

# Bærekraftig renovering – Energoptimalisering av eksisterende bygninger

## Sustainable Retrofitting - Energy Optimization of Existing Buildings

### Trondheim Mai 2022

Navn studenter:

Johan August Sundland  
Joachim Andersen  
Einar Granli Hansen

Intern veileder:  
Bozena Hrynyszyn

Ekstern veileder:

Prosjektnr:  
2022 -19

Rapporten er ÅPEN

## Forprosjekt

Oppgaven som ble gitt av NTNU, ønsker å finne «Bærekraftige løsninger for renovering av eksisterende bygninger mot nabolag med null utslipp av klimagasser, ZEN». Med dette som bakgrunn for oppgaven, skal det forskes på løsninger for energioptimalisering av bygningskroppen til sentralbyggene på NTNU. Produksjon av fornybar energi til bygningen vil også bli relevant siden målet med forskningen er å strebe etter at bygningen skal kunne kvalifiseres som en «Zero energy building» (ZEB), samtidig som den skal bidra mot nabolag med null utslipp (ZEN)

Sentralbyggene ble oppført i 1961 og 1968, og ble tegnet av arkitekt Karl Grevstad. Siden byggene er over 60 år gamle, antas det at byggene ikke oppnår dagens krav til energieffektivitet. Det er i forbindelse med dette at det skal finnes nye energieffektive løsninger for renovering av sentralbygget.

For å kunne besvare oppgaven, er det blitt utarbeidet en tredelt problemstilling;

1. På bakgrunn av gamle tegninger av sentralbyggene, gjennomføre simuleringer gjort opp mot gjeldende byggeteknisk forskrift, foreslå bærekraftige løsninger for renovering av sentralbygget på NTNU Gløshaugen.
2. Foreslå løsninger til tekniske systemer som oppvarming og ventilasjon, og løsninger til fornybar energiproduksjon.
3. Vurdere på bakgrunn av dette, om det er mulig å renovere bygningen slik at det blir et nullutslippsbygg (ZEB – O).

## Abstract

As a result of national and international sustainable development goals there are now stricter requirements regarding buildings energy consumption. Most of Norway's building stock in 2050 already exists today, and to reach these goals there needs to be more retrofitting projects to decrease existing buildings energy usage.

Studies has shown that retrofitting old buildings is a sustainable option, contrary to demolishing and building a new one. The research center for zero emission neighborhoods in smart cities (FME ZEN) are working on developing innovations that could reduce buildings energy consumption and the release of greenhouse gas emission. In this thesis there has been conducted a case study of the two high rise buildings that is part of a building complex called Sentralbyggene at NTNU Gløshaugen in Trondheim.

The goal was to analyze the existing buildings and to propose sustainable solutions, that could decrease the energy consumption of the buildings. This thesis focused only on sustainable solutions for retrofitting, and does not consider the cost of the retrofitting, or the CO<sub>2</sub> emissions related to the retrofitting. Since the thesis used technical terminology and theory, it was therefore necessary to lay out the fundamentals for this.

The second chapter was thus dedicated to explaining and clarify this theory, and to enlighten the reader and make it easier to understand the coherence later in the thesis. By searching through old blueprints of *Sentralbyggene*, the construction method and the components used was clarified. The blueprints were thus the foundation for the analysis that was done in chapter 4.

After this analysis there is suggested to different concepts for retrofitting these buildings. With the blueprints and documentation providing the basis for the solutions, it was important to explain how the content was handled and analyzed, and the method that was used during the analysis.

The quantitative and qualitative method was used when working with the analysis, and the documentation was checked with the use of known reliable sources. The two concepts suggested different solutions for technical systems like ventilation, heating and solar power, as well as constructional solutions.

From an interview with a construction engineer and professor at NTNU, it was made clear that the concrete elements on the north, and south side of both buildings was in bad condition and needed to be removed [1]. After the removal of these elements, the concrete columns and concrete floor remains. These columns made a great foundation for the planning of the solutions since these could not be removed. The columns are load bearing, so the solution was designed to be built in between these columns.

The use of premade *timber element system* “TES”, and premade *Plug and play* systems was suggested, since it could be easy to assemble in between the concrete columns. With the analysis of the old construction, and the new solutions, the energy simulation of the buildings started. These simulations granted us enough data and information to compare the energy budget of the old building, with the energy budget that was simulated with the new solutions implemented on the buildings. The results show a significant reduction in energy consumption and release of CO<sub>2</sub>.

## Sammendrag

På bakgrunn av nasjonale og internasjonale bærekrafts mål stilles det stadig strengere krav til bygningers energiforbruk og utslipp av klimagasser. Det meste av Norges bygningsmasse i 2050 eksisterer allerede i dag. En høyere renoveringstakt og økt kunnskap om løsninger, kan bidra til å senke energiforbruket, og er derfor et viktig bidrag for å nå målet om å bli et lav utslippssamfunn. Studier viser at renovering ofte er bærekraftig i seg selv da den miljømessige belastningen med å rive og bygge nytt er stort. SINTEF konkluderer på bakgrunn av livsløpsevurderinger, at renovering og gjenbruk av materialer ofte et bedre alternativ. Forskningscenteret for nullutslippbygninger i smarte byer «*FME ZEN*» er en av aktørene som jobber med å utvikle løsninger for fremtidens bygninger og nabolag som kan bidra til å realisere nullutslippssamfunnet. Noen av ZEN konseptene og innovasjonene er derfor en del av denne oppgaven. I denne oppgaven er det gjennomført en casestudie av høyblokkene, som er en del av bygningskomplekset *Sentralbyggene* på NTNU Gløshaugen i Trondheim. Målet med oppgaven er å kartlegge utfordringer og muligheter med bygget, og deretter legge frem forslag til tiltak som kan gjennomføres. Oppgaven begrenses til å se på hvilke tiltak som er mulig og hvilken effekt det har på byggets energiforbruk og CO<sub>2</sub>-utslipp. Kostnader og utslipp knyttet til renovering er ikke vurdert. Først legges det frem relevant teori om bærekraft, renovering og energiforbruk. Deretter er det med bakgrunn i gammelt prosjekteringsmaterieell, blitt gjennomført en analyse og en energisimulering som viser dagens energiforbruk, og utslipp ved drift av bygget. Resultatene fra simuleringen sammenlignes med reelle tall for byggets energiforbruk. Til slutt legges det frem to ulike konsepter for renovering av høyblokkene, der effekten av tiltakene er målt med gjennomføring av nye energisimuleringer. Konsept 1 er en energiambisiøs renovering med passivhuskomponenter, og benytter et *Plug-and-play*-fasadesystem. Tiltaket er preget av store isolasjonstykkelser og de tekniske anleggene byttes i stor grad ut med nye. Deler av fasadene kles inn med bygningsintegreerte solceller og det installeres et system basert på *Li-ione batterier* for lagring av overskuddsstrøm. Resultatene viser en drastisk nedgang i både energiforbruk og CO<sub>2</sub>-utslipp tilknyttet drift. Konsept 2 er et renoveringstiltak som sikter seg mot å rehabilitere eksisterende betong, tilfredsstille kravene i TEK17, og gi bygget et nytt arkitektonisk uttrykk. I konseptet benyttes det TES-elementer som legger opp til en effektiv drift på byggeplass og sørger for å få lukket bygget hurtig. Større deler av det tekniske anlegget beholdes og ventilasjonskanaler gjenbrukes.

## Innhold

Abstract.....	i
Sammendrag.....	ii
Figurer.....	iii
Tabeller.....	iv
Definisjoner.....	v
Forord.....	vi
1. Innledning.....	14
1.1 Formål.....	15
1.2 Avgrensing.....	16
2 Teori.....	17
2.1 Bærekraftig utvikling.....	17
2.1.1 Generelt.....	17
2.1.2 Bærekraft.....	17
2.1.3 EUs taksonomi.....	17
2.1.4 Rehabilitering er bærekraftig.....	18
2.2. Rammebetingelser.....	19
2.2.1 Generelt.....	19
2.2.2 Plan og bygningsloven.....	19
2.2.3 TEK17.....	19
2.2.4 SAK10.....	21
2.2.5 Rehabilitering med passivhuskomponenter.....	21
2.3 Energi og byggeteknisk.....	22
2.3.1 Generelt.....	22
2.3.2 Klima.....	22
2.3.3 Regn og vind.....	22
2.3.4 Sol og lys.....	23
2.3.5 Bygningsskall.....	23
2.3.6 U-verdi.....	24
2.3.7 Kuldebro.....	25
2.4 FME ZEN.....	26
2.4.1 Introduksjon.....	26
2.4.2 Ambisjonsnivåer.....	27
2.4.3 Energiproduksjon.....	30

2.4.4 Sammenheng mellom energiforbruk og klimagassutslipp .....	31
2.5 Energibesparende tiltak .....	32
2.5.1 Generelt .....	32
2.5.2 Etterisolering av vegger .....	32
2.5.3 Prefabrikkerte fasadeelementer .....	33
2.5.4 Plug and play .....	34
2.5.5 Montering av elementer i betongkonstruksjoner .....	35
2.5.6 Bytte vinduer .....	37
2.5.7 Solskjerming .....	37
2.5.8 Solceller .....	38
2.5.9 Smarte fasader .....	39
2.5.10 Tekniske systemer .....	40
3. Metode .....	41
3.1 Generelt .....	41
3.1.1 Kvalitative og kvantitative metoder .....	41
3.1.2 Validitet og reliabilitet .....	42
3.1.3 Induktiv og deduktiv forskning .....	42
3.1.4 Valg av metode og forskning .....	42
3.2 Datainnsamling .....	43
3.2.1 Litteratur .....	43
3.3 Casestudie .....	43
3.3.1 Dokumentasjonsanalyse .....	44
3.3.2 Simien .....	44
4. Analyse .....	45
4.1 Beskrivelse .....	45
4.1.1 Byggeteknisk tilstand .....	46
4.1.2 Byggeskikk på 60-tallet .....	46
4.1.3 Fundament .....	47
4.1.4 Bæresystem .....	47
4.1.5 Yttervegger .....	48
4.1.6 Takkonstruksjon .....	49
4.1.7 Vinduer .....	49
4.1.8 Tekniske systemer .....	49
4.2 Simulering .....	50
4.2.1 Intro .....	50

4.2.2 Gjennomføring.....	50
4.2.4 Resultater.....	51
5. Resultater.....	54
5.1 introduksjon.....	54
5.2 Felles tiltak for begge konsept.....	54
5.2.1 Rehabilitering av betong.....	54
5.2.2 Takkonstruksjon.....	55
5.2.3 Kjeller.....	55
5.2.4 Planløsning.....	56
5.3 Konsept 1.....	56
5.2.1 Gavlvegger.....	56
5.2.2 Langsider.....	58
5.2.3 Vinduer.....	59
5.2.4 Tekniske systemer.....	60
5.2.5 Solceller.....	61
5.2.6 Energilagring.....	62
5.2.7 Visualisering.....	63
5.2.6 Resultater Konsept 1.....	64
5.3 Konsept.....	66
5.3.1 Gavlvegger.....	66
5.3.2 Langsider.....	68
5.3.3 Vinduer.....	71
5.3.4 Tekniske systemer.....	71
5.3.6 Visualisering.....	74
5.3.5 Resultater Konsept 2.....	75
6.4.1 Li-ionebatterier.....	82
6.4.2 Gjenbruk av Li-ionebatteri.....	83
7 Drøfting.....	84
7.1 Metode.....	84
7.1.1 Planlegging.....	84
7.1.2 Datainnsamling.....	85
7.2 Drøfting av resultater.....	86
7.3 Konklusjon.....	87
Referanser.....	89



## *Vedlegg*

*Vedlegg 1: U-verdier eksisterende bygning*

*Vedlegg 2: U-verdi konsept 1*

*Vedlegg 3: U-verdi konsept 2*

*Vedlegg 4: Høyblokk konsept 1, Simien fil*

*Vedlegg 5: Høyblokk konsept 2, Simien fil*

*Vedlegg 6: Simulering Sentralbygg, Simien fil*

*Vedlegg 7: Kilder varmekonduktivitet*

*Vedlegg 8: Fagartikkel*

*Vedlegg 9: Plakat*

*Vedlegg 10: Avtale*

## *Figurer:*

*Figur 1: Energirammer for ulike bygningskategorier*

*Figur 2: Livsløpsfasen som presentert av FME ZEN*

*Figur 3: Systemgrensene ved energiproduksjon*

*Figur 4: Vanlige CO<sub>2</sub>-faktorer benyttet av FME ZEN oppgitt i gram*

*Figure 5: Kostnader for isolering, og energikostnader etter isolering.*

*Figur 6: Montering av «play and play» løsning*

*Figur 7: Prinsipp for montering av TES elementer, og lastfordeling*

*Figur 8: Viser montaseløsning for «Plug and play» løsning*

*Figur 9: Montaseløsning for «Plug and play»*

*Figur 10: Forskjellen på kvantitative og kvalitative metoder.*

*Figur 11: Validitet og reliabilitet – «Datakvalitet»*

*Figur 12: Sentralbygg 1 og 2 oversikt.*

*Figur 13: Tegning av eksisterende konstruksjon på Sentralbygg 1 og 2.*

*Figur 14: Termografi av Sentralbyggene*

*Figur 15: Evaluering og resultater simulert opp mot minstekravene i TEK17.*

*Figur 16: Energibudsjett og levert energi til bygningen.*

*Figur 17: Årlig utslipp av CO<sub>2</sub> fra Sentralbygg 1 og 2*

*Figur 18: Oppbygging av Plug and play-vegg*

*Figur 19: Oppbygging av vegg og isolering av betongsøyle*

*Figur 20: Visualisering av Sør og Øst fasaden til Sentralbygg 1 og 2.*

*Figur 21: Visualisering av Øst og Nord fasaden til Sentralbygg 1 og 2.*

*Figur 22: Resultater fra simulering.*

*Figur 23: Minstekrav og energiytelse fra simulering.*

*Figur 24: Energibudsjett og levert energi til bygningen.*

*Figur 25: Festemetode for stendere.*

*Figur 26: Prinsipp for etterisolering av betongvegger.*

*Figur 27: Prefabrikkerte elementer*

*Figur 28: Detalj av isolasjon- og fasadeløsning på 1963 bygget.*

*Figur 29: Flytskjema som viser trinnvis fremgangsmåte for vurdering av gjenbruk*

*Figur 30: Visualisering av Sentralbygg 1 og 2*

*Figur 31: Visualisering av Sentralbygg 1 og 2*

*Figur 32: Resultater fra simulering i Simien*

*Figur 33: Energibudsjett og levert energi til bygningen med tiltak.*

*Figur 34: Prinsipiell oppbygning av todelt vegg med stender i heltre*

*Figur 35: Vakuumisolasjonspanel.*

*Figur 36: Smarte norske vinduer*

*Figur 37: Krevende rehabilitering av Tecon bygget*

*Figur 38: 200kWh PCM-varmelager installert i ZEB-laboratoriet (venstre); Pute-plater inn i varmelageret, uten PCM (høyre).*

*Figur 39: Konseptskisse for ulike teknologi for energiproduksjon og lagringsmuligheter.*

## **Tabeller:**

*Tabell 1: Trinnvis beskrivelse for å oppnå balanse i et ZEB-O-EQ eller ZEB-O prosjekt*

*Tabell 2: Trinnvis beskrivelse for å oppnå balanse i ZEB-OM eller høyere.*

*Tabell 3: Tabell over k-verdier i TEK49*

*Tabell 4: reduksjon i energiforbruk og CO2 utslipp*

## Forord

Denne bacheloroppgaven ble beskrevet våren 2022 av tre medstudenter fra fakultetet for ingeniørvitenskap ved NTNU i Trondheim. Alle gruppemedlemmene går bachelor innenfor bygg- og miljøteknikk, med fordypning innenfor husbyggingsteknikk. Oppgaven er til sammen 20 studiepoeng, og markerer også avslutningen på en treårig studie på NTNU i Trondheim.

Temaet til oppgaven handler om bærekraftig renovering, og hvordan man kan renovere eksisterende bygninger med dagens tekniske krav til bygninger, for å redusere energiforbruk og klimagassutslipp. Det ble tidlig uttrykt et ønske om å skrive en oppgave som omhandlet bærekraftig utvikling innenfor byggebransjen, siden dette er et meget relevant tema i dag. Dette er et tema som interesserer gruppen mye, og det har vært en tøff, men lærerik og spennende opplevelse.

Opgaven ble utsøkt av NTNU, og skal legge grunnlag for videre forskning om bærekraftige løsninger for renovering av Sentralbyggene. Det har blitt gjennomført en omfattende analyse av tegninger og informasjon om Sentralbyggene, men det var mye informasjon som fortsatt mangler, og er vanskelig å innhente, siden eiendomsavdelingen til NTNU ikke ønsket å bidra med å dele informasjon som de hadde.

Selv om det var vanskelig å finne informasjon og data, var det fortsatt en prosess som blir relevant til arbeidslivet senere. Det er spennende at NTNU tar engasjement til å forske på bærekraftige løsninger, og hvordan man kan redusere energibehovet til eldre bygninger. Dette er et tema som er utrolig viktig for å redusere klimagassutslippene, og for å vekke oppmerksomhet rundt CO<sub>2</sub> utslipp, og hvordan man kan jobbe for å redusere dette.

Selv om mesteparten av arbeidet har blitt gjort av gruppemedlemmene, kunne ikke oppgaven blitt gjennomført uten hjelp fra vår veileder Bozena Hrynyszyn, som bisto med hjelp og mange gode forslag. Det samme gjelder for med-veileder David Bjelland, som bidro med mange spennende løsninger, og som hjalp til stort ved innhenting av data, og informasjon om byggene. Det vil også utrettes en stor takk til Thomas Sjøveian, som har vært en utrolig en viktig ressurs i programmerings- og simuleringsfasen, og som bidro stort til kvalitetssikring av energisimuleringene. Videre takker vi Erik Backe Hansen, som satt oss i kontakt med Thomas, og som kunne hjelpe til med å kvalitetssikre arbeidet vårt.

## Definisjoner

*TEK 17 – Byggeteknisk forskrift fra 2017*

*TEK 49 – Byggeteknisk forskrift fra 1949*

*Passivhus – Hus eller bygning med lavt energiforbruk*

*NS – Norsk standard*

*Simien – Simuleringsprogram*

*Archicad – Teknisk tegneprogram for bygning og arkitektur*

*BTA – Bruttoareal, areal inkludert diameter på veggene [m<sup>2</sup>]*

*BRA – Bruksareal, areal fratrukket diameter på veggene, oppvarmet areal [m<sup>2</sup>]*

*ZEB – Zero emission buildings*

*BREEAM-NOR – Miljøsertifiseringsverktøy for bygninger*

*LCA – Life cycle assessment*

*PBL – Plan og bygningsloven*

*Lambdaverdi – Et materiales evne til å lede varme*

*BIPV – Building-integrated photovoltaics*

*BAPV – Building applied photovoltaics*

*FDV – Forvaltning, drift og vedlikehold*

*TES – Timber element system*

*PnP – Plug and play*

*VAV – Variable air volume*

*SFP-faktor – Specific fan power*

## 1. Innledning

På bakgrunn av Parisavtalen og FNs bærekrafts mål har det de siste årene blitt økt fokus på bærekraft i byggebransjen. Forskningsrapporter utviklet av SINTEF, viser at renovering av eksisterende bygninger i mange tilfeller kan ha store miljøgevinster, sammenlignet med å bygge nytt. Det meste av den bygningsmasse som Norge skal ha i 2050, eksisterer allerede, og renovering kan dermed være et avgjørende bidrag til en mer bærekraftig fremtid.

Det skal i denne oppgaven gjennomføres en casestudie som skal se på hvordan eldre bygninger sitt energiforbruk, og CO<sub>2</sub>-utslipp kan reduseres. Med dette som bakgrunn, skal det legges frem innovative og moderne løsninger til å renovere eldre bygg, og legges frem hvordan nye tekniske løsninger kan brukes i et slikt bygg.

Casestudiet ser på høyblokkene som er en del av bygningskomplekset *Sentralbyggene* på NTNU Gløshaugen i Trondheim. Byggene ble oppført på 60-tallet og har nå et behov for renovering. For å kartlegge byggets energiforbruk skal gjennomføres beregninger i simuleringens programmet *Simien*, og sammenligne med energibudsjettet som har blitt gitt ut for bygget. Det skal på bakgrunn av dette forslås renoveringstiltak som vil energi-optimalisere bygget. Tiltakene deles inn i to konsepter som til slutt skal vurderes gjennom nye simuleringer

Ved å gjennomføre simuleringer med data og informasjon om byggene, kan man senere sammenligne dette med de løsningene som blir foreslått. Dette gir en oversikt over hvilke tiltak som hjelper til å med å redusere energibruken, og det vil også illustrere om det er realistisk å renovere eldre bygninger med kravene som stilles i TEK17, og NS3700:2013.

