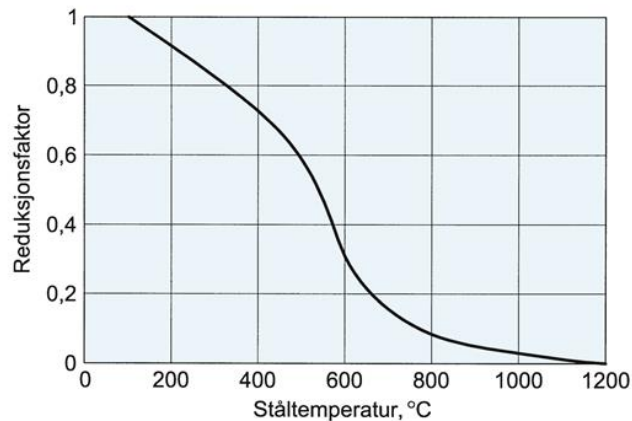
Tabell 33 - Bærende hovedsystem verdier for gitte brannklasser.

Som et kompensierende tiltak for avvik fra VTEK17 har RIB i HRP besluttet å oppgradere ytelsene på bærende konstruksjoner i skoledelen fra brannklasse 1 til 2 [86]. En må dermed dimensjonere for minimum 60 minutter i stedet. Det stilles også egne krav til sekundær- og ikke-bærende konstruksjonsdeler som ikke vil bli gjennomgått.

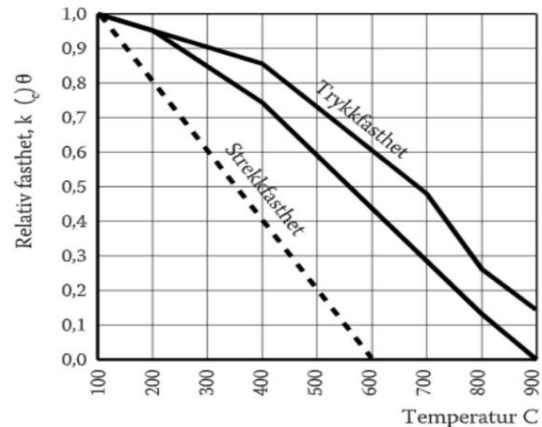
6.5.3 Brannpåvirkning av stål, betong og tre

Stål

Legeringen bestående av hovedsakelig jern og karbon betegnes som et ugunstig materiale knyttet til brann. Stål har en høy termisk konduktivitet med ca. 50W/Km, noe som gjør materialet til en god varmeleder. Til sammenligning har betong og tre mellom 0,1-1,0 W/Km [86]. Ved temperaturendringer vil derfor stål påvirkes i en mye større grad enn andre materialer. Flytespenningen til stål reduseres også kraftig ved høye temperaturer, i tillegg til at elastisitetsmodulen vil reduseres i takt med motstanden mot elastisk deformasjon. Reduksjon i flytespenning og E-modul vil føre til plastiske deformasjoner, og ved overbelastning av kapasitet vil det oppstå brudd. Som vist i figur 67 vil flytegrensen bli redusert 70% ved 600° celsius.



Figur 66 - Betongen relative fasthet som funksjon av temperatur i henhold (t.h.) [12, bind D3]

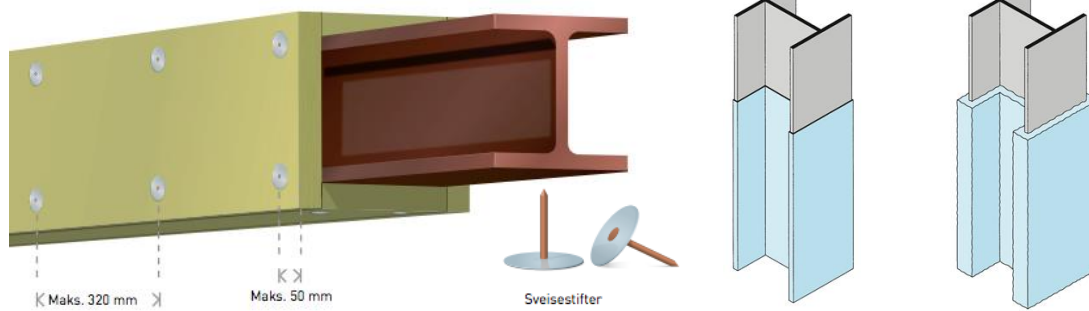


Figur 67 - Reduksjonsfaktorer for flytegrense avhengig av stålets temperatur [S235-S460] (t.v.) [87]

Stålkonstruksjoner kan som regel ikke oppnå en høyere brannmotstand enn 10 til 15 minutter uten beskyttelse. Brannbeskyttelsessystemers funksjon er å forsinke oppvarmingen av stålet, og tidspunkt for varige deformasjoner eller sammenbrudd [88]. Ved bruk av sertifiserte brannisoleringsystem kan en oppnå inntil 180 minutters brannmotstand. Kravet på R60 vil derfor kunne tilfredsstilles ved bruk av isolerende tiltak.