## 1.1 Formål

Formålet med denne oppgaven er å innhente informasjon om *høyblokkene på Sentralbygg 1 og 2*, og kartlegge utfordringer med dagens tilstand. Det skal på bakgrunn av denne informasjonen legges frem løsninger til hvordan en renovering av høyblokkene kan gjøre byggene mer energieffektive, og redusere oppvarmingsbehovet. For å kunne finne løsninger har det blitt utarbeidet en tredelt problemstilling;

1. *På bakgrunn av gamle tegninger av sentralbyggene, gjennomføre simuleringer gjort opp mot gjeldende byggeteknisk forskrift, og foreslå bærekraftige løsninger for renovering av høyblokkene på NTNU Gløshaugen.*
2. *Foreslå løsninger til tekniske systemer som oppvarming og ventilasjon, og løsninger til fornybar energiproduksjon.*
3. Vurdere på bakgrunn av dette, om det er mulig å renovere bygningen slik at det blir et nullutslippsbygg (ZEB – O).

Det skal gjøres en analyse av informasjon som er tilgjengelig om byggene, og med denne analysen, skal spørsmålene i problemstillingen svares på. Det vil til slutt gjøres en analyse av resultatene, og forsøke å gi et svar på om det er mulig å renovere høyblokkene slik at de tilfredsstiller kravene i TEK17 og NS3700:2013. Disse resultatene vil da legge grunnlaget for å besvare om det er mulig at bygget kan defineres som et nullutslippsbygg.

## 1.2 Avgrensing

Totalt utgjør sentralbyggene på Gløshaugen et bruttoareal på 30 792,78 m<sup>2</sup>. For at oppgaven ikke skal bli for omfattende begrenses løsningene til å kun omhandle høyblokkene, og ikke de tilknyttede lavblokkene som til sammen utgjør Sentralbyggene. Siden høyblokkene er kontorbygg, mens lavblokkene benyttes både som undervisningslokaler og kontorer ville dette komplisert energisimuleringene ved evaluering mot forskriftskrav.

Ved å gjøre denne avgrensningen kan oppgaven gå mer i dybden for å undersøke tilstand, oppbygging og tekniske systemer for å så legge frem tiltak. Det er verdt å nevne at begge høyblokkene og alle tre lavblokkene har lignende bygningskropp og tekniske systemer. Det er derfor rimelig å anta at lignende tiltak kan gjennomføres på hele bygget.

Hovedfokuset i oppgaven er på å senke energiforbruket og CO<sub>2</sub> utslipp ved drift av bygget. Utslipp og kostnader knyttet til renoveringsprosessen, er derfor ikke vurdert. Sosiale bærekrafts aspekter som arealeffektivitet, planløsning og funksjonalitet blir heller ikke tatt hensyn til. Avgrensingen for energieffektivitet medfører også at ikke alle kriteriene innenfor det miljømessige bærekraftaspektet blir inkludert. Dette er blant annet lang materialelevetid, miljøvennlig materiale og avfallshåndtering.



## 2 Teori

### 2.1 Bærekraftig utvikling

#### 2.1.1 Generelt

En av de mest kjente definisjonene på bærekraftig utvikling er «En utvikling som imøtekommer dagens behov uten å ødelegge mulighetene for at kommende generasjoner skal få dekket sine behov» [2]. Jorda har et begrenset antall ressurser og for å lykkes med bærekraftig utvikling må vi balansere bruken av disse. Definisjonen omhandler både klima og miljø, økonomi og sosiale forhold. Dette er tre områder verden må jobbe med og det er gjerne sammenhengen av disse som avgjør om noe er bærekraftig. I denne oppgaven vil begrepet *bærekraft* i hovedsak være knyttet til klima og miljø, og hvordan lavere energiforbruk vil føre til lavere utslipp av klimagasser i bygninger.

#### 2.1.2 Bærekraft

Byggebransjen står i dag for store deler av verdens utslipp CO<sub>2</sub> utslipp og energi- og ressursforbruk [3], og en reduksjon innenfor dette område vil derfor være helt avgjørende for å nå nasjonale og internasjonale bærekrafts mål. De siste årene har det blitt utviklet standarder, sertifiseringer og andre verktøy som gjør det enklere å vurdere bærekraften i byggeprosjekter. Eksempler på dette er sertifiseringer som *BREEAM-NOR*, *svanemerket* og *LEAD* eller ambisjonsnivåene utviklet av *FME ZEN* [4]. Dette er verktøy som i større grad enn tidligere ser på helheten i byggeprosjekter, og alt fra produktvalg til avfallshåndtering. Gjennom innovasjon og effektivisering kan man gjøre det enklere, og økonomisk fordelaktig for aktørene å velge bærekraftige løsninger. I tillegg til miljøaspektet kan kvalitetsbygninger bidra til økt livskvalitet for brukerne i form av sanseintrykk, lysforhold, luftkvalitet og støybelastning. Gode løsninger og effektiv arealutnyttelse vil også gi lave drifts- og vedlikeholdskostnader og sikre eierne avkastning på sin investering i fremtidens marked. Bærekraft i byggebransjen omhandler både det miljømessige, sosiale og økonomiske.

#### 2.1.3 EUs taksonomi

I 2021 lanserte EU et eget klassifiseringssystem, som også er kalt taksonomi som definerer hvilke aktiviteter som er bærekraftige for investeringsformål. Dette er for første gang et felles system som avgjør om noe er bærekraftig eller ikke, og som skal gjøre det enklere for samfunnet å vende kapitalen mot bærekraftige aktiviteter. Banker, investorer og forsikringsselskaper kan nå benytte seg av systemet for å bestemme hvem de skal låne ut

penger til, investere i eller forsikre. Taksonomien er en sentral del av EUs handlingsplan og skal sikre Europas økonomiske konkurransekraft og bidra mot et klimanøytralt samfunn i 2050. Selv om det ved første øyekast oppleves som det er kun de største selskapene som omfavnes av det nye klassifiseringssystemet, vil det være rimelig å argumentere for at det vil skape en diffusjon som påvirker mindre selskaper. Norge er ikke en del av EU så taksonomien presenteres gjennom EØS-avtalen og ivaretas gjennom lovbestemmelser [5].

Det vil være rimelig å argumentere for at taksonomien er en sentral årsaksfaktor for at fremtiden vil bære frem en mer bærekraftig bygg og anleggsbransje. Med større krav fra myndigheter, og markedet kan investeringer i lite bærekraftige bygninger eller såkalte *grå bygg* anses som risikable og dermed mindre attraktive. I første omgang gis det bedre lånebetingelser for grønne bygninger, men i fremtiden kan dette bli et krav for å få finansierings- og forsikringskapital. [6]

#### 2.1.4 Rehabilitering er bærekraftig

Ifølge en rapport utviklet av SINTEF vil det å rehabilitere en eksisterende bygning gi opptil halvparten av utslippene sammenlignet med det å rive og bygge nytt. Rapporten tar utgangspunkt i 12 norske og 11 internasjonale casestudier, der det benyttes livssyklusanalyser for å vurdere klimautslippene.

Den viser at nye bygninger generelt har lavere energiforbruk enn eksisterende bygninger, men at belastningen av å bygge nytt er så stor at det vil ta flere tiår før det lønner seg miljømessig. Med tanke på målet om et lavutslippssamfunn i 2050 vil det derfor være hensiktsmessig å rehabilitere og oppgradere gamle bygninger fremfor å bygge nye. I dag er rehabiliteringstakten lav, og EU-kommisjonen anslår at 75% av dagens bygningsmasse er ineffektiv. Rehabilitering av bygninger kan gi energibesparelser på 5-6% og et tilsvarende kutt i utslipp av klimagasser. [7]

Dagens bygningsmasse har ulikt potensial avhengig av alder, materialbruk, konstruksjon og vernenivå. Det er derfor viktig å aktivt kartlegge hvilke muligheter som finnes og tilpasse energieffektiviseringstiltak for hver enkelt bygning. [7]

## 2.2. Rammebetingelser

### 2.2.1 Generelt

Ved renovering av en eksisterende bygninger er de fysiske rammene allerede satt. Det er derfor viktig å kartlegge teknisk tilstand, bygningshistorie og eventuell vernestatus før man begynner å planlegge tiltak. Ved en teknisk tilstandsanalyse bør man benytte *NS 3424* og registrere bærende konstruksjoner, bygningsdeler, materialer, dimensjoner og overflater, samt avdekke mangler i forhold til lover og forskrifter og eventuelle skader eller slitasje på bygningsdeler. En slik registrering bør gjennomføres av en tverrfaglig sammensatt gruppe som sammen har den nødvendige kompetansen som trengs. Denne tekniske tilstanden vil sammen med bygningshistorikken og eventuell vernestatus sette føringer for hva som er nødvendig, og mulig å gjennomføre av tiltak. Ved større tiltak er det derfor viktig å ha tilgang til gode tegninger, og man bør også utføre en systematisk kontroll av de gamle tegningene tidlig, for å avgjøre om de er gode nok til å benyttes som prosjekteringsgrunnlag. Det oppfordres til å digitalisere gamle tegninger henholdsvis da dette gir bedre struktur og lettere tilgjengelig informasjon [8]

### 2.2.2 Plan og bygningsloven

Plan og bygningsloven (PBL) bestemmer hvordan landets arealer skal brukes og reguleres, i tillegg stiller den noen krav til byggverk gjennom byggetekniske forskrifter. Loven gjelder alle tiltak tilknyttet fast eiendom. Med tiltak menes blant annet oppføring, riving, endring, fasadeendringer, endret bruk eller andre tiltak som er knyttet til bygninger [9]. Tiltak som faller under loven er også virksomhet eller endring av arealbruk som er i strid med arealformål, planbestemmelser eller hensynssoner. Et tiltak kan kun iverksettes dersom det ikke er i strid med lovens bestemmelser, eller tilhørende forskrifter, planer eller lignende [9]

### 2.2.3 TEK17

Kapittel 31 av plan og bygningsloven omhandler krav til eksisterende byggverk. Paragraf 31-2 sier «*tiltak på eksisterende byggverk skal prosjekteres og utføres i samsvar med bestemmelser gitt i eller i samsvar med loven*» [10]. Dette betyr i realiteten at ved renovering av bygninger, gjelder dagens byggetekniske forskrift. Byggeteknisk forskrift, også kalt *TEK17* fungerer som en veileder, og utfyller plan og bygningsloven. *TEK17* stiller en rekke minimumskrav til bygningers egenskaper, både i form av funksjons og ytelseskrav [10].

PBL sier også at kommunen kan sette vilkår for å tillate tiltak, og at også andre deler av bygget enn det tiltaket gjelder for settes i forsvarlig stand i samsvar med relevante tekniske krav. I noen tilfeller vil det ikke være hensiktsmessig eller økonomisk forsvarlig å tilpasse en bygning etter dagens tekniske krav, men det kan likevel være nødvendig med rehabilitering. I slike tilfeller kan kommunen gi tillatelse til å gjennomføre tiltaket. Dette betyr at kravene i byggeteknisk forskrift er gjeldende ved renovering så lenge de er relevante.

Dagens bygninger skal prosjekteres og bygges på en slik måte at de tilrettelegges for et forsvarlig energiforbruk. I byggeteknisk forskrift stilles det krav om bygningers energiforbruk etter bygningskategori. Dette kravet kalles en *energiramme* og er gitt i benevnningen kWh/m<sup>2</sup>. Det er mulig å øke energirammen med opptil 10 kWh/m<sup>2</sup> hvis det produseres minst 20 kWh fornybar elektrisitet per m<sup>2</sup> oppvarmet BRA på tomten. I tillegg til å nå energirammen stiller *TEK17* minstekrav til bygningskroppens ytelse [11]. Man kan gjennom kontrollberegning dokumentere at kravet til energieffektivitet er oppfylt. Dette gjøres i henhold til *NS 3031* der det benyttes standard verdier for driftsbetingelser og klima. Kontrollberegningen viser altså byggets teoretiske energiforbruk, og ikke nødvendigvis det faktiske forventede energiforbruket. For yrkesbygninger skal det ifølge *TEK17* også gjøres en kontrollberegning med mest realistiske verdier. Denne beregningen kommer i tillegg og gir et mer realistisk energiforbruk [12].

Bygningskategori	Totalt netto energibehov kWh/m <sup>2</sup>
Småhus <sup>2)</sup> , fritidsbolig over 150 m <sup>2</sup> oppvarmet BRA	100 + 1 600 / oppvarmet BRA
Boligblokk	95
Barnehage	135
Kontorbygning	115
Skolebygning	110
Universitet/høgskole	125
Sykehus	225 (265) <sup>3)</sup>
Sykehjem	195 (230) <sup>3)</sup>
Hotellbygning	170
Idrettsbygning	145
Forretningsbygning	180
Kulturbygning	130
Lett industri / verksteder	140 (160) <sup>3)</sup>

Figur 1: Energirammene for ulike bygningskategorier. Hentet fra [8]

#### 2.2.4 SAK10

Ved renovering av bygninger vil det ofte gjennomføres større tiltak som er søknadspliktige og ved slike saker gjelder byggesaksforskriften *SAK10*. På samme måte som i *TEK17*, fungerer *SAK10* som en veileder og utfyller plan og bygningslovens regler om byggesaksbehandling, kvalitetssikring og kontroll. Den omfatter også tilsyn, godkjenning av foretak for ansvarsrett, og reaksjoner der reglene ikke blir fulgt. Ved søknadspliktige tiltak må tiltakshaver søke og få tillatelse av lokale bygningsmyndigheter før tiltaket settes i verk [13].

#### 2.2.5 Rehabilitering med passivhuskomponenter

I ambisiøse byggeprosjekter kan det være ønskelig å gjennomføre tiltak som oppfyller strengere krav enn *TEK17* og på denne måten oppnå passivhusstandard. Et *passivhus* er et hus som har vesentlig lavere energiforbruk sammenlignet med vanlige hus. Dette oppnås ved blant annet å senke varmetapet i bygningskroppen og gjennom tekniske installasjoner som krever mindre energi. For å oppnå passivhusstandard, kan man følge NS 3700 for boliger eller NS 3701 for yrkesbygninger. Disse standardene stiller kriterier og minstekrav til ytelse og energiforbruk, samt krav om dokumentasjon.

Disse kriteriene omfatter varmetapstall, oppvarmingsbehov, kjøle behov, energibehov for belysning (kun for yrkesbygninger) og energiforsyning. Det er mer ressurskrevende å oppføre et nybygg etter kravene som er beskrevet i passivhusstandard, men det kan ha flere fordeler. Passivhus vil bruke mindre energi til oppvarming av bygget, og det kan også forlenge levetiden på bygningsdeler, slik at man reduserer behovet for utskiftninger eller rehabilitering, og gjør dermed at man får besparelser i driftskostnader [14].

Det kan være utfordrende å oppnå passivhusstandard ved rehabilitering av bygninger. Den eksisterende bygningsmassen setter begrensninger for hva som kan utføres innenfor rimelige budsjetter. Likevel kan passivhuskonseptet benyttes i rehabiliteringsprosjekter, og vil da kalles en *passivhusrehabilitering* eller en *rehabilitering med passivhuskomponenter*. Dette er en form for ambisiøs rehabilitering som ikke når passivhusstandard på alle kriterier, eller standarden sine minstekrav, men som kan gi bygget betraktelig mindre energiforbruk enn vanlige bygninger [14].

## 2.3 Energi og byggeteknisk

### 2.3.1 Generelt

Energiforbruk er nært knyttet til det byggetekniske ved bygninger og hvordan bygningskroppen er utformet. Bygningskroppen er skille mellom innsiden og utsiden av bygningen, og det er derfor viktig at den har god isoleringsevne og er motstandsdyktig mot vær og vind. Det skal i dette delkapittelet introduseres teori som er knyttet til det byggetekniske ved bygningskroppen, og det skal argumenteres for hva som gjør dette relevant for å besvare problemstillingen.

### 2.3.2 Klima

For å videre kunne definere bygningsskallet og de byggetekniske aspektene rundt det, er det viktig å definere klima og drøfte norsk klima. Klima kan defineres som det gjennomsnittlige været på et sted over tid [15]. Dette har stor betydning for utformingen av en bygning og hvilke krav som stilles til eksempelvis fasaden [16]. Eventuelle skader på fasaden vil dermed også påvirke inneklimate til et bygg, og det blir derfor viktig å vite hva slags type klima man skal prosjektere bygget etter.

Klimatet i Norge er dominert av mye regn, vind, kulde og snø, og primærårsaken til skader på bygg i Norge er ofte nedbør [15]. For å kunne tilpasse seg klimatet, er det viktig at man undersøker hva slags type klimapåkjenninger som bygget kan bli utsatt for i det området som bygget er plassert.

### 2.3.3 Regn og vind

Regn og nedbør er altså kilden til mye av bygningsskadene på bygg, og generelt sett er fuktskader skylden for 76% av alle skader på bygg [15]. Det er i mange tilfeller kombinasjonen av regn og vind, *slagregn*, som er den største årsaken, siden vannet trenger inn bak panelet, og fasadekledningen og fører til fukt i isolasjon og trevirke.

Problemene oppstår i mange tilfeller ved lekkasje rundt vinduer, og andre utsatte bygningsdeler. Dette kan forårsakes av mangel på lufting, og ventilering i tak og vegger. Siden fuktskader utgjør en så stor andel av bygg skadene, er det derfor viktig at prosjekteringen av bygget blir gjort tidlig i byggeprosessen, og at gjennomføringen er gjort på riktig måte.

#### 2.3.4 Sol og lys

Sol og sollys kan påvirke energiforbruket, termisk komfort og det estetiske ved en bygning. Når solstråler treffer et vindusglass, tilføres bygget varme. I Norge kan dette være positivt for energiforbruket store deler av året, men på sommeren kan dette føre til overoppheting eller høyt energiforbruk knyttet til nedkjøling. Sollys kan også føre til blinding og dårlig visuell komfort. Det kan dermed være ønskelig å installere solavskjerming for å dempe nedkjølningsbehovet og gjøre det mulig å begrense hvor mye dagslys som slipper inn [17].

Sollys er viktig for prosjekteringen av et bygg, og er avgjørende for et godt inneklima. Lyset er viktig for brukernes helse, trivsel og ofte den estetiske opplevelsen av rommet. Byggets orientering har mye å si for hvor mye sollys det kan bli eksponert for. Det har også mye å si hva slags omgivelser og naturlig solskjerming som ligger rundt bygget [17].

#### 2.3.5 Bygningsskall

Bygningsskallet, eller klimaskallet er det som skal beskytte det innvendige mot klimapåkjenninger i form av regn, snø eller sol. For å oppnå et bra inneklima i et bygg, er det derfor viktig at bygningsskallet er bygd opp på en slik måte at det tilpasses klimaet på stedet.

Et klimaskall omslutter hele bygningen og består av alle de delene som er påvirket av vær og vind. Dette er blant annet vegger, tak, og gulv. Klimaskallet består ofte av utvendig kledning og taktekking, vindsperre, isolasjon og dampspærre. Der utvendig kledning beskytter konstruksjonen bak mot fukt og regn. Isolasjon er den bygningskomponenten som har god isoleringsevne, og beskytter mot kulde, og dampspærre skal beskytte bygget mot fukt fra innsiden.

For å vurdere hvor god isoleringsevne et bygg har, regner man ut en u-verdi, som tallfester isolasjonsverdien til en bygningsdel (*der lavere verdi tilsvarer god isolasjonsevne og høyere verdi det motsatte*). Utrekningen av en u-verdi presenteres i neste delkapittel. Bygningsskallet er dermed særdeles viktig for at et bygg skal ha godt inneklima, og være energieffektivt. Det vil dermed bli lagt frem forslag på hvordan bygningsskallet kan bli utformet, dette vil bli beskrevet videre i et senere kapittel.

### 2.3.6 U-verdi

U-verdien angir hvor mye varme som strømmer igjennom et areal på  $1\text{m}^2$  per tidsenhet og grad per temperaturforskjell mellom omgivelsene på hver side av bygningsdelen [18]. Det er satt standardiserte verdier i byggeteknisk forskrift for å gi et veiledende tall på hva som er godkjent å bygge etter. En u-verdi-beregning blir dermed gjort for å gi et tall på hvor god isoleringsevne et bygg har, og er en vanlig del av en prosjektering.

Varmemotstanden  $R$  er et tall på hvor godt materialsjiktet isolerer mot varmegjennomgang og er avhengig av tykkelsen på sjiktet og materialets varmekonduktivitet. Varmekonduktivitet  $\lambda_d$  er her et mål på hvor godt et material leder varme [18]. Videre blir det gjennomført u-verdi beregninger, som blir brukt i simuleringen av byggene.

Formelen for u-verdi er gitt ved: [18]

$$U = \frac{1}{R_{tot}}, \left[ \frac{W}{(m^2K)} \right]$$

Der:

$R_{tot}$  = total varmemotstand, og er samlet varmemotstand for alle materialer i sjiktet.

$$R_{tot} = R_{si} + R_1 + \dots R_n + R_{se}, \left[ \frac{(m^2K)}{W} \right]$$

Der:

$R_{si}$  = Varmegjennomgang på innvendig side

$R_{se}$  = Varmegjennomgang på utvendig side

$$R = \frac{d}{\lambda_d}, \left[ \frac{(m^2K)}{W} \right]$$

Der:

$d$  = materialets tykkelse [m]

$\lambda_d$  = materialets dimensjonerende varmekonduktivitet



### 2.3.7 Kuldebro

Varmetapet som oppstår igjennom svake punkter i en klimaskjerm, kan føre til at man opplever kalde områder i bygningen og større varmetap. Dette kan føre til et større energibehov og et dårligere inneklima, og det er derfor viktig at man kartlegger og forbedrer svake punkter i klimaskallet. Dette kalles i byggeteknisk sammenheng for kuldebro.

En kuldebro er et område med økt varmetap i tilslutninger mellom to eller flere bygningsdeler [19]. Konsekvensene av en kuldebro kan være større energibehov på grunn av varmetap, kondensering og generelt sett dårligere inneklima og komfort. Det kan oppstå flere type kuldebroer i en bygning og man skiller mellom lineær, geometrisk, og punktkuldebro. En lineær kuldebro kan oppstå der to bygningsdeler møtes. En geometrisk kuldebro kan komme som en konsekvens av forskjellig tykkelse i konstruksjonen, mens en punktkuldebro kan oppstå i gjennomføringer hvor et materiale med dårligere isoleringsevne bryter gjennom isoleringssjiktet.

Kuldebroer kan dokumenteres ved å gjøre en termografering, der man bruker et kamera med infrarød stråling til å finne ut hvordan det påvirker overflatetemperaturen, og for å se hvor det er lekkasje i bygningsskallet [19]. Ved utregning av kuldebroer er det ofte ønskelig å finne den normaliserte kuldebro verdien, som er det samlede varmetapet gjennom alle kuldebroene, og deretter delt på bygningens oppvarmede areal.

Formelen for normalisert kuldebro er gitt ved: [19]

$$\psi = \frac{\sum_k \psi_k \cdot l_k + \sum_j X_j}{A_{fl}}, \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

Der:

$\psi$  = Normalisert kuldebro verdi

$\psi_k$  = Lineær kuldebro verdi

$l_k$  = Er lengden av kuldebro

$X_j$  = Er kuldebro verdi til punktkuldebro

$A_{fl}$  = Er samlet oppvarmet areal BRA [ $m^2$ ]

## 2.4 FME ZEN

### 2.4.1 Introduksjon

Forskningscenteret for nullutslippsområder i smarte byer *FME ZEN* er etablert av Norges forskningsråd og jobber for å utvikle løsninger som kan bidra til at nullutslippssamfunnet realiseres. NTNU er vertskap og samarbeider med SINTEF, og flere partnere i næringslivet om å drive med forsknings-, utviklings og innovasjonsaktiviteter.

*FME ZEN* har flere pilotprosjekter som er viktige arenaer for innovasjon og testing. Disse pilotprosjektene har ulik karakter og størrelse og finnes over hele landet. *FME ZEN* har også utviklet en definisjon på et *nullutslippsnabolag* som er slik: «*En samling av bygninger med tilhørende infrastruktur, lokalisert innenfor et avgrenset geografisk område, som har som målsetning å redusere sine direkte og indirekte utslipp av klimagasser mot netto null*» [4]

For å nå dette målet jobber senteret på følgende arbeidsområder:

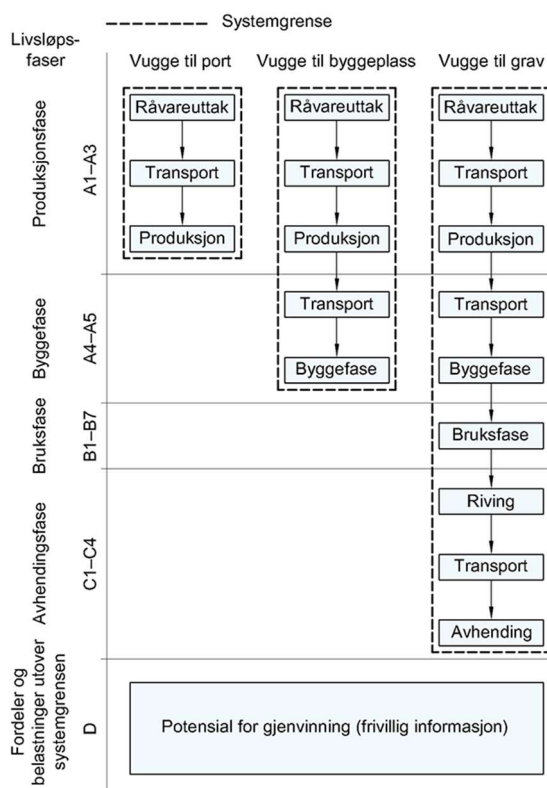
- *Utvikle verktøy for å prosjektere og planlegge nullutslippsområder*
- *Skape nye forretningsmodeller, roller og tjenester som bidrar til en fleksibel overgang til nullutslippssamfunnet*
- *Utvikle kostnadseffektive og ressurseffektive bygninger med miljøvennlige materialer, teknologier og konstruksjonssystemer*
- *Utvikle teknologier og verktøy for å prosjektere og drifte energifleksible områder*
- *Utvikle verktøy for å optimalisere lokale energisystemer og deres interaksjon med overordnede energisystemer*
- *Utvikle ni nullutslippsområder som skal fungere som innovasjonsarena og utprøvningsområde for teknologiene og løsningene som utvikles i senteret*

I slike prosjekter er *livssyklusanalyser* en sentral del av metodikken, og er viktig for å se utslippene gjennom bygningens livsløp. Ved å produsere fornybar energi i nabolaget kompenserer man for utslippene knyttet til byggeprosesser, drift og materialer.

## 2.4.2 Ambisjonsnivåer

*Livsløpsvurderinger (LCA)* benyttes for å beregne klimagassutslippene tilknyttet til en bygning gjennom livsløpet. Bygningens livsløp kan igjen deles inn i faser og moduler som *produksjonsfase, byggefase, bruksfase, avhendingsfasen og potensial for gjenvinning*. I livsløpsvurderinger er det viktig å definere hvilke faser som inngår i beregningene, og dette kalles livsløpsvurderingens systemgrenser. FME ZEN har utviklet egne ambisjonsnivåer som bestemmer hvilke faser og moduler som inngår i beregningene. Eieren av et ZEN prosjekt velger selv systemgrensene og dermed også ambisjonsnivået til prosjekt [4].

I ambisjonsnivåene beregnes balansen mellom produsert fornybar energi og klimagassutslipp tilknyttet de fasene som inngår i beregningene. Figuren under viser faser og moduler inndelt etter *NS-EN 15978*, hvor bokstavene benyttes som en beskrivelse av modulene. Modul D er positive bidrag til regnskapet utenfor systemgrensene og viser til lokal fornybar energiproduksjon som kompenserer utslippene knyttet til fasene. [20]



Figur 2: Livsløpsfaser som presentert av FME ZEN. Hentet fra [20].

FME ZEN har utviklet 6 ZEB-nivåer som sier noe om hvor ambisiøst et prosjekt er og hvor mange av fasene og modulene som tas med i beregningene. Følgende bokstaver benyttes som forkortelser for hva som er inkludert:

- **EQ (Equipment):** Elektrisk utstyr som plugges i stikkontakter, «plug loads»
- **O (Operation):** Energibruk i drift av bygningen, inkluderer elektrisk utstyr som beskrevet for EQ (Equipment)
- **M (Materials):** Produksjon av byggematerialer
- **C (Construction):** Bygging, inkludert transport og installasjon av byggematerialer
- **E (End of Life):** Riving og resirkulering
- **PLET:** Bruk, vedlikehold, reparasjon og rehabilitering

Disse forkortelsene benyttes i definisjonene av ZEB-nivåene og dette er de seks nivåene i økende ambisjonsnivå. For å oppnå ZEB-OM eller høyere er det ikke bare nødvendig å produsere energi, men også eksportere produsert energi til nabolaget [20]

- **ZEB-O÷EQ:** Bygningens fornybare energiproduksjon kompenserer for klimagassutslippet fra energibruk i drift (O) av bygningen, med unntak av elektrisk utstyr, «plug loads» (EQ).
- **ZEB-O:** Bygningens fornybare energiproduksjon kompenserer for klimagassutslippet fra energibruk i drift (O) av bygningen.
- **ZEB-OM:** Bygningens fornybare energiproduksjon kompenserer for klimagassutslippet fra energibruk i drift av bygningen (O) og produksjon av byggematerialer (M) gjennom hele bygningens livsløp.
- **ZEB-COM:** Bygningens fornybare energiproduksjon kompenserer for klimagassutslipp fra bygging (C), energibruk i drift av bygningen (O) og produksjon av byggematerialer (M) gjennom hele bygningens livsløp.
- **ZEB-COME:** Bygningens fornybare energiproduksjon kompenserer for klimagassutslipp fra bygging (C), energibruk i drift av bygningen (O), produksjon av byggematerialer (M) og avhending (E) av byggematerialer gjennom hele bygningens livsløp.

– **ZEB-COMLETE:** Bygningens fornybare energiproduksjon kompenserer for klimagassutslipp fra alle faser i levetiden: bygging (C), energibruk i drift av bygningen (O), produksjon av byggematerialer (M), bruk, vedlikehold, reparasjon og rehabilitering i driftsfasen (PLET) og avhending av byggematerialer (E) gjennom hele bygningens livsløp.

Nedenfor er det to tabeller som i korte trekk viser steg for steg hvordan man går frem for å gjennomføre et ZEB-prosjekt. Det er to ulike tabeller fordi det er forskjellige fremgangsmåter for å gjennomføre et ZEB-O-EQ eller ZEB-O og de høyere nivåene

Trinn	Beskrivelse
1	Velge et ZEB-ambisjonsnivå for prosjektet
2	Minimere bygningens energibehov gjennom tiltak for energieffektivisering og evaluere alternative fornybare energikilder
3	Planlegge produksjon av fornybar energi på tomta
4	Gjøre energiberegninger
5	-Beregne ZEB-O÷EQ-balansen, eventuelt ZEB-O -Hvis ZEB-O balansen er mindre eller lik null, er ZEB-O ambisjonen nådd

Tabell 1: Trinnvis beskrivelse for å oppnå balanse i et ZEB-O-EQ eller ZEB-O prosjekt. Hentet fra [20].

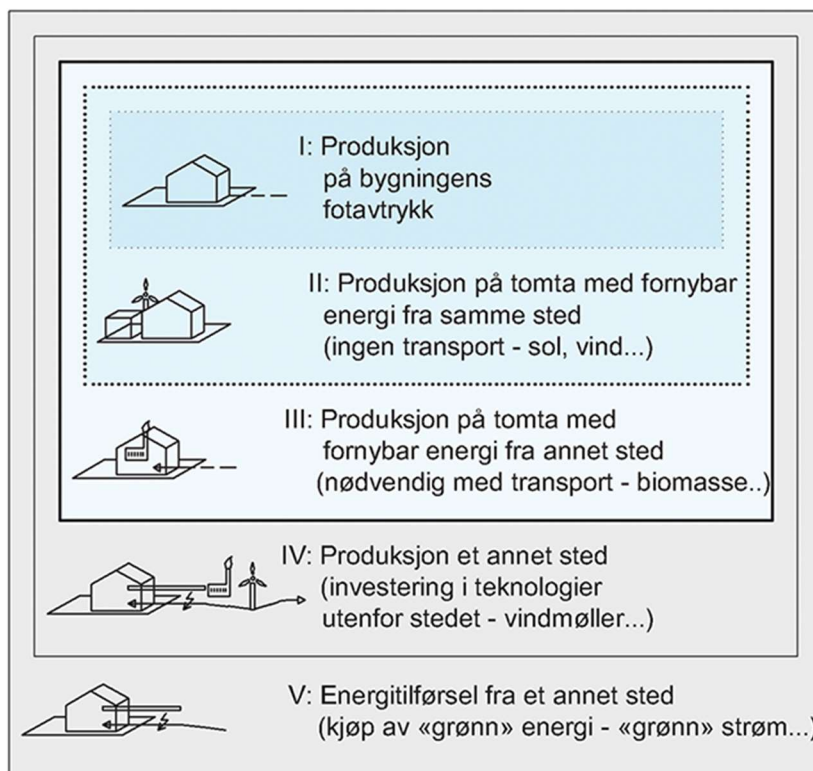
Trinn	Beskrivelse
6	For å oppnå ZEB-OM eller høyere, er det nødvendig å eksportere egenprodusert energi
7	Lage et livløpsregnskap for bygningen, det vil si fremskaffe mengder av alle materialer som inngår i bygningen
8	Beregne klimagassutslipp knyttet til materialene som inngår i bygningen, ved hjelp av CO <sub>2</sub> faktorer som kan hentes fra miljødeklarasjoner (EPD) eller andre kilder
9	Minimere klimagassutslipp fra materialer
10	-Beregne ZEB-balansen -Hvis ZEB-ambisjonen er oppnådd, vil balansen være mindre eller lik null

Tabell 2: Trinnvis beskrivelse for å oppnå balanse i ZEB-OM eller høyere. Hentet fra [20].

### 2.4.3 Energiproduksjon

I ZEB-prosjekter kan den fornybare energien komme fra ulike kilder, og det er derfor også definert egne systemgrenser for dette. Disse skiller mellom om energien er produsert på eller utenfor tomta, om det kreves transport, og om det eventuelt er kjøpt grønn energi som forsyner bygget. Det er mange måter å produsere fornybar energi på, og dette kan blant annet gjøres ved å utnytte solenergi, vind eller biomasse. [20]

Figur 3 presentert nedenfor viser systemgrensene ved energiproduksjon i et ZEB-prosjekt.



Figur 3: Systemgrensene ved energiproduksjon i et ZEB-prosjekt. Hentet fra [20]

Ved lokal energiproduksjon er det ikke alltid at produksjonen samsvarer med energibehovet. Dette byr ofte på utfordringer, og systemer for lagring av energi kan være løsningen på dette. Man kan også eksportere overskudd av elektrisitet til nabobygninger slik at man i større grad er fleksibel, og kan tilpasse forbruket etter produsert energi. En annen løsning kan være å eksportere varme gjennom et fjernvarmesystem til andre bygninger utenfor systemgrensen. Hvis dette gjøres kan det tas med i energiberegningene, men det er begrensninger for hvor langt det er hensiktsmessig å transportere varme. For å forenkle beregningene benyttes ofte årlige tall på energiproduksjon og energibehov, selv om det anbefales å bruke kortere intervaller da årstiden påvirker dette i stor grad [20].

#### 2.4.4 Sammenheng mellom energiforbruk og klimagassutslipp

I driftsfasen beregnes klimagassutslippene knyttet til energi ved å se på byggets energiforbruk, produksjon og eksport av energi. Hvilke materialer som benyttes for å frigjøre energi har stor innvirkning på utslippene, og disse materialene kalles energibærere. Hver energibærer har egne CO<sub>2</sub>-faktorer som sier hvor mange gram klimagasser som frigjøres ved produksjon av en kWh. Det er stor variasjon på mengden klimagasser som slippes ut ved de ulike energibærerne og dette har derfor stor påvirkning på beregningene. Selv om CO<sub>2</sub>-faktorene kan variere noe etter hvordan prosessen foregår og hvilke systemgrenser som gjelder er det satt standardiserte tall for dette, der de mest vanlige finnes i tabellen under. Det er viktig å merke seg at denne faktoren kun tar hensyn til utslippene for energibærerne og den direkte energiproduksjonen, og ikke materialene brukt i energisystemene. Dette betyr at for eksempel solcellepanel har en CO<sub>2</sub>-faktor som er lik 0, selv om det kan være betydelige utslipp knyttet til produksjonen, transport, montering og avhending av disse. [20]

Energibærer	CO <sub>2</sub> -faktor (g CO <sub>2</sub> -ekv./kWh)
Elektrisitet fra strømnettet	130
Olje (fossil)	285
Gass (fossil)	210
Flis	4–15
Pelleter/briketter	7–30
Biogass fra husdyrgjødsel	25–30
Bio-diesel og bio-olje	50
Bio-etanol	85
Søppelforbrenning (kun varme)	185–211

Figur 4: Vanlige CO<sub>2</sub>-faktorer benyttet av FME ZEN oppgitt i gram. Hentet fra [20]

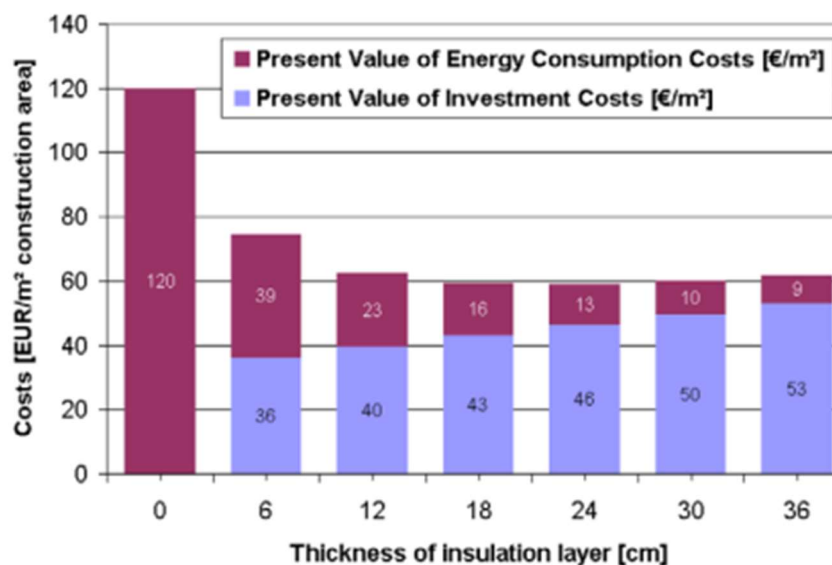
## 2.5 Energibesparende tiltak

### 2.5.1 Generelt

Som det ble nevnt tidligere skal det legges frem løsninger som kan bidra til å energi effektivisere eldre bygg, og da spesifikt høyblokkene til Sentralbygg 1 og 2. Det er mange gode løsninger som har blitt dokumentert iblant annet Byggforsk, og i mange Sintef rapporter. For å se på hva som er mest energieffektivt, blir det sett på tradisjonelle løsninger, med etterisolering innvendig og utvendig. Det blir også sett på hvilke muligheter som finnes innenfor tekniske løsninger, som moderne ventilasjonssystemer og solcelleløsninger.

### 2.5.2 Etterisolering av vegger

En god løsning for å energi effektivisere bygg er å etterisolere yttervegger og fasader, dette forbedrer u-verdien og minker varmetapet til veggene. Dette er et tiltak som kan være kostnadsbesparende for både miljø og økonomi, og dette gjelder særlig for store bygg som har dårlig isolasjonsevne, og bruker mye energi på oppvarming [21].



Figur 5: Kostnader for isolering, og energikostnader etter isolering. Hentet fra [21]



### 2.5.3 Prefabrikkerte fasadeelementer

Prefabrikkerte fasadeelementer er et alternativ til tradisjonell montering av fasader lokalt på byggeplass og kan benyttes både ved renovering og nybygg. De mest vanlige veggelementene kalles TES elementer (Timber element system) som består av bindingsverk i tre. Disse er selvbærende og monteres direkte på den eksisterende bærekonstruksjon.