Standard tiltak kan være å ta i bruk gips, stålull, betong og brannmaling til å isolere stålet. Brannbeskyttende maling er en velfungerende beskyttelse, og er vanlig å ta i bruk der det er synlige stålprofiler. Malingen legger seg som et belegg utenpå stålet, som under varmpåkjenning på rundt 200°C vil begynne å svulle og danne et tykt brannisolerende skum på ståloverflaten, se figur 68. Det brannbestandige skummet har meget lav varmeledningsevne og nedsetter temperaturstigningen til stålet for brannmotstand opptil 60 minutter. Ettersom brannmaling sveller 30-50 mm kan det ikke tas i bruk dersom det hindres av stendere og lignende. Det er også knyttet en del større kostnader til denne formen brannisolering, men er til gjengjeld enkelt å påføre og krever lite vedlikehold.

Et annet tiltenkt alternativ vil være å ta i bruk den verdensledende isolasjonsprodusenten Rockwools «Conlit» systemer, se mulig løsning på figur 69. Bedriften har i tillegg til sine innovative løsninger med bruk av ubrennbar stålull, en dedikert miljøprofil for sine produkter [89]. Systemet baseres på en trykkfast, vannvisende mineralullplate som oppfyller kravene til brannsikkerhet ved bærende stålkonstruksjoner med brannklasse R30-R180 [90].



Figur 68 - Brannmaling før og etter brann (t.h.) [87]

Figur 69 - Illustrasjon av Rockwool Conlit sveisestift metoden (t.v.) [91].

Da bæresystem i betong, og til dels tre, ikke krever omfattende brannisoleringstiltak vil isolering av stål ha en betydelig forskjell i kostnader. Vedlagt i tabell 34 er det utregnet et prisanslag på brannisolering av stålkomponenter i bygget. For søyler og bjelker er det tatt i bruk Conlit 150 med 20mm tykkelse, hvor materialpriser er hentet fra byggevarekjeden BM. Conlit systemet leveres i plater som blir oppkuttet etter behov, og det er derfor innlagt litt ekstra mengder til svinn. Utregningen er blitt forenklet til at samtlige søyler og bjelker har lik dimensjon. For fagverk er det tatt i bruk brannbeskyttende maling som tilfredsstiller krav til REI 60, hvor pris er hentet fra norsk prisbok, og inkluderer arbeidstimer. Tabellen viser at det vil koste omkring 215 000 kroner å brannisolere stålet i bæresystemet, i tillegg til vanlige branntiltak som sprinkleranlegg som vil være felles for samtlige materialer.

Element	Tiltak	Pris [NOK]
Søyler	Mineralull (Conlit 150)	79 000,-
Bjelker	Mineralull (Conlit 150)	118 000,-
Fagverk	Brannmaling	18 000,-
Totalt		215 000,-

Tabell 34 - Kostnader knyttet til brannisolering av stål i dimensjonert bæresystem

Betong

Betong har gunstige brannegenskaper da det er et selvisolerende material med lav varmekonduktivitet som gir materialet god bestandighet. Betong inneholder også vann, som har en forsinkende egenskap på temperaturøkning ved brann [12, bind D3], og gir dermed god varighet under høye temperaturer. Som vist i figur 66 så ser man den relative fastheten til betong som funksjon av reduksjonsfaktor og temperatur. Leser av at ved 600°C vil trykkfastheten være redusert med 40%. Likevel har betong evnen til å ikke kollapse under brann, og kan i optimale tilfeller fortsette å ta i bruk deler av betongkonstruksjonen etter brannrehabilitering.

I enkelte tilfeller av brann kan materialet ha negative egenskaper da det kan oppstå eksplosive avskallinger under rask brannutvikling. Dette forårsakes av innvendig damptrykk, og betongens vanninnhold er dermed en vesentlig faktor for muligheter for denne ulykkesformen og skadeomfang [92]. Til tross for dette er betong fremdeles det beste materialet å ta i bruk når en dimensjonerer etter brannmotstand.

Brannmotstand	Veggtykkelse [mm]	Dekketykkelse [mm]
REI 30	120	60
REI 60	120	80
REI 90	140	100
REI 120	160	120
REI 180	200	150
REI 240	240	175

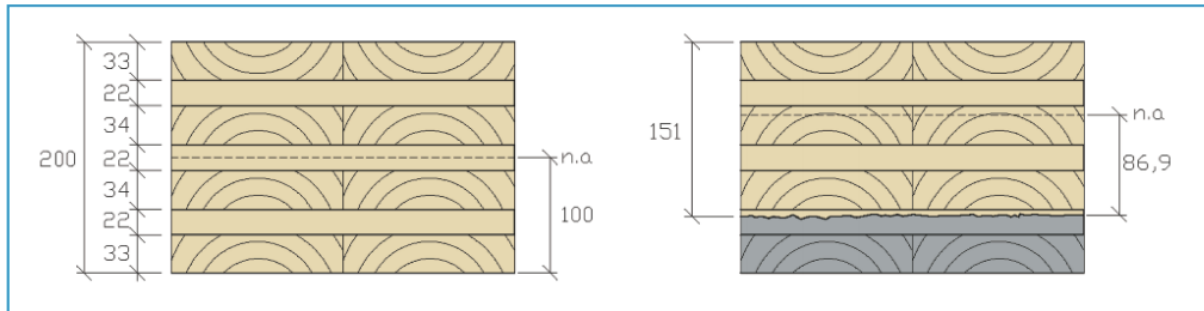
Tabell 35 - Brannmotstandskrav til betong