Elementene kan inneholde ulike komponenter og tilpasses til hvert enkelt prosjekt. Det skilles mellom to typer veggelementer som er henholdsvis åpen eller lukket. De lukkede elementene kommer som en komplett vegg med to tettesjikt og innvendig kledning, dette gjør at det blir svært lite etterarbeid på byggeplassen, men det stilles mye strengere krav til produktene og kvalitetssikring av veggen. De åpne veggelementene kommer typisk med bindingsverk, vindsperre, vinduer, utvendig kledning og eventuelt isolasjon. Med en slik løsning blir det enkelt å inspisere etter feil og mangler på elementene etter de har blitt levert til byggeplassen. Det er også mindre sjanse for fuktproblematikk ved åpne elementer. Etter at elementene er montert, kan veggen føres ut og dampsperre og innvendig kledning monteres. Veggelementer kan også leveres med ferdig opplagt trekkør til elektriske installasjoner og ventilasjonskanaler. [22]

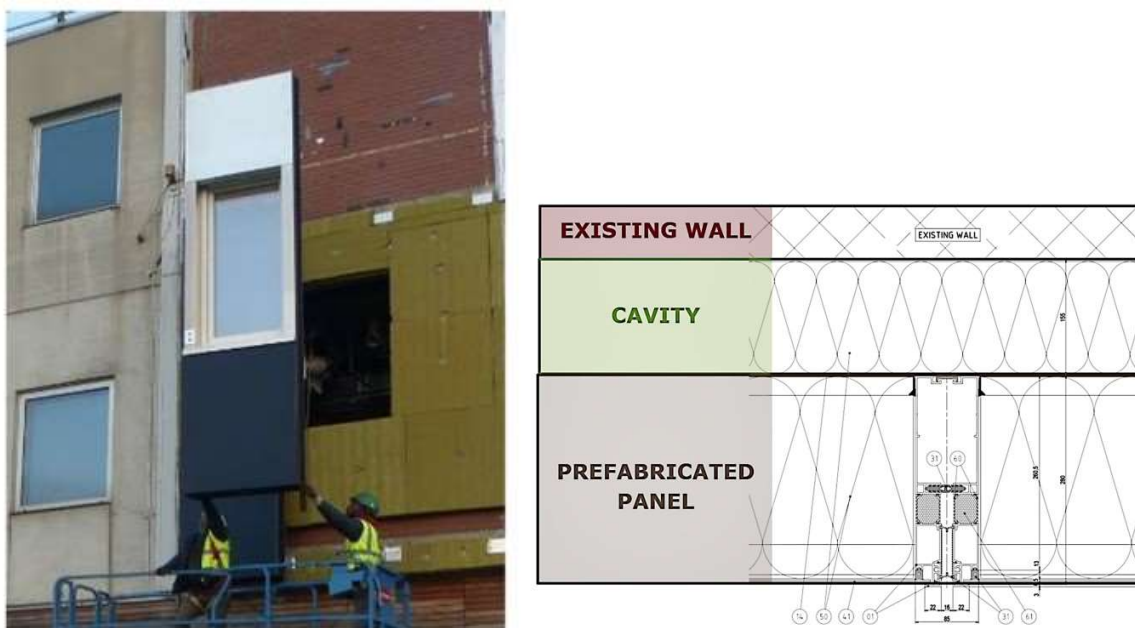
Det er mange fordeler ved bruk av prefabrikkerte veggelementer, men det krever også riktig utførelse for å få et godt resultat. Elementene produseres som oftest innendørs og under kontrollerte forhold. Dette gjør at materialene ikke er like utsatt for vær og vind som de ofte er på byggeplassen, i tillegg tilrettelegger dette for en mer effektiv produksjon som er enklere å følge opp og dokumentere [23]. Bruk av elementer kan sørge for en mer effektiv drift på byggeplassen og at bygget kan lukkes raskere og med mindre arbeidskraft sammenlignet med den tradisjonelle utførelsen. I norsk klima er det ofte viktig å lukke bygget så fort som mulig, for å slippe skader på elementene. [24]

Det finnes også en del ulemper med bruk av denne løsningen. Elementene krever transport fra produksjonssted til byggeplassen og må ofte mellomlagres. Under denne transporten er de utsatt for støtskader eller fuktinntrengning som kan få store konsekvenser senere i byggeprosessen, og det er derfor viktig med kontroll og oppfølging av produktene. Det er ikke alle bygninger som har mulighet til å benytte en slik løsning da den krever god atkomst for transportbil og eventuelt kran som bistår med montering. [25] Det kan også i noen tilfeller være utfordrende å få et kontinuerlig sperresjikt på innsiden av veggen, men dette er enklere ved bruk av åpne elementer hvor dampsperran monteres i ettertid.

#### 2.5.4 Plug and play

Plug and play fasadesystemer er utviklet for å kunne renovere og energi effektivisere eksisterende bygninger på en optimal måte ved bruk av prefabrikkerte veggelementer. Konseptet skal kunne bidra til å ivareta europeiske bærekrafts mål og har et forhold til teorien om «Trias Energetica». Denne teorien deler inn energisparende tiltak i tre forskjellige grupper, som er passive, aktive og fornybare energikilder. Passive tiltak handler om hvordan man kan senke energiforbruket ved å oppgradere bygningskroppen slik at det blir mindre varmetap gjennom vegger, golv, tak og vinduer. De aktive går på å erstatte gamle utdaterte tekniske systemer med nye som er mer effektive og/eller har lavere utslippsintensitet. Den tredje gruppen handler om hvordan man kan integrere fornybare energikilder inn i bygningen som baserer seg på sol, vind, vann eller biomasse og dermed reduserer bygningens miljøavtrykk forbundet med energiforbruk.

Plug and play systemet har mulighet til å energi effektivisere et bygg på alle områdene ved å plassere disse systemene inn fasaden fremfor å måtte gjøre store endringer inne i bygget. I tillegg vil det gi bygninger et helt nytt arkitektonisk uttrykk. Systemet er fleksibelt og kan tilpasse komponenter og størrelser etter prosjektets behov. En av fordelene er at man får et nærmest gjennomgående isolasjonssjikt mellom eksisterende vegg og de nye elementene. Dette fungerer som en kuldebro bryter. Renovering med systemet kan gi en u-verdi opp til  $0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Under illustreres oppbygging og montering av elementene. [26]



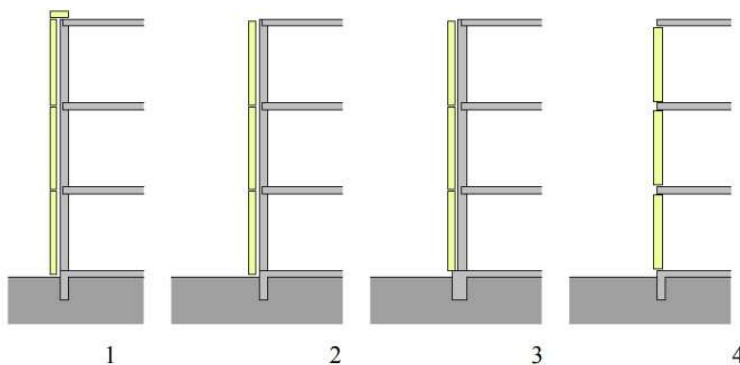
Figur 6: Montering av «Plug and play» løsning. Hentet fra [26]

### 2.5.5 Montering av elementer i betongkonstruksjoner

TES-elementer kan monteres på forskjellige måter i den eksisterende konstruksjonen og valg av metode avhenger gjerne av byggets bæresystem. Elementene kan gi økte laster og det må derfor gjøres beregninger for å forsikre seg om at disse er akseptable, også lastsituasjonen kan påvirke valg av forankring. For å beholde en ryddig lastsituasjon er det anbefalt at hvert element forankres til den bærende konstruksjonen slik at det ikke overføres krefter mellom elementene. Ved innfesting i betongkonstruksjoner kan det benyttes stålvinkler og ankre som er beregnet for innfesting til betong. Figuren under viser ulike prinsipper for forankring av TES-elementer [27].

Aktuelle prinsipper for montering av TES elementer er:

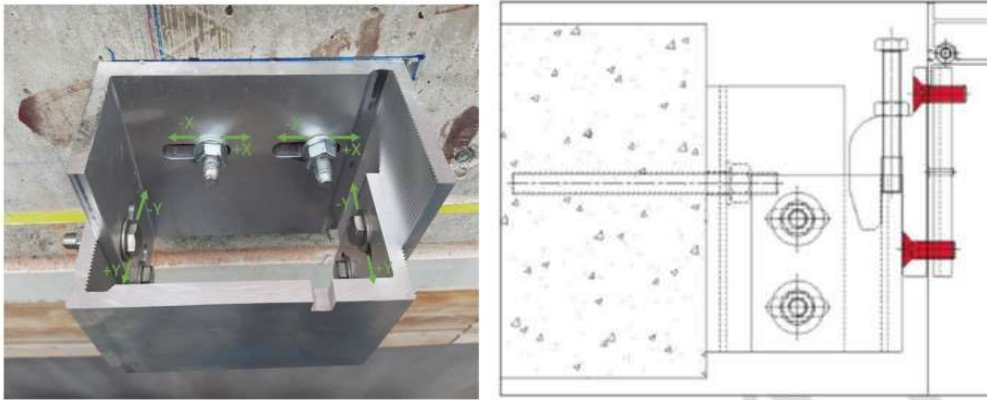
1. Hengende fra toppen, egenlasten av elementene tas opp i toppen av bygningen
2. Etasjevis montering
3. Stående, vertikallaster fra elementene overføres til fundament/eksisterende konstruksjon i nederst på bygningen
4. Stående etasjevis, vertikallast fra hvert etasjeelement tas opp i hver etasjeskiller



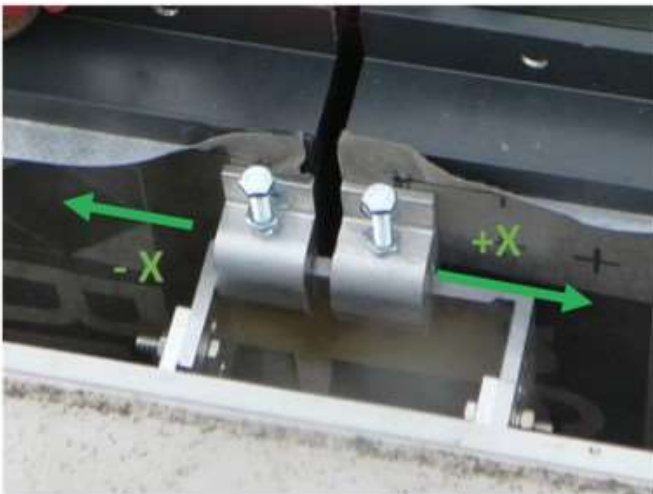
Figur 7: Prinsipper for montering av TES elementer, og lastfordeling. Hentet fra [27]

Plug and play systemet har en lignende innfesting i konstruksjonen og benytter seg også av betongankre. I motsetning til TES-elementene har disse en aluminiums ramme som både gir mekaniske egenskaper og bidrar som et sammenkoblingspunkt for disse elementene.

Rammen kommer med en isoleringsprofil på innsiden som skal fungere som en kuldebro bryter. Først festes ankrene med bolter inn i den bærende konstruksjonen, deretter heises elementene på plass, og henges fest på ankerpunktene med stålkroker. Hvert element kan ha en maksimal vekt på 600kg. Figurene under illustrerer hvordan ankerpunktene er festet i eksisterende vegg og hvordan elementene festes til disse.



Figur 8: Viser montaseløsning til «Plug and play» løsning. Hentet fra [26]



Figur 9: Montaseløsning «Plug and play». Hentet fra [26]

### 2.5.6 Bytte vinduer

Vinduer er ofte den svakeste delen i en konstruksjon når det kommer til både varmetap, lyd-gjennomgang og lufttetthet [28]. Gamle vinduer med ett lag glass kan typisk ha en u-verdi på  $5,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ , til sammenligning er dagens byggetekniske krav  $\leq 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Dette kravet gjelder ikke bare for glassarealet, men hele vinduet, det er derfor viktig at både karm og ramme er godt isolert for å unngå varmetap. I dag er det kun 3 lags vinduer som oppfyller kravene i TEK17, og det blir også produsert vinduer med 4 lags glass som oppnår u-verdier ned mot  $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$  [29]. Ved å bytte vinduer kan man dermed senke byggets energiforbruk og forbedre inneklimate. Når gamle, utette vinduer erstattes med nye, og er montert på riktig måte, forsvinner mesteparten av luftlekkasjene. Noen av disse utetthetene kan i noen situasjoner få bidrag fra ventilasjonssystemet, og kan dermed påvirke byggets inneklimate. Dette kan løses med å montere vinduer med ventiler, eller justere på til luften til ventilasjonssystemet hvis bygget har balansert ventilasjon.

### 2.5.7 Solskjerming

Byggeteknisk forskrift stiller krav til at byggverk skal ha tilfredsstillende tilgang på lys uten at dette går på belastning av inneklimate. Solvarme kan også være et godt tilskudd til bygget og bidra til å senke energiforbruket. Solskjerming er derfor ofte en viktig komponent for å kunne unngå overoppheting på varme sommerdager, samtidig som man slipper inn tilstrekkelig sollys når det er ønsket [17].

Solskjerming kan deles inn i tre varianter, utvendig solskjerming, mellomliggende solskjerming og innvendig solskjerming. Utvendig solskjerming stopper solvarmen før den kommer inn i rommet og er derfor det beste alternativet for å unngå overoppheting. Mellomliggende solskjerming slipper inn noe solvarme, og innvendig solskjerming fungerer best for å kontrollere dagslysnivå og for å unngå blanding. Denne løsningen er lite effektiv for å regulere inn slipp av solvarme [17]

De siste årene har det også blitt utviklet nye innovative løsninger som kan benyttes til solskjerming. Den mest brukte teknologien kalles *elektrokrome* og er en integrert løsning uten bevegelige deler. Vinduet får et belegg som kan variere solinnstrålingen ved hjelp av en elektrisk spenning integrert i belegget. Vinduet kan dermed dimmes og man kan slippe inn solstråling og solvarme i rommet etter ønske eller behov. Dette er en innovasjon som kan bidra til å energi-optimalisere bygninger gjennom smarte fasadesystemer [30].

### 2.5.8 Solceller

De fleste solcellepanel er laget av silisium og består av en halvleder som omdanner sollys til elektrisitet gjennom en fotovoltaisk prosess. Elektrisiteten kan enten benyttes i bygningen, leveres til strømmettet eller lagres i batterier. De siste årene har det vært økt interesse for solceller og de har fått høyere effektivitet. De tre vanligste solcelletypene på markedet i dag er monokrystallinske, multikrystallinske og tynnfilm. Monokrystallinske har en virkningsgrad på 17-20%, multikrystallinske 13-16% og tynnfilm 4-12%. Virkningsgraden til et solcelleanlegg sier hvor mye av innstrålt solenergi som blir til elektrisitet. På grunn av den lave virkningsgraden er tynnfilm lite brukt i dag, men denne type teknologi har stort potensialet da den kan bidra til nye innovative løsninger [31].

Solceller kan både monteres utenpå bygningen eller integreres i bygningskroppen. Paneler som er montert på utsiden av bygningens klimaskall, kalles *Building Applied Photovoltaics (BAPV)*, mens integrerte paneler erstatter gjerne en annen bygningsdel, som for eksempel taktekning eller kledning. Disse har dermed en dobbel funksjon og kalles *Building Integrated Photovoltaics (BIPV)*. Solceller har ofte en oppgitt levetid på 25-30 år, men virkningsgraden vil synke noe med årene. Dette er en kortere levetid enn andre bygningskomponenter og det er derfor viktig å feste solcellene slik at de forholdsvis enkelt kan byttes ut om de blir defekte. [31]

Norge er et land med stor variasjon i solinnstråling og solhøyde gjennom året. Hvor mye strøm et solcelleanlegg produserer, avhenger både av virkningsgrad, orientering, helningsvinkel, geografisk plassering og omgivelser [32]. Dette må derfor vurderes i hvert enkelt tiltak, men sørvendte paneler med en helningsvinkel på 30-45% vil være ideelt for de fleste tilfellene. På flate tak burde solcellene vendes mot øst og vest og ligge med en helningsvinkel på rundt 10% for å unngå skygge fra nærliggende paneler, og sørge for avrenning av regnvann [31]. En annen måte og utnytte solenergi på er *vannbaserte solfangere*. Prinsippet baserer seg på at strålingsenergien tas opp i solfangeren gjennom en *absorbator*. En absorbator er ofte en sort metallplate som er omsluttet av et gjennomsiktig dekklag. Absorbatoren fungerer som en varmfelle og benytter en varmeveksler for å øke temperaturen i vannet som deretter sendes til et *varmelager*. Solenergien kan dermed bidra til romoppvarming eller oppvarming av tappevann. Hvis solfangeren ikke klarer å levere vann med høy nok temperatur til varmelageret kan andre energikilder fungere som spisslast. Det er også mulig å lagre varmen i vanntanker slik at den kan benyttes etter behov. [33]

### 2.5.9 Smarte fasader

Fasader har tidligere blitt sett på som et statisk element som har den hovedfunksjon å beskytte konstruksjonen mot vær og klima. Etter hvert som det har blitt stilt strengere krav til bygningers energiforbruk har vegger blitt tykkere og fått bedre varmeegenskaper. Likevel finnes det begrensninger for hvor mye man kan isolere for å forbedre energiforbruket, og det er her *smarte fasader* kan bli nøkkelen til å senke energiforbruket ytterligere.

En smart fasade kommuniserer med de tekniske systemene i en bygning og tilpasser seg været på utsiden. Dette gjøres ved at mange sensorer måler inneklimate og den ytre påvirkningen. Disse sensorene er koblet sammen i et nettverk, og et *sentral driftkontrollanlegg (BMS)* tar avgjørelser for å minimere energiforbruket [34]. Smarte fasader gjør det også mulig å utnytte fornybare energikilder i nærområdet og dermed redusere behovet for kjøpt energi [30].

Solskjerming er en sentral del av smarte fasader og er viktig for energibalansen i en bygning og inneklimate. Smarte fasader kan ved hjelp av værstasjoner og innvendige sensorer måle innvendig og utvendig temperatur og justere solskjerming deretter. Dette kan selvfølgelig overstyres av brukerne hvis de har andre behov. Konseptet med smarte fasader er ennå i utvikling og Forskningscenteret ZEN jobber med å utvikle og teste ulike teknologier for solskjerming [35].

En annen viktig del av smarte fasader er hvordan man kan senke energiforbruket i tilknytning til ventilasjonsanlegg. En interessant løsning er å benytte sensorer som måler temperaturer og CO<sub>2</sub> nivå i inneluften. Denne informasjonen kan så benyttes til å naturlig ventilere og avkjøle bygget med automatiske vinduer. Dette gjør at man effektivt kan kombinere naturlig og balansert ventilasjon [34].



#### 2.5.10 Tekniske systemer

I en utredning bestilt av Direktoratet for byggekvalitet kommer det frem at reduksjon av luftmengder gjennom behovsstyring og reduksjon av *spesifikk vifteeffekt (SFP)* er de tiltakene som bidrar mest til lønnsom energi-effektivisering i kontorbygninger [36].

Ventilasjonssystemer kan byttes ut til et *DCV-system (Demand Controlled Ventilation)* som er et system hvor luftmengdene reguleres automatisk etter behov. Bygget deles inn i soner på romnivå og får tilbakemelding fra sensorer om luftkvaliteten er som ønsket. Løsningen vil bli bedre luftkvalitet og inneklima, samt sørge for at det ikke går med unødvendig energiforbruk til å ventilere rom som ikke brukes slik de er dimensjonert. For å sikre at systemet reguleres seg ned etter behov vil det ha en såkalt «*optimizer*» funksjon som sørger for å regulere ned viftene så mye som mulig, samtidig som det sørger for at minimum et grenspjeld står nesten helt åpent til enhver tid.

Ulempene med tilpasset ventilasjon er:

- *Unødvendig energibruk til ventilasjon i rom som ikke brukes som dimensjonert*
- *Risiko for at rom som brukes av færre personer enn ventilasjonene er dimensjonert for kan bli kalde*
- *Svært dårlig luftkvalitet og inneklima når ventilasjonene er slått av.*

For å redusere ulempene ved DCV er det viktig med et velfungerende VAV-system. VAV omfatter løsninger hvor en tilstedeværelsesdetektor styrer spjeldstillingen til forhåndsinnstilte posisjoner. Tilstedeværelsesdetektorene registrerer når det er personer i rommet og forhindrer at unødvendig energi blir brukt og at luftkvaliteten blir dårlig dersom rommet brukes utenfor planlagt tidsintervall.