I tabell 35 er det fremlagt minimum nødvendige tykkelser av bærende konstruksjonsdeler for å oppnå ulike brannkrav. Tabellen er hentet fra Byggforsk sine anvisninger knyttet til brannmotstand i bladene «520.321» og «520.322». Byggets betongvegger vil overholde kravene til henholdsvis REI 240 og REI 180, noe som er langt over bæresystemets krav på R 60. Dette understreker at betong har meget gode egenskaper knyttet til brann, og krever ingen ytterligere tiltak.

Tre

Tre brenner forutsigbart og med konstant hastighet. Under nedbrenning vil det etter hvert danne seg et forkullende lag som beskytter det friske, bakenforliggende trevirket. Det uforkullede tverrsnittet kan opprettholde bæring og stabilitet i konstruksjonen, da det tilnærmet vil beholde stivhets- og styrkeegenskapene sine (PDF kilde). Grunnet den forutsigbare nedbrenningen, kan en anslå tid til eventuell kollaps underveis i brannforløpet. Med en lav konduktivitet og liten risiko for uventet kollaps, er tre et av de bedre brannmotstandsmaterialene en kan bruke i konstruksjoner. I forhold til betong, vil det derimot være mer kostnader tilknyttet brannisolering, da det vil kreve større mengder material for å oppnå tilstrekkelig bæreevne. Det finnes også diverse isolerende tiltak som brannmaling som kan tas i bruk.

Det prosjekterte bygget skal ta i bruk kryss laminert tømmer (CLT). For brannklasse 1 er materialkravet til overflater i brannceller som ikke er rømningsvei, D-s2, d0 [ln 2]. Overflatene må i tillegg opprettholde kravet på R 60, noe som er oppnåelig med bruk av CLT.



Figur 70 - Tverrsnitt med tykkelser og anvisning av nøytralakse før og etter brannbelastning [93].

Figur 70 viser et eksempel på et CLT tverrsnitt med tykkelse 200 mm, som også er den tiltenkte tykkelsen på etasjeskillet i det prosjekterte bygget. Dette tverrsnittet skal opprettholde bæreevne i 60 minutter, og det er videre vedlagt utregning i tabell 36 for resttverrsnitt ved brann, som også er illustrert i figur 70. Ser at tverrsnittet får en forkullingsdybde på 49mm.

Beregning av forkullingsdybde og resttverrsnitt		
t	Branneksponeringstid	60min
β_n	Nominell forkullingshastighet	0.7mm/min for CLT
d_0	Kompenserende faktor for hjørneeffekt, samt redusert stivhet og fasthet rundt forkullingsgrensen	7mm
k_0	Kompenserende faktor for hjørneeffekt, samt redusert stivhet og fasthet rundt forkullingsgrensen	1.0 for $t \geq 20$ min
$d_{char,n} = \beta_n \cdot t$	Nominell forkullingsdybde	0.7mm/min * 60min = 42mm
$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0$	Effektive forkullingsdybde	42mm + 7mm * 1,0 = 49mm
$d = d_{ubrent} - d_{ef}$	Resttverrsnitt	200mm – 49mm = 151mm

Tabell 36 - Beregning av forkullingsdybde og resttverrsnitt

Ved bruk av trematerialer med gode kvaliteter som CLT, kan en tilfredstille kravet til brannklasse 1 og R60. Dette gitt at en har en lav nok forkullingsdybde som fører til et tilstrekkelig resttverrsnitt, som bidrar til å opprettholde ønskelig bæreevne.

6 Konklusjon

Oppgavens formål har vært å utføre en dimensjonering av bæresystem for skolebygg i stål og betong, og utføre en alternativsvurdering innenfor ulike temaer opp mot et forprosjektert bæresystem i tre. I alternativsvurderingen har fokuset vært på å se om det dimensjonerte bygget kan overholde kommunens ambisiøse miljøkrav, og derav være konkurransedyktig med det antatt mer miljøvennlige materialet tre.

Det dimensjonerte bæresystemet er utarbeidet til å ha tilstrekkelig bæreevne og kapasitet i henhold til gjeldende standarder og forskrifter. Systemet hensyntar mulige lastpåkjenninger og kombinasjoner, og det er i tillegg blitt utført en større vurdering av seismiske påkjenninger på bygget da en ikke ble omfattet av utelatelseskriterier. En har derfor vært nødt til å påvise tilstrekkelig sikkerhet for eventuelle seismiske laster. Dimensjonering og analyse av modell er blitt utført i modelleringsprogrammene Revit og FEM-Design samt diverse håndberegninger og kontroller. Analyser og beregninger viser til et bæresystem som oppfyller konstruktive kriterier, som tilstrekkelig kapasitet til påkjente laster for de enkelte elementer, og bygget sett som en helhet.