### 3. Metode

#### 3.1 Generelt

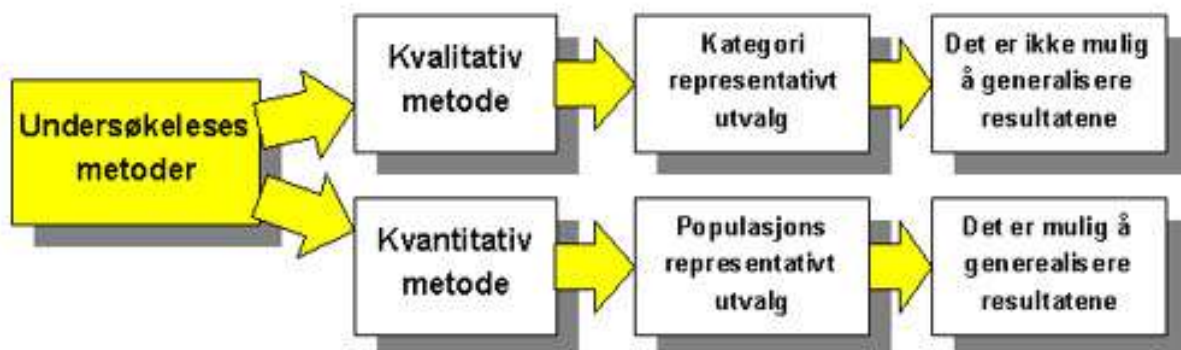
En metode kan defineres som en framgangsmåte, altså en forskningsprosess som inkluderer blant annet verktøyene man bruker for å løse problemstillinger og for å utarbeide ny kunnskap [37].

Problemstillingen i denne oppgaven er knyttet til å besvare hvordan en eventuell renovering av Sentralbyggene kan gjennomføres for å optimalisere energieffektiviteten. Metodevalget er basert på en vurdering av forskningsprosessen som er mest aktuell for å besvare den aktuelle problemstillingen. Videre følger en utredning av tilnærmingen til metode i denne bacheloroppgaven, sammen med en kort innføring i forskjellige forskningsmetoder.

##### 3.1.1 Kvalitative og kvantitative metoder

Det vanligste er å holde kvalitative og kvantitative metoder adskilt, men de kan også kombineres. Kvalitative metoder er basert på muntlig og tekstlig informasjon, mens kvantitative tar utgangspunkt i tall og det som er målbart. Den største forskjellen er at kvalitative metoder legger mer vekt på varierte opplysninger og deres relevans, mens kvantitative metoder er som oftest lettere å etterprøve, og dermed mer presis [38].

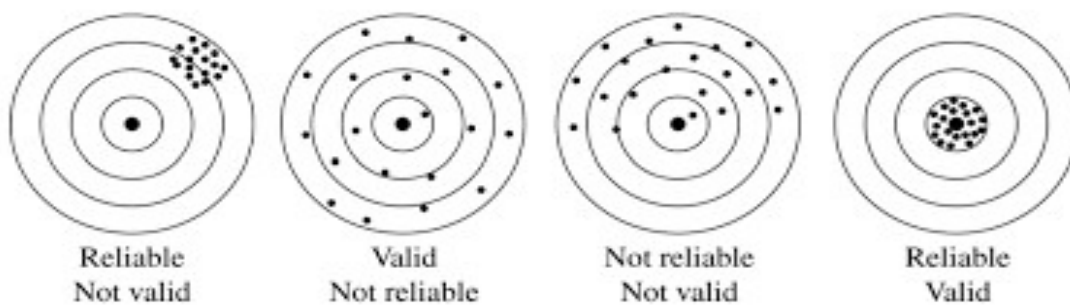
Figur 10 illustrerer at kvalitative metoder baseres på et kategorirepresentativt utvalg hvor det ikke er mulig å generalisere resultatene, mens kvantitative resultater baseres på et populasjonsrepresentativt utvalg der det er mulig å generalisere resultatet.



Figur 10: Forskjellen på kvantitative og kvalitative metoder. Hentet fra [39].

### 3.1.2 Validitet og reliabilitet

Validiteten angir hvorvidt den innsamlede dataen samsvarer med det man ønsker å forske på. Hvis validiteten er god betyr det at datamaterialet er egnet til å belyse det oppgaven forsøker å belyse. Reliabilitet knyttes opp mot muligheten for å gjøre de samme prøvene igjen og oppnå de samme resultatene. Reliabiliteten blir kalt sterk dersom reproduserte målinger får samme resultat. En god reliabilitet oppnås ved å ha enstydige måleparametere og målemetoder, slik at det tydelig kommer fram hva som måles og hva hensikten med målingene er [38].



Figur 11: Validitet og reliabilitet. Hentet fra [40].

### 3.1.3 Induktiv og deduktiv forskning

Innen forskningsmetode blir det skilt mellom induktiv og deduktiv tilnærming. Ved induktiv forskning benyttes kvalitativ informasjon. Induktiv forskning benyttes på felt som er lite utforsket, eller helt nye. Deduktiv forskning tar utgangspunkt i en teoretisk forankret problemstilling, og brukes for å underbygge teorier eller etablere teoribasert kunnskap.

### 3.1.4 Valg av metode og forskning

Metodene som har blitt benyttet for å besvare oppgaven har hovedsakelig vært de kvalitative og innen informasjonsinnhenting har det blitt brukt litteraturstudier og casestudier. Ettersom problemstillingen er spesifisert mot høyblokkene ved sentralbygget har arbeidet hatt en induktiv tilnærming, da løsninger for renovering av Sentralbyggene er lite utforsket fra før. Konklusjonen er at en blanding av teori og empiri vil egne seg best for å besvare problemstillingen.

## 3.2 Datainnsamling

### 3.2.1 Litteratur

For å kunne vurdere hvilke tiltak som må gjøres for å optimalisere energieffektiviteten har det blitt gjennomført et litteraturstudium. Her har byggetekniske forskrifter og begrepet energioptimalisering blitt studert. For å kartlegge tilstanden på Sentralbyggene er det blitt studert energiforbruk og gamle tegninger. Det er også blitt tatt egne studier og målinger av sentralbygget for å kartlegge kuldebroer og andre svakheter i bygget.

For at litteraturstudiet skal være relevant, har det vært viktig med pålitelige referanser. Litteraturen som har blitt brukt har hovedsakelig vært arbeidstegninger fra Sentralbyggene, artikler og litteratur fra NTNU og SINTEF, og flere skriftlige kilder. Det har også vært kommunikasjon med ulike lærere fra NTNU og utviklere av SIMIEN for å kvalitetssikre vurderingene. Konklusjonen er at dette er litteratur fra kompetente og anerkjente fagfolk, noe som gjør kildene pålitelige.

### 3.3 Casestudie

For å besvare problemstillingen er det også blitt gjort en studie mot en konkret case, Høyblokka som tilhører Sentralbygg 2. Et casestudium er definert som et inngående studium av en kasus [38]. Studiet benyttes for å få innsikt og oppnå forståelse i en kompleks problemstilling, hvor et stort antall variabler spiller inn. Et casestudium kjennes igjen ved få antall subjekt med flere variabler. Fortid, nåtid og fremtid blir også ofte vurdert i et slik studium.

Caseeiendommen er et kontorbygg som skal renoveres på grunn av at det ikke lengre stiller til kravene fra dagens byggeforskrifter. Det har blitt utformet to ulike konsepter som er basert på teknisk tilstandsanalyse, energisimuleringer og historisk energiforbruk. Konseptene er satt opp etter teoretiske prinsipper som er forsøkt knyttet opp mot praktiske løsninger.

Videre er konseptene sammenlignet og vurdert. Casestudiet i denne besvarelsen er delvis basert på egne tolkninger av gamle byggetegninger for to konkrete bygg og med innspill fra veileder. Konseptene bygger på generell karakter hos kontorbygg bygget rundt 1970-tallet, så resultatene kan også være nyttige for lignende casetilfeller.

### 3.3.1 Dokumentasjonsanalyse

For å kunne kartlegge dagens standard på bygget har det blitt brukt dokumentasjonsanalyse for dette casestudiet. Dokumentasjonsanalysen innebærer å analysere de dokumentene som er til disposisjon. I dette casestudiet har dokumentene blant annet omfattet arbeidstegninger, bilder, eiendommens historikk, historisk energiforbruk og tidligere tekniske vurderinger. Det ble også gitt ut noe informasjon av FDV- og eiendomsavdelingen til NTNU.

Når man skal analysere et eldre bygg, som det har blitt gjort mange endringer og oppgraderinger på, kan det ofte være utfordrende å finne spesifikk informasjon om endringer, oppgradering eller teknisk spesifikasjoner. Under innhenting av dokumentasjon ble det gjort forsøk på å innhente spesifikk teknisk informasjon om det tekniske anlegget, og generell informasjon om Sentralbygg 1 og 2. Henvendelsen ble gjort ved å sende e-post til FDV- og eiendomsavdelingen til NTNU. Dessverre hadde de ikke ønske om å ha en aktiv rolle i prosjektet, de hadde heller ikke ønske om å bistå med veiledning og gi ut informasjon om Sentralbyggene til gruppa. Det ble dermed vanskelig å gjøre en omfattende analyse av det tekniske systemet, og fastslå teknisk informasjon om dette.

### 3.3.2 Simien

Simien er et energisimuleringsprogram som kan beregne energiforbruket til bygninger med data input. Dataen man legger inn i programmet gir en u-verdi på vegger, tak, vinduer og andre viktige konstruksjonsdeler som kan bidra til varmetap. Ventilasjonssystemet og oppvarmingssystem er også viktig input for at programmet skal kunne gjennomføre en presis simulering.

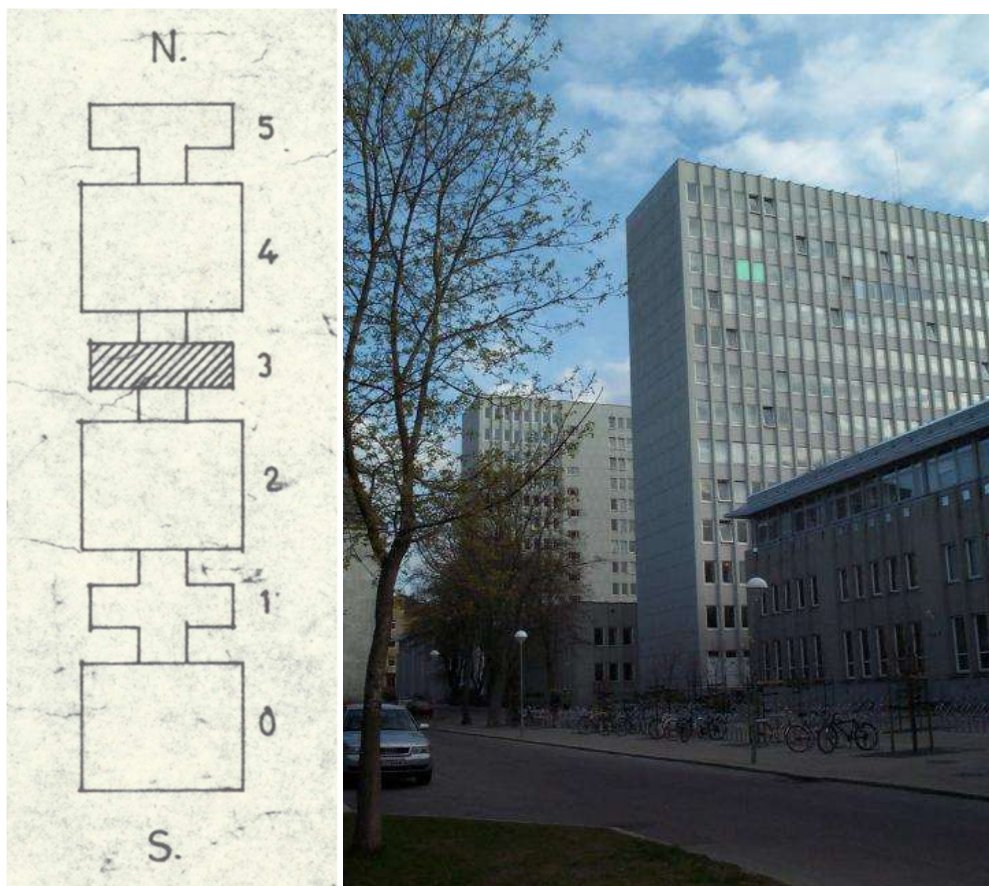
Med denne dataen gjennomfører programmet en simulering og setter det opp mot kravene som stilles i TEK17 og NS3700, programmet gir da data om energiforbruket og hvilken energimerking bygget får.

## 4. Analyse

### 4.1 Beskrivelse

Høyblokka er en del av B-rekken eller det som i dag omtales som sentralt læringsstrøk på NTNU Gløshaugen. Dette er et bygningskompleks som består av tre lavblokker og to høyblokker med forbindelser som knytter disse byggene sammen. Videre er bygningsmassen delt inn i Sentralbygg 1 og 2 som til sammen har et bruttoareal på 30 792,78 m<sup>2</sup> [41].

Byggene ble oppført i perioden 1961-1968 og har et bruttoareal på ca. 6000 kvadratmeter over 13.etasjer. Høyblokkene benyttes i dag som kontorlokaler. [41]



Figur 12: Sentralbygg 1 og 2 oversikt. Hentet fra [41].

#### 4.1.1 Byggeteknisk tilstand

Tidligere har det vært en vanlig oppfatning at betong er vedlikeholdsfritt og evigvarende. I senere tid har man sett at dette ikke er tilfellet, og at betong blir som alle andre materialer utsatt for nedbrytningsmekanismer og mister sine egenskaper over tid. Dette er også tilfellet for høyblokka hvor betongen er 60 år gammel. Betongen har ikke synlige skader, men det er rimelig å anta at de utsatte delene krever rehabilitering slik at levetiden forlenges [1].

Gavlveggene har vært utsatt for mye vær og vind oppover årene og har derfor blitt rehabilitert i flere runder tidligere. Disse veggene er spesielt viktige for høyblokkenes stabilitet, da det er armering i disse veggene som tar opp mye av strekkraftene byggene blir utsatt for.

Brystningselementene mellom søylene er tynne og har mest sannsynlig liten eller ingen restlevetid igjen. I tillegg har det på enkelte steder blitt påvist fukt i bindingsverket bak betongplatene. Ved å fjerne disse vil man få et bedre innblikk i tilstanden til søylene, og om det er eventuell korrosjon i sammenføyningen mellom søyler og elementene. Betongvegger og dekker på innsiden er sannsynligvis i god stand og har dermed ikke behov for rehabilitering.

Kjellerveggene er kun isolert med treull på innsiden og har ingen isolering på utsiden. Dette er en løsning som ofte kan føre til fuktproblematikk og må derfor utbedres. Det er også stor usikkerhet til hvor godt bygget er drenert.

#### 4.1.2 Byggeskikk på 60-tallet

Sentralbygg 1 og 2 ble ferdigstilt i 1961 og 1969 og fulgte derfor byggeteknisk forskrift 1949 som var gjeldende til 1970. På denne tiden hadde de tekniske forskriftene mest fokus på krav til fundamenter, drenering og frostsikkerhet. Det ble et krav at kjellervegger skulle føres ned til frostfri dybde for å unngå telehiv. Det ble også innført kvantitative krav til varmeisoleringsvevnen til ulike konstruksjonsdeler som presenteres i tabell 3. Som man ser, har disse blitt kraftig innskjerpet i dagens byggetekniske krav. Det argumenteres derfor på bakgrunn av dette at det kan gjøres store energibesparelser ved å oppgradere bygningskroppen til sentralbyggene.

Tabellen under viser k-verdier som ble satt i TEK49, her uttrykt i «k-verdi», som i dag er u-verdi.



Sone	I	II	III	IV
Yttervegger i:	k	k	k	k
a) Bygninger av mur eller annet brannfast materiale med grunnflate større enn 200 m <sup>2</sup>	1,1	1,0	0,9	0,8
b) Do. med grunnflate mindre enn 200 m <sup>2</sup>	1,0	0,9	0,8	0,7
c) Trebygninger	0,9	0,8	0,7	0,6
Yttertak over	0,9	0,8	0,7	0,6

oppvarmet rom				
Loftsgolv over oppvarmet rom	1,0	0,9	0,8	0,7
Kjellervegger ned til frostfri dybde	1,6	1,4	1,2	1,0 <sup>1)</sup>

Tabell 3: Her ser vi k-verdier i TEK49. Hentet fra [42].

#### 4.1.3 Fundament

Bygget har en fundamentering med støpte kjellervegger på banketter, og langsgående betongsøyler. Kjellerveggene er 380mm tykke og det er brukt betongkvalitet B20 og en forholdsvis kraftig armering. På innsiden er veggene isolert med 10cm treullplater. Kjellergolvet er en 10 cm tykk betongplate i kvalitet B100 og er avrettet med et materiale som er kalt *elasticrete*. Golvet ligger på frostfri grunn over et 20cm tykt kultlag. Bygget har også en langsgående bærende innervegg som er kontinuerlig oppover etasjene.

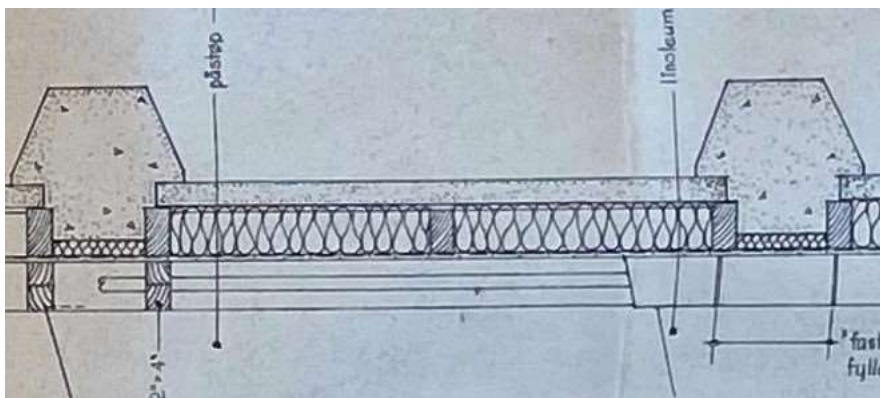
#### 4.1.4 Bæresystem

Høyblokkene har et bæresystem med søyler, vegger og dekker i plasstøpt betong. Langsidene består av søyler og prefabrikkerte brystningselementer som er støpt inn mellom søylene. Disse elementene har ikke en bærende funksjon. Gavlveggene er massive betongvegger og er sammen med to sjakter viktig for byggets stabilitet. I tillegg til søylene og de massive betongveggene bæres også bygget av en 200mm tykk langsgående midtvegg i plasstøpt betong. Etasjeskiller er 150mm tykke. Figur 13 viser den prinsipielle oppbyggingen og alle etasjene har en lignende utforming.

#### 4.1.5 Yttervegger

Gavlveggene har avtakende betongtykkelse oppover etasjene, hvor tykkelsen i 1. etasje er 330mm, 2. og 3. etg 280mm, 4-6. etg 230mm og 7-13. etg har en tykkelse på 180mm. Alle etasjene er isolert innvendig med 150mm siporex plater som er type pore-betong. Dette materialet har dårlig isoleringsevne og benyttes ikke til slike formål i dag. Utvendig er gavlene pusset og inndelt i ruter ved hjelp av lekter som er støpt inn i forskaling. Disse rutene har kun en arkitektonisk funksjon. Gavlveggene har ingen vinduer.

Bæringen på langsidene består som nevnt av støpte søyler med senteravstand 1400mm som er synlige på fasaden. På innsiden av brystningene er det et isolert bindingsverk med 48mm x 98mm stendere og en platekledning på innsiden. I bakre del av søylene er det støpt inn 30mm kork som isolasjon. I tillegg har en av langsidene et massivt veggparti utenfor heis- og trapperommene. Denne veggen er isolert utvendig med mineralullplater og har en pusset overflate. Deler av dette veggpartiet vender mot tilstøtende mellomblokk. Her bæres veggen og dekkene av søyler og dragere for å sørge for en åpning mellom byggene. Fasadene er oppover årene blitt rehabilitert i flere omganger.



Figur 13: Tegning av eksisterende konstruksjon på Sentralbygg 1 og 2. Hentet fra arkivet til NTNU på Dora.



#### 4.1.6 Takkonstruksjon

På taket er det et teknisk rom som inneholder ventilasjonsaggregat, kanaler og kjølemaskin. Dette rommet har i senere tid blitt bygget på som gjør at det nå dekker omtrent halvparten av takflaten og fungerer som en 14.etasje. Det er et rettventd kompakt tak med fall mot sluk og innvendig nedløp. Selve bærekonstruksjonen er av 15cm tykt betongdekke. Siden det er både påbygg, gammelt teknisk rom og eksisterende takflate er det noe ulik utforming av takkonstruksjonen. Felles for flatene er at de benytter papptekking og steinull som isolasjon.

#### 4.1.7 Vinduer

Høyblokka har kun vinduer på sør- og nord-fasaden. Bygget gikk gjennom en fasaderehabilitering i 2016 hvor vinduene på nordsiden ble byttet ut. Dette ble satt inn 3 lags vinduer som antas å ha en u-verdi rundt  $1,2\text{kWh/m}^2$ . Vinduene på sørsiden ble skiftet i 2005 og er 2 lags vinduer med persienne mellom utvendig glass og innvendig isolerglass.