Sammenligning av miljøpåvirkning viser til gode resultater for begge systemer i den utførte livsløpsanalysen, hvor begge faller innunder klasse A i bundet karbonreferanse. Da det vil være ulike og mangelfulle mengder knyttet til hvert av systemene vil ikke livsløpsanalysen være helt nøyaktig. Likevel gir det en god indikasjon på at det med bruk av stål og betong kan oppnås gode resultater i likhet med tre, til tross for en forventet økning av miljøpåvirkning uavhengig av materialvalg. Begge systemer virker også å ha potensial til å oppfylle kommunens ønsker knyttet til BREEAM, passivhus og nullutslippshus, men dette krever mer nøyaktig beregning for å kunne fastslå resultat. Økonomisk sett kreves det også mer nøyaktige beregninger, men utregning av materialvalg viser til antakelsen om at det fremdeles er en god del billigere å ta i bruk de tradisjonelle byggematerialene. Der stål og betong viser til særs gode egenskaper for akustikk, er det flere utfordringer knyttet til tre. Dette vil føre til færre tiltak for å overholde akustiske krav gitt i standarden, noe som igjen har en positiv innvirkning på økonomien. Brannegenskaper vil være svært forskjellig for samtlige materialer, hvor det spesielt kreves mer tiltak til brannisolering av stål. Likevel vil bygget være mer gunstig da dekker og større vegger og sjakter er utført i det brannisolerende materialet betong. For tre vil det derimot være større utfordringer knyttet til brann dimensjonering og kreve større- komplekse tiltak for å opprettholde byggets bæreevne under brann. Da massivtre er relativt nytt som bæresystem for større bygg er det også knyttet en del usikkerhet rundt dette.

7 Videre arbeid

For videre arbeid vil det å øke rapportens mengde være naturlig. Under utarbeidelse er det gjort flere ulike antakelser for å avgrense oppgavens omfang. Disse vurderingene kan i videre arbeid bli redegjort ytterligere. Videre finnes det flere aktuelle temaer og punkter av interesse for ytterligere gjennomgang som er blitt utelatt eller ikke sett på tilstrekkelig.

- Dimensjonering av fundament
- Dimensjonering av tak
- Nærmere sammenligning av økonomi
- Trappesjakt
- Knutepunktsforbindelser for rammesystemet
- Komplette BREEAM-analyse

Referanser

- [1] A. Brekkhus, «Prosjekterer miljøskole for Porsgrunn kommune», Bygg.no. Hentet fra: <http://www.bygg.no/article/1437463> (åpnet mar. 11, 2021).
- [2] Bygg med tre, *Tre som byggemateriale*, U.Å. Hentet fra: <http://byggmedtre.no/byggemateriale.html> (åpnet mar. 11, 2021).
- [3] HR Prosjekt, *Tveten skole – en skole for fremtiden*, U.Å. Hentet fra: <https://hrprosjekt.no/wp-content/uploads/2020/10/Tveten-yard-1536x864.jpg> (åpnet mai 19, 2021).
- [4] Norconsult, *Avansert programvare for konstruktører*, U.Å. Hentet fra: <https://www.nois.no/produkter/bim/fem-design/> (åpnet mai 15, 2021).
- [5] Focus Software, *Ove-Sletten*, U.Å. Hentet fra: <https://www.focus.no/produkter/ove-sletten/> (åpnet apr. 05, 2021).
- [6] Ove-Sletten, *Programmer*, U.Å. Hentet fra: <http://www.ove-sletten.no/programmer.htm> (åpnet apr. 05, 2021).
- [7] Metallbygg, *Stålbygg*, U.Å. Hentet fra: <https://metallbygg.no/tjeneste/stalbygg/> (åpnet apr. 03, 2021).
- [8] Norsk Stål, *Grønnere – Stålproduksjon i dag*, U.Å. Hentet fra: <https://www.norskstaal.no/Default.aspx?ID=6474> (åpnet mar. 12, 2021).
- [9] J. V. Thue, «Betong» i *Store norske leksikon*, 2019. [Online]. Hentet fra: <http://snl.no/betong> (åpnet: mar. 11, 2021).
- [10] SINTEF, *Betong er en del av klimaløsningen*, U.Å. Hentet fra: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2020/-betong-er-en-del-av-klimalosningen/> (åpnet mar. 11, 2021).
- [11] Standard Norge, *NS-EN 1990 Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner*, U.Å. Hentet fra: <https://www.standard.no/fagomrader/bygg-anlegg-og-eiendom/eurokoder1/ns-en-1990-grunnlag-for-prosjektering-av-konstruksjoner/> (åpnet mar. 11, 2021).
- [12] Betongelementforeningen, *Betongelementboka*, 1. Utg, 2015. [Online]. Hentet fra: <https://betongelementboka.betongelement.no/betongapp/default.html>
- [13] Norsar, *Hva er et jordskjelv*, U.Å. Hentet fra: <https://www.jordskjelv.no/om-jordskjelv/hva-er-et-jordskjelv/> (åpnet mai 19, 2021).
- [14] NDLA, *Teknologiske plater i bevegelse*, 2020. Hentet fra: <https://ndla.no/subject:6/topic:1:182849/topic:1:175043/resource:1:175888/5?filters=urn:filter:01c27030-e8f8-4a7c-a5b3-489fdb8fea30> (åpnet mai 19, 2021).

- [15] Standard Norge, *NS-EN 1998 Eurokode 8: Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning*, U.Å. Hentet fra: <https://www.standard.no/fagomrader/bygg-anlegg-og-eiendom/eurokoder1/eurokode-8/> (åpnet mai 19, 2021).
- [16] H. Bungum og H. Fossen, «Jordskjelv», i *Store norske leksikon*, 2020. [Online]. Hentet fra: <http://snl.no/jordskjelv> (Åpnet: mai 19, 2021).
- [17] Standard Norge, *Ny utgave av NS-EN 1990 - på norsk og engelsk*, U.Å. Hentet fra: <https://www.standard.no/nyheter/nyhetsarkiv/bygg-anlegg-og-eiendom/2016/ny-utgave-av-ns-en-1990-eurokode---pa-norsk-og-engelsk/> (åpnet mai 19, 2021).
- [18] S. O. Sletten, «V-Skive». *Ove-sletten.no*. Hentet fra: <http://www.ove-sletten.no/brukerveiledning/SKIVE.pdf> (Åpnet mars 22, 2021).
- [19] Meccanica, *Stabilitet*, U.Å. Hentet fra: <http://meccanica.no/statikk/stabilitet.html> (åpnet mai 20, 2021).
- [20] Miljøstatus, *Klima*, U.Å. Hentet fra: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/miljomal/klima/> (åpnet apr. 14, 2021).
- [21] Regjeringen, *Norge forsterker klimamålet for 2030 til minst 50 prosent og opp mot 55 prosent*, 2020. Hentet fra: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/norge-forsterker-klimamalet-for-2030-til-minst-50-prosent-og-opp-mot-55-prosent/id2689679/> (åpnet apr. 14, 2021).
- [22] Å. Drageland, «Bygg står for 40% av verdens utslipp - slik skal det reduseres», *Tu.no*. Hentet fra: <https://www.tu.no/artikler/bygg-star-for-40-av-verdens-utslipp-slik-skal-det-reduseres/223922> (åpnet mar. 11, 2021).
- [23] ecoRI news, *Global Warming Has Concrete Problem When It Comes to CO2*, 2019. Hentet fra: <https://www.ecori.org/climate-change/2019/10/4/global-warming-has-a-co2ncrete-problem> (åpnet mar. 11, 2021).
- [24] Norcem, *Cement production and emissions*, U.Å. Hentet fra: https://www.norcem.no/en/Cement_and_CCS (åpnet mar. 12, 2021).
- [25] *Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning*, NS-EN 1998 Eurokode 8, 2004.
- [26] TreFokus, *Hvorfor er tre et miljøvennlig byggemateriale?*, U.Å. Hentet fra: <http://www.trefokus.no/treveilederen/temaer/miljo-og-berekraft/hvorfor-er-tre-et-miljovennlig-byggemateriale-> (åpnet mar. 12, 2021).
- [27] PRé Sustainability, *LCA basics: life cycle assessment explained*, U.Å. Hentet fra: <https://pre-sustainability.com/articles/life-cycle-assessment-lca-basics/> (åpnet mar. 15, 2021).
- [28] LCA.no, *Hva er LCA ?*, U.Å. Hentet fra: <https://lca.no/hva-er-lca/> (åpnet mar. 12, 2021).
- [29] LCA.no, *LCA illustrasjon livsløp*. U.Å. Hentet fra: <https://lca.no/wp-content/uploads/LCA-Illustrasjon-288x300.jpg> (åpnet mai 19, 2021).