#### 4.1.8 Tekniske systemer

Byggets oppvarming baserer seg på vannbårent system med radiatorer og varme levert fra en fjernvarmesentral. Det tekniske systemet ble oppgradert mellom 2005-2007, og i den forbindelse ble det installert nye radiatorer og termostatventiler. Under denne renoveringen ble også ventilasjonsanlegget pusset opp med et nytt *VAV (Variable air volume)* ventilasjonsanlegg med varmegjenvinner og CO<sub>2</sub> følere i møterom. De aller fleste av rørføringene til ventilasjonsanlegget, både hovedføringer og sprede nett i etasjene ble byttet ut, mens de resterende ble rengjort.

Det ble også installert tre nye ventilasjonsaggregater, samt varmpumper på det nye utvidede teknisk rommet i 14.etasje. To av aggregatene ble plassert på taket og det tredje i kjelleren. Aggregatene på taket forsyner byggets 6-13.etasje og det i kjelleren forsyner 1-5.etasje. Bygget har en VVS-sjakt ved en av trappeoppgangene hvor hovedføringene strekker seg gjennom etasjene.

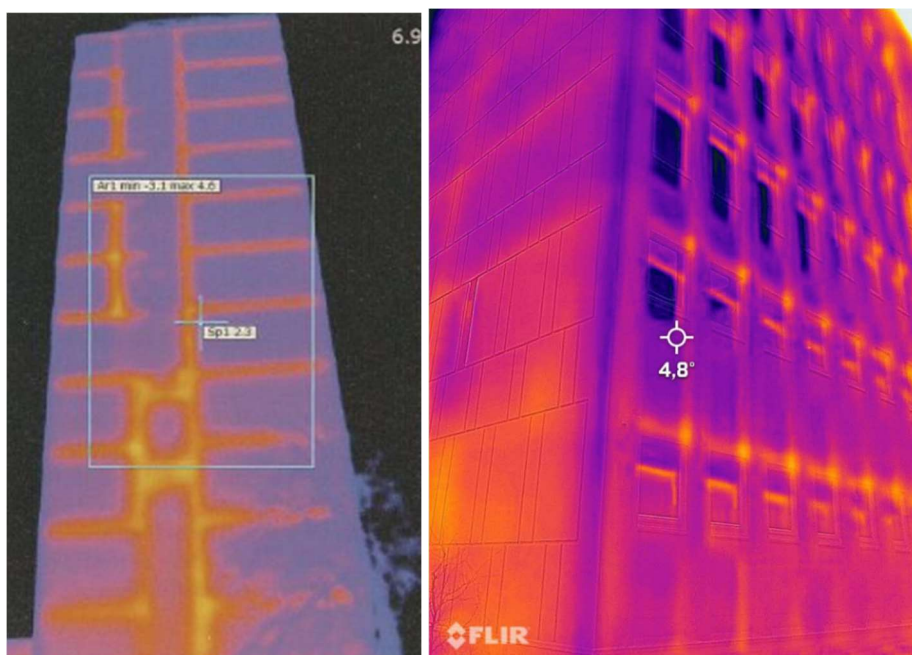
## 4.2 Simulering

### 4.2.1 Intro

Simuleringene av bygget ble gjennomført med programmet Simien, og med informasjonen og dataen som ble innhentet, var det mulig å gjennomføre simuleringer som viser hvor stort det teoretiske energiforbruket til bygget er. Resultatene gir et detaljert innblikk i byggets utfordringer knyttet til energiforbruk og hvilke tiltak som må til for å tilfredsstillе dagens standard. I tillegg til det teoretiske energiforbruket har det faktiske energiforbruket til Sentralbygg 2 i 2021 blitt innhentet og skal brukes som sammenligningsgrunnlag. På grunn av dette inkluderer denne simulering hele Sentralbygg 2, mens konseptene kun ser på løsninger for høyblokkene.

### 4.2.2 Gjennomføring

For å gjennomføre en energisimulering kreves det en rekke data om bygget. Det ble derfor innhentet informasjon fra arkivet til NTNU på Dora, der det hadde blitt arkivert gamle tegninger fra skisseprosjektet og prosjekteringen av Sentralbygg 2, samt informasjon om rehabiliteringstiltak som har blitt gjort i senere tid. Denne informasjonen ble digitalisert og benyttet til å beregne inndata for simuleringen etter NS 3031 Beregning av bygningers energiytelse – Metode og data. Simuleringene ble gjort med veiledning på e-post. [43] For å kartlegge byggets kuldebroer ble det også tatt termografibilder av fasadene som viser tydelig varmetap langs gavlveggene og rundt vinduer.



Figur 14: Termografibilder av Sentralbygget.

## 4.2.4 Resultater

Først gjennomføres en evaluering mot byggesaksforskriftene (TEK17). For kontorbygninger er det to punkter som sammenlignes mot kravene i forskriftene. Dette er energirammen som er byggets netto årlige energibehov beregnet etter Oslo-klima og en del andre faste verdier. Og i tillegg er det minstekravene for u-verdier og lekkasjetall. Disse er absolutte og kan ikke avvikes hvis bygget skal godkjennes mot kravene. Som nevnt benyttes det alltid Oslo-klima og en del faste verdier for driftstider, infiltrasjonsberegning og for effekt og varmetilskudd fra internlast. Dette gjør at årlig netto energibehov vil fravike en del fra netto energibehov i års simuleringen.

Resultater av evalueringen	
Evalueringspunkt	Beskrivelse
Energiramme	Bygningen tilfredsstiller ikke energirammen iht. §14-2 (1)
Minstekrav	Bygningen tilfredsstiller ikke minstekravene i §14-3
Luftmengde ventilasjon	Luftmengdene tilfredsstiller minstekrav gitt i NS3031:2014 (tabell A.6)
Energiforsyning	Fossilt brensel benyttes ikke i oppvarmingsanlegget (§14-4)
Samlet evaluering	Bygningen tilfredsstiller ikke byggeforskriftenes energikrav

Energiramme (§14-2 (1), samlet netto energibehov)	
Beskrivelse	Verdi
1a Beregnet energibehov romoppvarming	94,6 kWh/m <sup>2</sup>
1b Beregnet energibehov ventilasjonsvarme (varmebatterier)	45,6 kWh/m <sup>2</sup>
2 Beregnet energibehov varmtvann (tappevann)	5,0 kWh/m <sup>2</sup>
3a Beregnet energibehov vifter	28,5 kWh/m <sup>2</sup>
3b Beregnet energibehov pumper	1,5 kWh/m <sup>2</sup>
4 Beregnet energibehov belysning	25,1 kWh/m <sup>2</sup>
5 Beregnet energibehov teknisk utstyr	34,5 kWh/m <sup>2</sup>
6a Beregnet energibehov romkjøling	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
6b Beregnet energibehov ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	9,5 kWh/m <sup>2</sup>
Totalt beregnet energibehov	244,1 kWh/m <sup>2</sup>
Forskriftskrav netto energibehov	115,0 kWh/m <sup>2</sup>

Minstekrav (§14-3)		
Beskrivelse	Verdi	Krav
U-verdi yttervegger [W/m <sup>2</sup> K]	0,57	0,22
U-verdi tak [W/m <sup>2</sup> K]	0,35	0,18
U-verdi gulv mot grunn og mot det fri [W/m <sup>2</sup> K]	0,21	0,18
U-verdi glass/vinduer/dører [W/m <sup>2</sup> K]	1,9	1,2
Lekkasjetall (lufttetthet ved 50 Pa trykkforskjell) [luftvekslinger pr time]	3,0	1,5

Figur 15: Evaluering og resultater simulert opp mot minstekravene i TEK17.

Etter å ha gjennomført simuleringen ser man at bygget ikke tilfredsstillende forskriftskravene verken til energiramme eller minstekrav. Totalt beregnet energibehov blir 244,1 kWh/m<sup>2</sup> som er over dobbelt så høyt som forskriftskravet. Siden bygget tidligere har vært gjennom rehabiliteringer og har nå vannbåren varme og balansert ventilasjon tilfredsstillende det krav til luftmengder og at bygget ikke benytter fossile brensel til oppvarming. Til tross for dette benytter ventilasjonsanlegget for mye energi og tiltak som en bedre varmegjenvinner kan bidra til å senke energiforbruket.

Deretter gjennomføres en års simulering som simulerer alle byggets soner for et helt år med forhåndsdefinert klima og interlaster. Dette gir et mer realistisk anslag på byggets energiforbruk i forhold til evalueringen, og man kan også sammenligne byggets energibehov med levert energi. Byggets totale netto energibehov kommer ut på 225,7 kWh/m<sup>2</sup>, mens netto levert energi blir 194,1 kWh/m<sup>2</sup>. Grunnen til at det er en differanse mellom disse er fordi bygget benytter varmepumper som selv generer energi.

Energibudsjett			
Energipost	Energibehov	Spesifikt energibehov	
1a Romoppvarming	977916 kWh	75,7 kWh/m <sup>2</sup>	
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	669256 kWh	51,8 kWh/m <sup>2</sup>	
2 Varmtvann (tappevann)	64764 kWh	5,0 kWh/m <sup>2</sup>	
3a Vifter	368282 kWh	28,5 kWh/m <sup>2</sup>	
3b Pumper	13951 kWh	1,1 kWh/m <sup>2</sup>	
4 Belysning	340681 kWh	26,4 kWh/m <sup>2</sup>	
5 Teknisk utstyr	453675 kWh	35,1 kWh/m <sup>2</sup>	
6a Romkjøling	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>	
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	28093 kWh	2,2 kWh/m <sup>2</sup>	
Totalt netto energibehov, sum 1-6	2916619 kWh	225,7 kWh/m <sup>2</sup>	

Levert energi til bygningen (beregnet)			
Energivare	Levert energi	Spesifikk levert energi	
1a Direkte el.	1352894 kWh	104,7 kWh/m <sup>2</sup>	
1b El. til varmepumpesystem	368843 kWh	28,5 kWh/m <sup>2</sup>	
1c El. til solfangersystem	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>	
2 Olje	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>	
3 Gass	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>	
4 Fjernvarme	786327 kWh	60,8 kWh/m <sup>2</sup>	
5 Biobrensel	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>	
6. Annen energikilde	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>	
7. Solstrøm til egenbruk	-0 kWh	-0,0 kWh/m <sup>2</sup>	
Totalt levert energi, sum 1-7	2508065 kWh	194,1 kWh/m <sup>2</sup>	
Solstrøm til eksport	-0 kWh	-0,0 kWh/m <sup>2</sup>	
Netto levert energi	2508065 kWh	194,1 kWh/m <sup>2</sup>	

Figur 16: Energibudsjett og levert energi til bygningene.

Byggets energibudsjett kan sammenlignes mot byggets faktiske energibudsjett for 2021 som var 198,8 kWh/m<sup>2</sup>. Dette er noe lavere enn det teoretiske forbruket, men kan være realistisk da 2021 var et spesielt år på grunn av koronapandemien. Dette førte til mye hjemmekontor som kan ha bidratt til et lavere energiforbruk enn ved normal drift.

Årlige utslipp av CO <sub>2</sub>		
Energivare	Utslipp	Spesifikt utslipp
1a Direkte el.	175876 kg	13,6 kg/m <sup>2</sup>
1b El. til varmepumpesystem	47950 kg	3,7 kg/m <sup>2</sup>
1c El. til solfangersystem	0 kg	0,0 kg/m <sup>2</sup>
2 Olje	0 kg	0,0 kg/m <sup>2</sup>
3 Gass	0 kg	0,0 kg/m <sup>2</sup>
4 Fjernvarme	58975 kg	4,6 kg/m <sup>2</sup>
5 Biobrensel	0 kg	0,0 kg/m <sup>2</sup>
6. Annen energikilde	0 kg	0,0 kg/m <sup>2</sup>
7. Solstrøm til egenbruk	-0 kg	-0,0 kg/m <sup>2</sup>
Totalt utslipp, sum 1-7	282800 kg	21,9 kg/m <sup>2</sup>
Solstrøm til eksport	-0 kg	-0,0 kg/m <sup>2</sup>
Netto CO <sub>2</sub> -utslipp	282800 kg	21,9 kg/m <sup>2</sup>

Figur 17: Årlig utslipp av CO<sub>2</sub> fra Sentralbygg 1 og 2.

Det er også interessant å se på byggets netto CO<sub>2</sub>-utslipp og hvordan dette kan reduseres ved å effektivisere de tekniske systemene, oppgradere bygningskroppen og senke byggets energiforbruk. Netto CO<sub>2</sub>-utslipp blir 21,9 kg/m<sup>2</sup> og det er rimelig å anta at dette tallet kunne vært en del høyere om bygget i større grad hadde basert seg på elektrisitet.

## 5. Resultater

### 5.1 introduksjon

Etter å ha gjennomført en energisimulering av byggene, skal det legges frem forslag til tiltak som kan bidra til å energi effektivisere høyblokkene. Tiltakene er delt inn i to konsepter og har ulike løsninger som kan senke energiforbruket, samt gi bygget et nytt arkitektonisk uttrykk. Konsept 2 tar sikte på å nå kravene i TEK17 både når det kommer til minstekravene og den gjeldende energirammen for kontorbygninger som er på 115 kWh/m<sup>2</sup>. Konsept 1 er et mer omfattende tiltak som ikke bare forsøker å senke byggets netto energibehov, men også ser på muligheten for lokal fornybar energiproduksjon og lagring av denne energien. I dette konseptet undersøkes det om høyblokkene kan nå passivhusstandard og om bygget kan driftes med null utslipp av klimagasser. Til slutt vurderes konseptene i nye simuleringer som vil gi svar på om det er mulig å nå de ambisjonene som er satt.

### 5.2 Felles tiltak for begge konsept

#### 5.2.1 Rehabilitering av betong

Tidligere har det vært en vanlig oppfatning at betong er vedlikeholdsfritt og evigvarende. I senere tid har man sett at dette ikke er tilfellet og at betong blir som alle andre materialer blir utsatt for nedbrytningsmekanismer og mister sine egenskaper over tid [44]. Dette er også tilfellet for høyblokkene hvor betongen er 60 år gammel og det er rimelig å anta at de utsatte delene krever rehabilitering. Brystningselementene har sannsynligvis liten eller ingen restlevetid, og siden de er tynne, gamle og har dårlig isoleringsevne vil disse rives og erstattes med en ny vegg. Søylene på langsiden vil rehabiliteres søyle for søyle slik at de er opprettholder den standarden som er nødvendig og får en lengre levetid. Dette vil gjøres ved å fjerne 5cm betong og sprøyte på ny. På denne måten vil man kunne oppdage sprekker i betongen eller korrosjonsproblemer i armeringen og rehabilitere etter behov. Gavlveggene har vært utsatt for mye vær og vind oppover årene og har derfor blitt rehabilitert i flere runder tidligere. Disse veggene er spesielt viktige for høyblokkenes stabilitet da det er armeringen i disse veggene som tar opp mye av strekkraftene byggene blir utsatt for [1]. Det er derfor viktig å sørge for at overdekningen beskytter armeringen, og disse veggene skal derfor igjen rehabiliteres ved å fjerne noe av betongen og erstatte den med ny. Innsiden av gavlveggene er isolert med *siporexplater* som også er kalt *porebetong*. Dette materialet har svært dårlige varmeegenskaper sammenlignet med dagens isolasjonsmaterialer og vil derfor fjernes. [45]



### 5.2.2 Takkonstruksjon

Felles for begge konseptene er at taket skal totalrenoveres og eksisterende isolasjon og taktekking over betongdekket fjernes. Det nye taket skal være et rettvendt kompakt tak. Det første sjiktet over betongen er dampsperran som skal utføres med sveiste skjøter for å sørge for et tett sjikt [46].

Over dampsperran legges to stykk 120mm tykke betongunderlagsplater og på toppen av dette legges en 100mm tykk hardrock energyplate. Topplaten har en høyere densitet enn betongunderlagsplatene og vil derfor fordele trykk og sikre taket mot punktlaster [47]. På toppen benyttes asfalt takbelegg til taktekking. Dette er en løsning som gir en bedre u-verdi enn minimumskravene i TEK17. For å sikre avrenning skal taket skal utformes med et tosidig fall på 1:40 mot en nedsenket renne med flere sluk [46]. På toppen benyttes asfalt takbelegg til taktekking. Dette er en løsning som gir en bedre u-verdi enn minimumskravene i TEK17. For å sikre avrenning skal taket skal utformes med et tosidig fall på 1:40 mot en nedsenket renne med flere sluk [46].

Taket skal ha en mekanisk innfestning slik at det holder seg på plass i all slags vær og vind. Isolasjonen og takbelegget festes i betongdekket ved at det monteres betongskruer og festemiddel i forborede hull. På asfaltbelegget benyttes festebrikker uten pigger til innfesting. [48].

### 5.2.3 Kjeller

Kjelleren er kun isolert på innsiden med 100mm treull. Dette er en løsning som kan føre til fukt og soppdannelse, da isolasjonen på innsiden hindrer varmen i rommet og tørke ut eventuell fukt i kjellerveggen. Kjellerveggene skal derfor dreneres og etterisoleres med 150mm XPS på utsiden som kles med grunnmurplater og pusses over terreng [49].

Gulvet er en uisolert betongplate på 100mm uten isoleringsmaterialer. Dette skal utbedres og det støpes et nytt betonggulv på eksisterende gulv. Konstruksjonen bygges opp med 100 mm isolasjon av polystyren, radon og fuktsperre og et 50mm tykt betonggolv med vannbåren varme [50].

#### 5.2.4 Planløsning

Siden mesteparten av arealet på begge byggene benyttes som kontorlokaler, er det viktig å ta hensyn til hvordan utformingen av lokalene blir. Ved å endre på skillevegger, og legge opp til en mer åpen og fleksibel løsning, er det mulig å forbedre trivselen til lokalene, og slippe inn mer dagslys. Dette kan også være effektivt med tanke på energibruken til belysning og ventilasjon, dette blir drøftet i senere kapittel om teknisk utstyr.

Ved å endre om til et åpent kontorlandskap, og legge til flere moderne elementer i innredning, kan det bli en mer komfortabel atmosfære. Det legger også til rette for at det blir mer fleksibilitet med tanke på å omorganisere plasser, samtidig som det blir mer vennlig for rullestolbrukere. Siden NTNU har mange stipendiater som noen ganger ikke skal ha langvarig kontorplass, kan det bli en fordel å legge til rette for at det blir fleksibelt å bytte og omorganisere plasser. [51].

### 5.3 Konsept 1

#### 5.2.1 Gavlvegger

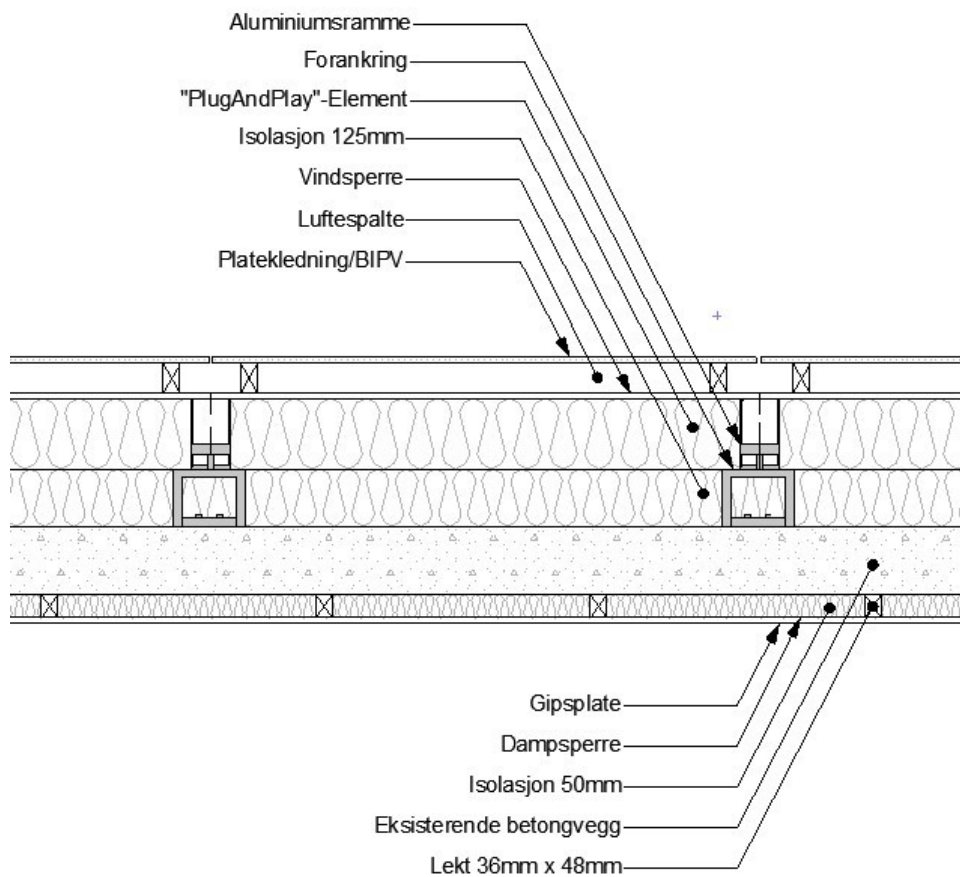
De massive gavlveggene skal etterisolerers med et «Plug-and Play»-fasadesystem. Systemet deler vegg i tre lag som er eksisterende vegg, hulrom og veggelementet. På den eksisterende vegg boltes det fast stålankre som skal fungere som oppheng til elementene. Hulrommet fylles med isolasjon og blir med unntak av ankrene et gjennomgående isolasjonssjikt som både bryter kuldebroer og tar opp ujevnheter i eksisterende konstruksjon. Elementene kommer som en komplett vegg med isolasjon, vindsperre og en luftet platekledning.