- [30] EPD-Norge, *Hva er en EPD?*, U.Å. Hentet fra: <https://www.epd-norge.no/hva-er-en-epd/> (åpnet mar. 15, 2021).
- [31] J. Hindklev, «Tirsdag åpnes verdens største massivtrefabrikk i Norge», Bygg.no. Hentet fra: <http://www.bygg.no/article/1392782> (åpnet apr. 25, 2021).
- [32] LCA.no, *Beskrivelse av miljøpåvirkningskategorier i EPDer*, U.Å. Hentet fra: <https://lca.no/miljopavirkninger/> (åpnet mar. 16, 2021).
- [33] US EPA, *Understanding Global Warming Potentials*, U.Å. Hentet fra: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials> (åpnet mar. 16, 2021).
- [34] Treindustrien, *Miljø*, U.Å. Hentet fra: <http://treindustrien.no/miljo> (åpnet apr. 25, 2021).
- [35] The Nature Education, *Eutrophication: Causes, Consequences, and Controls in Aquatic Ecosystems*, U.Å. Hentet fra: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/eutrophication-causes-consequences-and-controls-in-aquatic-102364466/> (åpnet mar. 16, 2021).
- [36] J. Hovda, «Utredning av miljøkonsekvenser ved disponering av betonginstallasjoner», npd.no. Hentet fra: <https://www.npd.no/globalassets/1-npd/publikasjoner/rapporter/multiconsult-as-disponering-av-betonginstallasjoner.pdf> (åpnet mar. 16, 2021).
- [37] F. Bjørnå, «nitrogengjødsel», i *Store norske leksikon*, 2021. [Online]. Hentet fra: <http://snl.no/nitrogengj%C3%B8dsel> (Åpnet: apr. 25, 2021).
- [38] Statistisk sentralbyrå, *Ozonlaget brytes ned*, 2004. Hentet fra: <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/artikler-og-publikasjoner/ozonlaget-brytes-ned> (åpnet mar. 16, 2021).
- [39] K. A. Rosvold og K. Hofstad, «primærenergi», snl.no. Hentet fra: <http://snl.no/prim%C3%A6renergi> (Åpnet: apr. 25, 2021).
- [40] Norsk Fjernvarme, *Primærenergi*, U.Å. Hentet fra: <http://www.fjernvarme.no/fakta/primaereenergi> (åpnet apr. 25, 2021).
- [41] Byggtjeneste, *Hva er BREEAM / BREEAM-NOR*, U.Å. Hentet fra: <https://byggtjeneste.no/breeam-nor/> (åpnet mar. 12, 2021).
- [42] BREEAM, *BREEAM kategorier*, U.Å. Hentet fra: <https://www.breeam.com/wp-content/uploads/sites/3/2018/08/chooseBREEAM2-1024x572.png> (åpnet mai 19, 2021).
- [43] Grønn byggallianse, *Skal sertifisere*, U.Å. Hentet fra: <https://byggalliansen.no/sertifisering/om-breeam/skal-sertifisere-med-breeam-nor/> (åpnet mar. 14, 2021).
- [44] Grønn byggallianse, *Nysgjerrig på BREEAM-NOR?*, U.Å. Hentet fra: <https://byggalliansen.no/sertifisering/om-breeam/nysgjerrig-pa-breeam-nor/> (åpnet mar. 14, 2021).
- [45] Direktoratet for byggkvalitet, *Bytte vinduer? Velg vinduer som gir deg lys og varme*, 2018. Hentet fra: <https://dibk.no/bygge-eller-endre/puss-opp-energismart/bytte-vinduer-velg-vinduer-som-gir-deg-lys-og-varme/> (åpnet apr. 16, 2021).

- [46] Grønn byggallianse, *Swecobygget | BREEAM-sertifiserte prosjekter*, U.Å. Hentet fra: <https://byggalliansen.no/kunnskapssenter/kunnskapssenter-prosjekter/breeam-sertifiserte-prosjekter/swecobygget/> (åpnet apr. 16, 2021).
- [47] Grønn byggallianse, *Fornebu S | BREEAM-sertifiserte prosjekter*, U.Å. Hentet fra: <https://byggalliansen.no/kunnskapssenter/kunnskapssenter-prosjekter/breeam-sertifiserte-prosjekter/fornebu-s/> (åpnet apr. 16, 2021).
- [48] Energiverket, *Hva er passivhus, nullhus og plusshus?*, U.Å. Hentet fra: <https://www.energiverket.no/hva-er-passivhus-nullhus-og-plusshus/> (åpnet apr. 19, 2021).
- [49] Tekna, *Hva er kravene til passivhus?*, 2021. Hentet fra: <https://www.tekna.no/fag-og-nettverk/bygg-og-anlegg/byggbloggen/krav-til-passivhus/> (åpnet apr. 19, 2021).
- [50] Byggforsk, *Nullutslippsbygninger (ZEB). Retningslinjer og beregningsmetoder*, 2017. Hentet fra: https://www.byggforsk.no/dokument/5177/nullutslippsbygninger_zeb_retningslinjer_og_beregningsmetoder (åpnet apr. 17, 2021).
- [51] Byggforsk, *ZEB krav*, U.Å. Hentet fra: <https://www.byggforsk.no/Image/Display/50224> (åpnet mai 19, 2021).
- [52] FutureBuilt, *Veien mot nullutslippsbygg*, 2021. Hentet fra: <https://www.futurebuilt.no/Blogg#> (åpnet apr. 19, 2021).
- [53] Regjeringen, *Hva er klimavoter?*, 2020. Hentet fra: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/klima/innsiktsartikler-klima/klimavoter/id2076655/> (åpnet apr. 08, 2021).
- [54] Wikipedia, «Klimavote», *Wikipedia*, 2019. [Online]. Hentet fra: <https://no.wikipedia.org/w/index.php?title=Klimavote&oldid=19694352> (Åpnet: apr. 08, 2021).
- [55] Nordkak, *Klimakompensasjon*, U.Å. Hentet fra: <https://www.nordkak.no/Om-oss/Klimakompensasjon> (åpnet apr. 08, 2021).
- [56] Norsk Stålforbund, *Grønt stål*, U.Å. Hentet fra: <https://no.grontstal.se/contact-us/> (åpnet apr. 09, 2021).
- [57] K. Myhre, “Stål og betong vs massivtre”, *nyheter.byggfakta.no*. Hentet fra: <https://www.byggfakta.no/stal-og-betong-vs-massivtre-177763/nyhet.html> (åpnet apr. 26, 2021).
- [58] Beste tid å reise. *Klima Porsgrunn*, UÅ. Hen <https://www.bestetidareise.no/norge/porsgrunn-2948017/> (åpnet apr. 19, 2021).
- [59] Byggforsk, *700.320 Intervaller for vedlikehold og utskifting av bygningsdeler*, 2017. Hentet fra: https://www.byggforsk.no/dokument/3312/intervaller_for_vedlikehold_og_utskifting_av_bygningsdeler (åpnet mar. 16, 2021).
- [60] Stålhallen bygg, *Hvorfor velge stålbygg*, UÅ. Hentet fra: <https://stalhallen.no/hvorfor-velge-stalbygg/> (åpnet apr. 19, 2021).

- [61] Norsk Overflate Teknikk AS, *Varmforzinking*, UÅ. Hentet fra: <https://not-as.no/varmforzinking/> (åpnet apr. 19, 2021).
- [62] Steni, *Miljø*, UÅ. Hentet fra: <https://www.steni.no/hvorfor-velge-steni/miljoe/> (åpnet apr. 19, 2021).
- [63] Steni, *Markedets beste funksjonsgranti*, UÅ. Hentet fra: <https://www.steni.no/hvorfor-velge-steni/60-aars-garanti/> (åpnet apr. 19, 2021).
- [64] Byggforsk, *542.640 Overflatebehandling av utvendig trevirke*, 2009. Hentet fra: https://www.byggforsk.no/dokument/482/overflatebehandling_av_utvendig_trevirke (åpnet apr. 19, 2021).
- [65] MøreRoyal, *Vedlikehold av MøreRoyal*, UÅ. Hentet fra: <https://hoved.talgo.no/no/om-moreroyal/vedlikehold> (åpnet apr. 19, 2021).
- [66] *Byggteknisk forskrift*, TEK17, 15.09.2017. [Online]. Hentet fra: <https://dibk.no/regelverk/tek/3/13/iv/13-8/>
- [67] Multiconsult, *Bygningsakustikk*, UÅ. Hentet fra: <https://www.multiconsult.no/karriere/kompetansenettverk/akustikk-2/bygningsakustikk/> (åpnet mar. 17, 2021).
- [68] Byggforsk, *524.335 Lydisolering i skoler og barnehager*, 2006. Hentet fra: https://www.byggforsk.no/dokument/3242/lydisolering_i_skoler_og_barnehager#i1 (åpnet mar. 17, 2021).
- [69] Trefokus, *Tre og lyd*, 2011. Hentet fra: <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/36-Tre-og-lyd.pdf> (Åpnet: mar. 17, 2021).
- [70] Canes, *Trinnlyd*, UÅ. Hentet fra: <https://www.canes.no/produktinformasjon/trinnlyd> (åpnet mar. 19, 2021).
- [71] Wikipedia, «Etterklangstid», *Wikipedia*. 2019. [Online]. Hentet fra: <https://no.wikipedia.org/w/index.php?title=Etterklangstid&oldid=19925294> (Åpnet: mar. 21, 2021).
- [72] Kunnskapsbanken, *Romakustikk og etterklang*, 2018. Hentet fra: <https://www.kunnskapsbanken.net/romakustikk-og-etterklang/> (åpnet mar. 21, 2021).
- [73] Byggforsk, *527.305 Lydforhold i skoler og barnehager*, 2012. Hentet fra https://www.byggforsk.no/dokument/426/lydforhold_i_skoler_og_barnehager#tab22a (åpnet mar. 22, 2021).
- [74] Norgips, *Innervegger*, UÅ. Hentet fra: <https://norgips.no/prosjektering/vegger-med-st%C3%A5l/innervegger> (åpnet mai 11, 2021).
- [75] Glava, *Gipsplaters lydisolerende egenskaper*, UÅ. Hentet fra: <https://www.glava.no/aktuelt/gipsplatenes-lydisolerende-egenskaper> (åpnet mar. 18, 2021).