Hvert element måler 1200mm x 3000mm og har i motsetning til vanlige bindingsverksvegger en aluminiums ramme som gir den stivhet. Gavlveggene vil benytte fasadeplater av steinkompositt i ulike farger, og deler av vestsiden vil kles med bygningsintegreerte solceller. Aluminiumsrammen er som tidligere nevnt, utstyrt med isoleringsprofiler som sammen med isolasjonssjiktet bak elementet skal effektivt fungere som en kuldebro bryter. For å sikre at fasaden blir luft og vanntett er det en serie EPDM gummipakninger rundt rammen som festes til omliggende elementer [26]. Systemet baserer seg på at elementene henges i toppen etter ankerpunktene. Hvert element henges i to lastbærende ankerpunkter med unntak av de på første nivå som henges etter fire punkter.



Festesystemet tillater vertikal og horisontal justering av elementene. Monteringer skjer med bistand av kran og starter på et av hjørne på nivå 1 og monteres deretter etasje for etasje oppover på fasaden.

Elementene skal utformes med et 155mm tykt isolasjonssjikt av mineralull, gipsplater som vindsperre, 64mm luftespalte og plateledning. Hulrommet skal fylles med 125mm steinull som monteres på betongveggen med festeplugger. Innsiden av betongveggen lektes ut og isoleres med ytterligere 50 cm mineralull og kles med gipsplater. Nytt elektrisk anlegg kan dermed legges skjult og ny kontinuerlig dampspærre etableres. Figuren under viser den nye oppbyggingen av veggen.



Figur 18: Oppbygging av Plug and play-vegg.

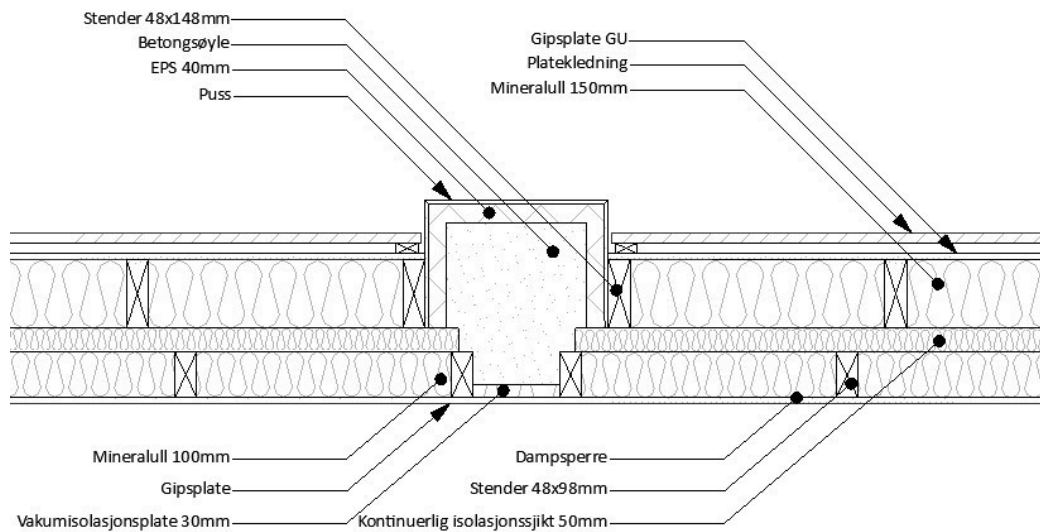
### 5.2.2 Langsider

Sør- og nordveggen har synlige gjennomgående betongsøyler som er en dårlig løsning og fører til problematikk med kuldebroer. Under rehabiliteringen av søylene skal disse derfor isoleres med 40mm ekspandert polystyren (EPS) plater som festes med klebemørtel og festeplugger, og som til slutt vil få en armert pusset overflate. EPS platene kommer som spesialbestilte profiler som er tilpasset søylenes form og gir dermed færre festepunkter og skjøter. Mellom betongsøylene vil det benyttes TES-elementer som forankres innvendig til betongdekkene.

Elementene har målene 1100mm x 12000mm og passer dermed inn mellom søylene og strekker seg 4 etasjer. Denne løsningen vil lukke bygget på en rask og effektiv måte og det blir færre skjøter mellom elementene. Veggen kommer som et åpent element slik at det er mulig å inspisere etter feil og det blir mindre sannsynlighet for fuktproblematikk. Elementet består av bindingsverk med 48mm x 148mm konstruksjonsvirke, GU gipsplate som vindsperre, vinduer og fasadeplater montert som luftet kledning.

Deler av sørsiden kles med bygningsintegreerte solceller som erstatter fasadeplatene. Ved montering må det brukes vindtettingstape på skjøtene. Etter at elementene er på plass fylles veggen med mineralull og det monteres konveksjonssperre. Veggen skal ha en løsning med dobbelt bindingsverk og det bygges derfor et nytt utfyllende bindingsverk 50 mm inntrukket på etasjeskiller som gir plass til et kontinuerlig isolasjonssjikt. Dette bindingsverket består av 48mm x 98mm konstruksjonsvirke i c/c 600mm.

Betongsøylene isoleres med 30mm vakuum-isolasjonsplater på innsiden som har svært gode termiske egenskaper. Figur 20 visualiserer veggens nye utforming. Det massive veggpartiet på sørsiden isoleres på samme måte som gavlveggene og er beskrevet i tidligere kapittel.



Figur 19: Oppbygging av vegg og isolering av betongsøyle.

### 5.2.3 Vinduer

For å minimere varmetap byttes alle byggets vinduer. De nye vinduene vil ha 4 lags isolerglass med argongass, to belagte glass, isolert karm og ramme, og en varmkant som *spacer*. Rammen består av tre og skal kles i aluminium for å gi en vedlikeholdsfri overflate. Dette gir vinduet en teoretisk  $u$ -verdi på  $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$  [52]. Vinduene leveres med dimensjonene  $880 \text{ mm} \times 1590 \text{ mm}$  og er vertikalt glidehengslet.

Vinduene leveres med elektrokrome glass som vil fungere som solskjerming. Dette gir vinduene en dynamisk styring og man kan justere hvor mye lys som slipper inn etter behov. Solskjermingen kan gi et bedre inn klima og sørge for lavere energiforbruk knyttet til oppvarming og nedkjøling.

#### 5.2.4 Tekniske systemer

Ventilasjonssystemet skal byttes ut til et *DCV-system (Demand Controlled Ventilation)* hvor luftmengdene reguleres automatisk etter behov. Bygget deles inn i soner på romnivå og får tilbakemelding fra sensorer om luftkvaliteten er som ønsket. Løsningen vil gi bedre luftkvalitet og inneklime, samt sørge for at det ikke går med unødvendig energiforbruk til å ventilere rom som ikke brukes slik de er dimensjonert.

For å sikre at systemet regulerer seg ned etter behov vil det ha en såkalt «*optimizer*» funksjon som sørger for å regulere ned viftene så mye som mulig, samtidig som det sørger for at minimum et grenspjeld står nesten helt åpent til enhver tid. [53] Denne løsningen gjør at man kan dimensjonere med midlere luftmengder på  $7 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ .

Systemet vil også ha en SFP faktor som tilfredstiller dagens krav på  $>1,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$  og en betraktelig bedre års gjennomsnittlig temperaturvirkningsgraden for varmegjenvinner. Dagens ventilasjonssystemer har varmegjenvinnere som måler opp mot 90% temperaturvirkningsgrad under best mulige forhold og dimensjonerende temperaturvirkningsgrad på det nye systemet settes derfor til 86% [54]. Med en vesentlig oppgradering av bygningskroppen vil bygget få et lavt oppvarmingsbehov selv på kalde dager. Dette gjør at store deler av oppvarmingsbehovet vil dekkes av temperert tilluft. Likevel vil bygget fortsette å benytte fjernvarme da dette er en god og effektiv varmekilde og vil fungere som spisslast [55].

For å senke driftskostnader og energiforbruk skal også lysanlegget oppgraderes. Det skal skiftes til et nytt behovsstyrt anlegg med optimalisering av punktplasseringer. Denne investeringen vil gi besparelser på sikt da anlegget vil driftes mer effektivt.

### 5.2.5 Solceller

Store deler av sør og vestfasaden skal kles i bygningsintegrerte solceller som ikke bare vil produsere energi, men også fungere som klimaskjerm. Det er flere bygninger i området som kan skygge for solcellene på ulike tidspunkter og derfor kles fasadene i solceller fra 4. etasje og oppover. Det benyttes samme leverandør som ZEB-laben på Gløshaugen som tilbyr høyeffektive solcellepanel med stor designfrihet når det kommer til farge, fasong og overflate [56]. Panelene kommer med en *satin* overflate i 3 forskjellige farger og kledningen fra 1-4.etg vil utformes med samme glans og fargekode slik at bygget får et helhetlig uttrykk. Systemet kommer ferdig integrert i *Plug and Play* elementene og monteres direkte på veggen og kobles sammen. Totalt vil 576m<sup>2</sup> av sørveggen og 330m<sup>2</sup> av vestveggen bestå av bygningsintegrerte solceller.

Det skal også monteres solceller på takkonstruksjonen med en helning på 10 grader og retning mot øst og vest. Denne vinkelen gjør at ikke skygges for nærliggende panel, men regnvann fortsatt renner av [31]. Totalt plasseres det 280 kvadratmeter med solcellepanel på taket. Disse plasseres på en forhøyet sokkel som er forankret til betongdekket og tekking inn. Dette er en løsning som gir mindre sjanse for skader på tekkingen som igjen kan føre til fuktskader, da vindkrefter tas opp av betongdekket [57].

### 5.2.6 Energilagring

Et solcelleanlegg har mulighet til å begrense kostnadene under effekttoppene på vinteren og gir mulighet for å selge overskuddsstrøm tilbake til nettet på sommeren. Noe av utfordringen med et så stort solcelleanlegg er at man ikke på noe tidspunkt kan mate strømmettet med mer enn 100 KW. Hvis dette skjer, gjelder andre vilkår for salget og man kan bli nødt til å strupe deler av produksjonen for å holde seg under grensen [31]. Det skal derfor installeres et system for energilagring i det tekniske rommet i kjelleren. Systemet skal baseres på brukte, eller såkalte *2nd life Li-ionebatterier*. Dette er batterier som benyttes i elbiler, men som fortsatt har igjen 70-80% energilagringsskapasitet ved slutten av sitt livsløp. Dette er en bærekraftig måte å gjenbruke et produkt på som er i økende produksjon.

Ved en termisk hendelse vil det kunne produseres giftige gasser fra batteriene og det er derfor viktig at batterirommet er godt ventilert. Av sikkerhetsmessige årsaker må ventilasjonen til dette rommet ha en separat rørføring fra resten av ventilasjonsanlegget [58].

Systemet skal kunne kommunisere med byggets sentrale driftsanlegg og ha tilgang på værvarsler og strømpriser. Med denne informasjonen kan systemet optimalisere bruken av batteriene og man kan oppnå maksimal besparelse. Batteriene skal kunne stilles i to moduser som er vinter- og sommermodus. På vinteren skal batteriene lades på nettene og denne strømmen skal brukes til å ta av effekttoppene på dagtid. I sommermodus skal batteriene lades av solcelleanlegget gjennom dagen og overskuddet skal selges til strømmettet under effekttopper eller benyttes på dager uten sol og med energibehov [58].

### 5.2.7 Visualisering



*Figur 20: Visualisering av Sør og Øst fasaden til Sentralbygg 1 og 2.*



*Figur 21: Visualisering av Øst og Nord fasaden til Sentralbygg 1 og 2.*



## 5.2.6 Resultater Konsept 1

Etter å ha gjennomført en evaluering mot forskriftene kommer det frem at bygget tilfredsstillende kravet til energiramme og er godt innenfor minstekravene i TEK17. Med en vesentlig oppgradert bygningskropp og et helt nytt ventilasjonssystem evalueres bygget mot passivhuskriteriene. Det knyttes stor usikkerhet til om bygget tilfredsstillende minstekravet til enkeltkomponenter og spesielt kravet til normalisert kuldebro verdi. De gjennomgående betongsøylene er isolert med vakuum-isolasjonspaneler som har en svært god isoleringsevne og er benyttet fordi det er dårlig plass til isolasjonsmaterialer bak søylene. Dette er gjort i et forsøk på å nå minstekravet til normalisert kuldebro verdi på  $0,03 \text{ W/m}^2\text{K}$ , men det er vanskelig å trekke en konklusjon på om dette er tilstrekkelig. I verste fall kan man kalle konseptet en ambisiøs renovering med passivhuskomponenter.

Resultater av evalueringen		Beskrivelse
Evalueringskriterium	Resultat	Beskrivelse
Evalueringsramme	Bygningen tilfredsstillende kravet for varmetapstall	
Energiytelse	Bygningen tilfredsstillende krav til energiytelse	
Minstekrav	Bygningen tilfredsstillende ikke minstekrav til enkeltkomponenter	
Luftmengder ventilasjon	Luftmengdene tilfredsstillende minstekrav gitt i NS3701 (tabell A.2)	
Samlet evaluering	Bygningen tilfredsstillende ikke alle krav til passivhus	

Varmetapsbudsjett		Verdi
Beskrivelse		Verdi
Varmetapstall yttervegger		0,07
Varmetapstall tak		0,01
Varmetapstall gulv på grunn/mot det fri		0,01
Varmetapstall glass/vinduer/dører		0,10
Varmetapstall kuldebroer		0,05
Varmetapstall infiltrasjon		0,03
Totalt varmetapstall		0,28
Krav varmetapstall		0,40

Figur 22: Resultater fra simulering.



Energiytelse		
Beskrivelse	Verdi	Krav
Netto oppvarmingsbehov	17,4 kWh/m <sup>2</sup>	24,1 kWh/m <sup>2</sup>
Netto kjølebehov	2,0 kWh/m <sup>2</sup>	6,2 kWh/m <sup>2</sup>
Gjennomsnittlig effektbehov belysning	4,0 W/m <sup>2</sup>	4,0 W/m <sup>2</sup>

Minstekrav enkeltkomponenter		
Beskrivelse	Verdi	Krav
U-verdi glass/vinduer/dører [W/m <sup>2</sup> K]	0,60	0,80
Normalisert kuldebroverdi [W/m <sup>2</sup> K]	0,05	0,03
Årsmidlere temperaturvirkningsgrad varmegjenvinner ventilasjon [%]	86	80
Spesifikk vifteeffekt (SFP) [kW/m <sup>3</sup> /s]:	1,50	1,50
Lekkasjetall (lufttetthet ved 50 Pa trykkforskjell) [luftvekslinger pr time]	0,50	0,60

Figur 23: Minstekrav og energiytelse fra simulering.

Det gjennomføres også en års simulering som viser at det nye netto energibehovet er på 80,4 kWh/m<sup>2</sup> som er en nedgang på ca. 64%.

Energibudsjett		
Energipost	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	6584 kWh	1,1 kWh/m <sup>2</sup>
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	32246 kWh	5,2 kWh/m <sup>2</sup>
2 Varmtvann (tappevann)	30950 kWh	5,0 kWh/m <sup>2</sup>
3a Vifter	72225 kWh	11,6 kWh/m <sup>2</sup>
3b Pumper	5066 kWh	0,8 kWh/m <sup>2</sup>
4 Belysning	128965 kWh	20,6 kWh/m <sup>2</sup>
5 Teknisk utstyr	214855 kWh	34,4 kWh/m <sup>2</sup>
6a Romkjøling	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	11574 kWh	1,9 kWh/m <sup>2</sup>
Totalt netto energibehov, sum 1-6	502465 kWh	80,4 kWh/m <sup>2</sup>

Årlige utslipp av CO2		
Energivare	Utslipp	Spesifikt utslipp
1a Direkte el.	55963 kg	9,0 kg/m <sup>2</sup>
1b El. til varmepumpesystem	2025 kg	0,3 kg/m <sup>2</sup>
1c El. til solfangersystem	0 kg	0,0 kg/m <sup>2</sup>
2 Olje	0 kg	0,0 kg/m <sup>2</sup>
3 Gass	0 kg	0,0 kg/m <sup>2</sup>
4 Fjernvarme	4011 kg	0,6 kg/m <sup>2</sup>
5 Biobrensel	0 kg	0,0 kg/m <sup>2</sup>
6. Annen energikilde	0 kg	0,0 kg/m <sup>2</sup>
7. Solstrøm til egenbruk	-13317 kg	-2,1 kg/m <sup>2</sup>
Totalt utslipp, sum 1-7	48681 kg	7,8 kg/m <sup>2</sup>
Solstrøm til eksport	-4963 kg	-0,8 kg/m <sup>2</sup>
Netto CO2-utslipp	43718 kg	7,0 kg/m <sup>2</sup>

Figur 24: Energibudsjett og levert energi til bygningen.

Simien beregner også netto CO<sub>2</sub>-utslipp for drift av bygget. Utslippene har gått ned fra 21,9kg/m<sup>2</sup> til 7,0 kg/m<sup>2</sup> som er en nedgang på 68%. Dette betyr at bygget fortsatt har utslipp av klimagasser og at det må gjennomføres ytterligere tiltak for å at det skal kunne kategoriseres som en ZEB –O.

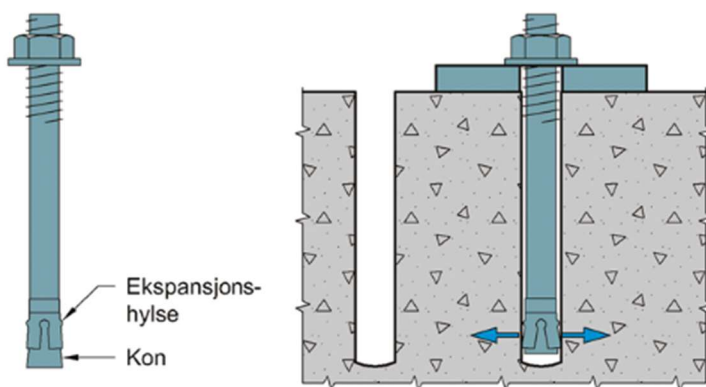
### 5.3 Konsept

#### 5.3.1 Gavlvegger

Som tidligere nevnt, har gavlveggene blitt utsatt for mye vær og vind, og er viktige for bygningen sin stabilitet [1]. Siden veggen altså er armert og bærende, blir det viktig å prosjektere en løsning som vil beskytte den bærende konstruksjonen, men også isolere og bryte kuldebroer. Ved renovering av en slik vegg, bør man plassere isolasjonen på utsiden, fordelene med å etterisolere utvendig er at hele betongveggen blir isolert. Dette gjør at man unngår å få dårlig isolerte felter [21], som beskytter konstruksjonen mot korrosjon, og det vil samtidig fungere som en kuldebro bryter.

Utvendig isolasjon med luftet kledning blir utført i henhold til prinsippet om tottrinnetting [21], det vil da bli montert vindspærre og kledningen vil fungere som en regnskjerm. Dette blir viktig siden veggen kan bli utsatt for mye slagregn, dermed blir vann som trenger bak kledningen drenert ut, og luftsirkulasjonen gjør at det tørker [21]. Påfôringen og stendere kan bli festet med betong ankre i form av ekspansjonsankere som vist i figuren under [59]. Dette er en festemetode som tåler mye belastning, og blir brukt i lignende sammenhenger.

Innfestningsmetode burde bli vurdert av konstruksjonsingeniør.