- [76] Byggutengrenser, *Støydemping*, 2017. Hentet fra: <https://www.byggutengrenser.no/2017/02/05/stoydemping/> (åpnet mar. 21, 2021).
- [77] Byggforsk, 524.321 *Lydisolasjon for massive innervegger*, 2019. Hentet fra: https://www.byggforsk.no/dokument/378/lydisolasjon_for_massive_innervegger#i31 (åpnet apr. 07, 2021).
- [78] T. A. Ognedal, «Lyd i bygninger av massivtre og litt om ny lydstandard NS 8175». Byggitre.no. Hentet fra: http://byggitre.no/kurs%20130220/5_%20akustikk%20-%20brekke%20&%20strand-%20t%C3%B8nnes%20a_%20ognedal.pdf (Åpnet: apr. 12, 2021).
- [79] Trefokus, *Demping og forsterking av lyd med tre*, U.Å. Hentet fra: <http://www.trefokus.no/treveilederen/temaer/akustikk-og-lydisolasjon/demping-og-forsterking-av-lyd-med-tre> (åpnet mar. 19, 2021).
- [80] Trefokus, *Akustikk og lydisolasjon*, U.Å. Hentet fra: <http://www.trefokus.no/treveilederen/temaer/akustikk-og-lydisolasjon/demping-og-forsterking-av-lyd-med-tre> (åpnet mar. 19, 2021).
- [81] Sweco, *Massivtre og støy*, 2020. Hentet fra: <https://www.sweco.no/nyheter/nyhetsartikler/2020/massivtre-og-stoy/> (åpnet apr. 12, 2021).
- [82] E. M. Vigen, «Akustiske størrelser, del 2: Frekvensveiing», *Acousticsresearchcentre.no*. Hentet fra: <https://acousticsresearchcentre.no/akustiske-storrelser-del-2-frekvensveiing/> (åpnet apr. 13, 2021).
- [83] T. E. Martinsen, «(Det får være-) Måte på Jordskjelvdimensjonering», upublisert.
- [84] Limtreforeningen, *Limtreboka*, 2. Utg, 2015. [Online]. Hentet fra: https://www.limtreforeningen.no/images/Limtreboka_versjon_2.pdf
- [85] Treteknisk, *bygge med Massivtreelementer*, Hefte 2, 2006. [Online]. Hentet fra: <http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/teknisk-handbok/Hefte-2-Byggeteknikk.pdf>
- [86] H. Ormestad og B. Pedersen, «Varmeledning», *Store norske leksikon*. 2020. [Online] Hentet fra: <http://snl.no/varmeledning> (Åpnet: mar. 19, 2021).
- [87] Byggforsk, 520.315 *Brannbeskyttelse av stålkonstruksjoner*, 2004. Hentet fra: https://www.byggforsk.no/dokument/314/brannbeskyttelse_av_staalkonstruksjoner (åpnet apr. 28, 2021).
- [88] A. Hofsøy, «Avstiving av bygninger», upublisert.
- [89] ROCKWOOL, *Isolasjon av bygninger*, 2021. Hentet fra: <https://www.rockwool.no/> (åpnet apr. 14, 2021).
- [90] Rockwool, *CONLIT 150*, 2021. Hentet fra: <https://www.rockwool.no/produkter/passiv-brannsikring/conlit-150/> (åpnet apr. 14, 2021).

- [91] Rockwool, Conlit sveisestiftmetoden, 2021. Hentet fra:
<https://brandcommunity.rockwool.com/readimage.aspx?pubid=69291e9b-62b0-4390-9e9d-d3b536027631> (åpnet mai 19, 2021).
- [92] Brannmannen, *Betong og eksplosiv avskalling*, 2005. Hentet fra:
<https://www.brannmannen.no/fagstoff/betong-eksplosiv-avskalling/> (åpnet mar. 19, 2021).
- [93] Trefokus, *Brannbeskyttet trevirke*, 2005. Hentet fra:
<http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-31.pdf> (åpnet mar. 19, 2021).
- [94] Betongelementforeningen, *Svingninger av betongelementer*, 2005. Hentet fra:
<https://www.betongelement.no/siteassets/dokumenter/svingningavbetongelementer.pdf> (åpnet mar. 9, 2021).
- [95] Motek, *Ekspansjonsbolter*, 2021. Hentet fra:
<https://www.motek.no/Festemidler/Anker/Ekspansjonsbolter/c/ekspansjonsanker> (åpnet mai. 7, 2021).
- [96] Motek, *Ekspansjonsbolter*, 2021. Hentet fra:
<https://www.motek.no/Festemidler/Anker/Ekspansjonsbolter/c/ekspansjonsanker> (åpnet mai. 7, 2021).
- [97] B. Jacobus, U.T. *Creative Commons*. 2020. Hentet fra:
https://live.staticflickr.com/49/132069382_4c8233a6b9_b.jpg (åpnet februar. 7, 2021).
- [98] B. Warston, U.T. *Creative Commons*. 2020. Hentet fra:
<https://img.gfx.no/2529/2529151/COLOURBOX35725883.1000x563.jpg> (åpnet februar. 7, 2021).
- [99] W. Thistleton, U.T. *Creative Commons*. 2020. Hentet fra:
<https://img.gfx.no/2365/2365218/Dalston%20Works%20massivtre.1000x564.jpg> (åpnet februar. 7, 2021).
- [100] Lett-tak, *Detaljtegninger*, 2021. Hentet fra: <https://lett-tak.no/wp-content/uploads/2016/04/Detaljtegninger-alle-Lett-Tak-2016-web.pdf> (åpnet februar. 7, 2021).