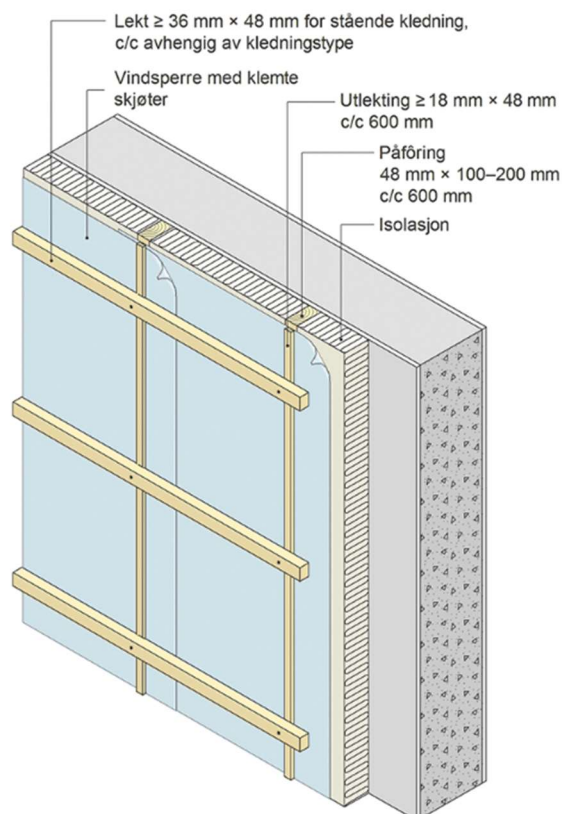
Figur 25: Festemetode for stendere. Hentet fra [59]

Isolasjonstykkelsen blir prosjektert for å opprettholde U-verdi kravet i TEK17, og må dermed være  $\leq 0,22 \left[ \frac{W}{(m^2K)} \right]$  [60]. For å være innenfor dette kravet, blir det isolert med 148mm utvendig, og 48mm innvendig.

Med denne oppbyggingen blir u-verdi på x utregning av u-verdier blir lagt med i vedlegg.

Innsiden av veggen vil da bli isolert for å få plass til elektrisk anlegg, og videre forbedre u-verdien til veggen. Siden innvendig isolasjon skal rives, og veggen senere skal etterisoleres, blir det nødvendig å demontere teknisk utstyr og radiatorer som er fastmontert veggen. Som *Plug and play* løsningen, vil innsiden av veggen vil bli lektet ut og isolert med 48mm isolasjon. Innvendig kledning vil bli utført som gipsplater, slik at det er mulig å montere stikkontakter, CO<sub>2</sub> følere, radiatorer og annet teknisk utstyr.

Oppbyggingen av veggen vil bli gjennomført som vist i figuren under. Etter veggen har blitt isolert og kledd inn, vil isolasjon og innvendig kledning bli gjennomført. Siden tykkelsen er større enn 100mm, burde konstruksjonen og isolasjonen som påføres bli støttet opp i bunnen [61], dette vil det bli tatt en vurdering på av konstruksjonsingeniør.



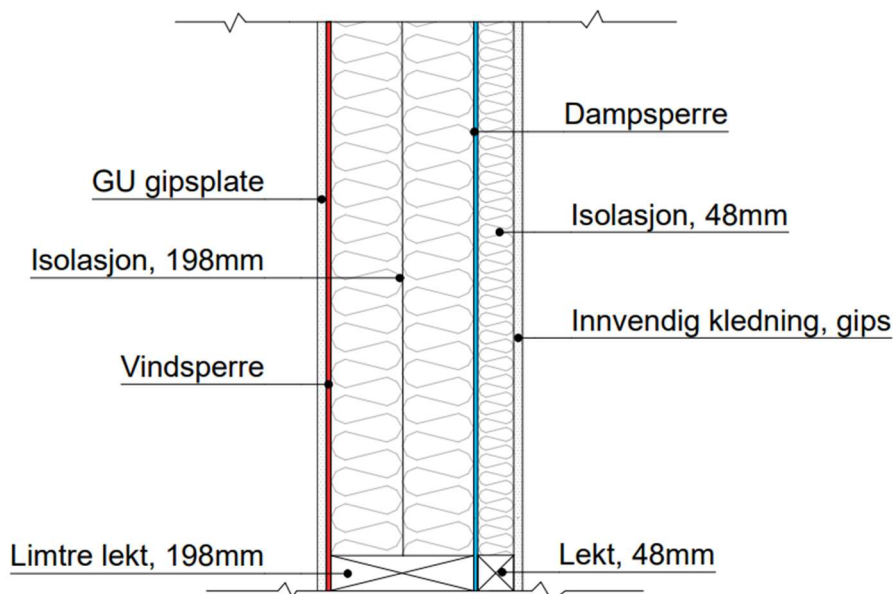
Figur 26: Prinsipp for etterisolering av betongvegger. Hentet fra [61].

## 5.3.2 Langsider

På bakgrunn av møte som ble gjort med professor Arne Mathias Selberg, kom det frem at betongelementene på nord og sør-siden av byggene har liten levetid, og burde dermed rives. [1]. For å erstatte disse betongelementene, vil prefabrikkerte elementer i tre være en god løsning, siden disse kan produseres og tilpasses slik at de får samme dimensjon som betongelementene. Siden utviklingen av prefabrikkerte løsninger har blitt mer og mer utbredt i løpet av de siste årene, finnes det mye dokumentasjon og kunnskap om slike løsninger. Flere aktører har begynt å satse på salg og produksjon av prefabrikkerte elementer i tre, og via e-post korrespondanse, ble det redegjort at elementene kan produseres og leveres med dimensjoner som passer mellom betongsøylene på nord og sør-siden på Sentralbygg 1 og 2 [62]. For at veggen skal ha en u-verdi som samsvarer med kravene i byggeteknisk standard TEK17, ble prosjekteringen av disse elementene gjennomført med kravet for u-verdi. Dermed ble utgangspunktet for utformingen av elementene prosjektert deretter.

U-verdi være  $\leq 0,22 \left[ \frac{W}{(m^2K)} \right]$  [60].

Figuren under viser hvordan de prefabrikkerte elementene kan bli produsert, elementene vil da bli levert slik, og bli heist på plass med kran, og montert. Senere vil arbeidet med å montere fasadeløsning påbegynt.



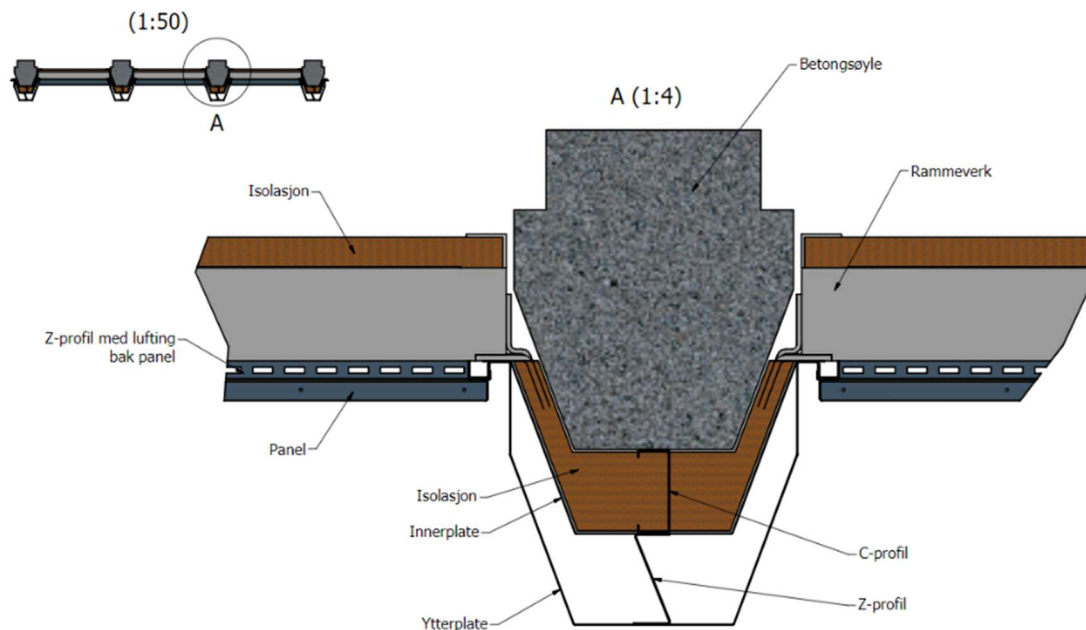
Figur 27: Prefabrikkerte elementer

Modulen blir da levert med dampspærre, 198mm isolasjon, vindsperre og utvendig kledning. Dampspærre vil her sørge for et luft- og damptett sjikt på innsiden av veggen [63]. Dette vil hindre både luftlekkasjer og vandampdiffusjon i veggen. Vindsperre vil hindre uteluft i å trenge inn i varmeisolasjonen, og svekke isoleringseffekten [63]. Siden modulene vil bli festet imellom betongsøylene, kan det forekomme en situasjon der dampspærre ikke blir kontinuerlig festet, det samme gjelder også med vindsperre. Så selv om det blir mulig å levere moduler med disse komponentene, er det usikkert om det blir mulig å gjennomføre renoveringen med kontinuerlig damp- og vindsperre.

Fra tegningene av Sentralbyggene kom det tydelig frem at betongsøylene på nord og sør siden er bærende eksponerte elementer, disse søylene vil ha et stort kuldebro bidrag og gi vesentlig dårligere u-verdi enn resten av konstruksjonen. Isolasjonen burde være ubrutt og usvekket rundt bygningskroppen for å unngå større varmetap og komforttap. Utvendig isolering vil øke temperaturen til betongelementer, som gjør at det blir mindre fare for kondens [21].

Utvendig kledning blir viktig både med tanke på estetikk, og for å beskytte konstruksjonen mot klimapåkjenninger, og mekaniske skader [63]. Kledningen lektes ut, slik at bindingsveggen får lufting, og eventuelt vann kan dreneres ut. Kledningen som har blitt prosjektert på denne løsningen er perforert aluminiumsplate, som lages av resirkulert materiale. Dette er også en kledningsløsning som er positivt for klimagassregnskapet. En lignende løsning ble gjort på et renoveringsprosjekt i Fredrik Selmers vei 4 [64].

Selv om det er viktig å ha ubrutt isolering på veggen, kan det være vanskelig å gjennomføre en god løsning på isolering og festing av fasadeløsning. På konstruksjonsdeler som har en spesiell type form, kan det bli en utfordring med tanke på gjennomføring av isolering og fasadeløsning. En lignende renovering ble gjort på «1963 bygget» på Norges Handelshøyskole, og det ble sendt en forespørsel om innsyn til prosjekteringen som ble gjort på dette prosjektet. Kommunikasjonen ble gjort på e-post, og det ble beskrevet hvordan søylene og elementene ble isolert og kledd inn. Løsningen er vist i figuren under.



Figur 28: Detalj av isolasjon- og fasadeløsning på 1963 bygget. Hentet fra [65].

Renoveringen av dette prosjektet ble ikke gjennomført etter kravene i TEK17, eller passivhusstandard, men det kommer tydelig frem hvordan etterisolering av de eksponerte betongsøylene ble gjort, og hvordan fasadeløsningen ble gjennomført.

Her ble det brukt to typer stålprofiler i kombinasjon for å feste fasadekledning og lufting. Dette er en løsning som kan løse problematikken med isolering av betongsøylen, og montering av kledning uten å påvirke det estetiske. Løsningen som ble brukt for å isolere gavlveggene vil også bli anvendt på områdene på langsiden som har plass støpt betongvegger. Modulene kan bli festet i søylene og etasjeskiller, for å ta opp horisontale krefter. De vertikale kreftene blir i hovedsak tatt opp av modulene, som betyr at rammeverket til modulene må være dimensjonert slik at de kan bære trykk kreftene fra de modulene over. Kreftene som vil virke på elementene er: [27]

- Vindlaster
- Egenlast
- Eventuelle tvangskrefter

Hvis betongelementene har kapasitet til å bære kreftene fra modulene, vil modulene kunne festes og forankres i betongen. Det kan da brukes stålvinkler og ankre eller skruer som er beregnet for innfestning i betong [27], modulene vil også kunne festes fast i tre stendere som monteres fast i søylene.



### 5.3.3 Vinduer

Vinduer er den bygningsdelen som ofte har dårligst u-verdi, og blir har stort energieffektiviseringspotensiale [66]. Spesielt på bygninger med stort samlet vindusareal, vil varmeisoleringssevnen til vinduene ha mye å si for det totale energiforbruket. Ved å velge vinduer med høy u-verdi, vil det sikre at vinduene isolerer godt mot kulde om vinteren, som forbedrer oppvarmingsbehovet.

Når det blir høyere temperatur ute, og solen fører til større oppvarming av bygget, vil det være kritisk at man har god solskjerming.

De prefabrikkerte elementene leveres med vinduer etter TEK17 standard, u-verdien til vinduer vil være;  $\leq 1,2 \left[ \frac{W}{(m^2K)} \right]$ . For å holde u-verdien innenfor dette kravet, kan isolerte ruter med tre lags glass, med isolert karm og ramme være en god løsning. Vinduene blir plassert i flukt med isolasjonssjikt, for å få kuldebroen ned, og innvendig overflatetemperatur opp [21].

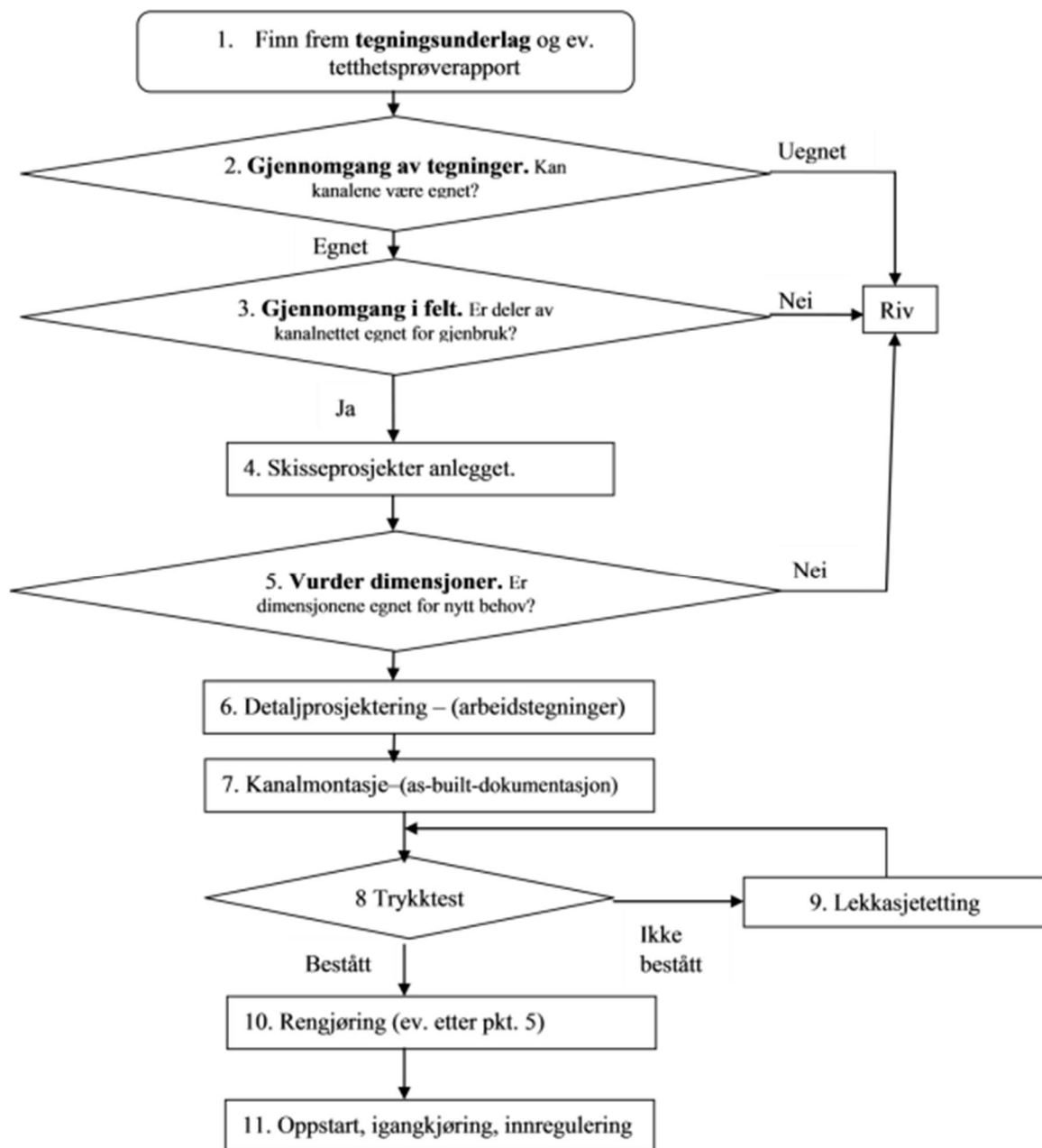
### 5.3.4 Tekniske systemer

Som tidligere nevnt i kapittel 4, ble det gjort oppgraderinger på ventilasjonssystemet, der det ble installert nytt kanalnett, og det ble montert følere og styring til systemet. Dette ble tatt i betraktning under simuleringene av bygget, og tallene fra simuleringen viste at det ble brukt mye energi under drift av dette systemet. Disse resultatene ble grunnlaget for å prosjektere en renoveringsløsning på dette systemet.

Det ble gjennomført en omfattende renovering på en bygning i Solbråveien 23, som har blitt beskrevet i Sintef rapport 15, om gjenbruk av ventilasjonskanaler. Der ble eksisterende kanalnett vurdert for gjenbruk, med oppgradering til moderne styring og nye komponenter i teknisk rom [36].

Det ble presentert en fremgangsmåte for å vurdere om gjenbruk av eksisterende kanalnett er aktuelt. Denne fremgangsmåten kan bli brukt under vurderingen av om kanalnettet og ventilasjonssystemet til Sentralbygg 1 og 2 skal bli gjenbrukt, og renovert. Fremgangsmåten går analytisk igjennom tegningsgrunnlag, vurdering av dimensjoner, og prosjektering.

Figuren på neste side viser flytskjema som brukes under vurderingen.



Figur 29: Flytskjema som viser trinnvis fremgangsmåte for vurdering av gjenbruk [36].



Som nevnt i kapittel 3, så ble det hentet data om byggene og gamle prosjekteringstegninger fra arkivet til NTNU på Dora. Det ble også nevnt i samme kapittel at svakheten med analysen er at FDV-avdelingen til NTNU ikke har delt spesifikk informasjon om tekniske systemer som ventilasjonsanlegget. Uten slik informasjon og teknisk grunnlag, vil det bli betydelig mer forarbeid under prosjektering og planlegging av nytt anlegg [36]. Vurderingen av tegningene og informasjonen vil legge grunnlaget for om det er mulig å gjenbruke ventilasjons kanalene, her vil det komme frem om dimensjonene er riktig for å få korrekt luftmengde.

Det må gjøres en tilstandsanalyse av ventilasjonsanlegget med fagpersonell for å se om det er synlige skader eller korrosjon på kanalnettet, hvis omfanget av skadene eller korrosjonen er stor, bør kanalnettet rives og erstattes. Videre må det gjøres en gjennomgang av lekkasje og innfestning. En omfattende befaringsmåling må gjøres med personer som har mye kompetanse innenfor faget, og som kan dokumentere omfanget på eventuelle skader og feil.

Siden oppgradering kan mer enn halvere energibruken til ventilasjonssystemet [36], vil det være aktuelt å renovere systemet. Det vil da bli gjort renhold av ventilasjonskanalene, siden forurensede ventilasjonsanlegg kan utgjøre en hygienisk risiko, og kan føre til redusert luftkvalitet [67].

Tilluftsventilene burde byttes til aktive ventiler, disse ventilene har prefabrikkert automatikk, og styring. Styringen blir da gjort med tilstedeværelsesdetektorer og temperatursensorer, som fører til at ventilasjonssystemet prioriterer luftmengdene til rom som blir benyttet [36]. Disse ventilene kobles også direkte til CO<sub>2</sub> sensorer som blir montert i rom som blir benyttet som kontor eller møterom.

Siden det prosjekteres med at kontorlandskapet skal åpnes, legger dette til rette for å montere belysning med tilstedeværelsessensorer. Dette kan deles opp i soner, slik at lysene blir skrudd av i de sonene som det ikke blir detektert bevegelse. Siden belysning i store lokaler kan bruke mye strøm, vil det være positivt for energiforbruket å ha automatisk styrt belysning, ventilasjon og annet teknisk utstyr som er tilrettelagt for automatikk og styringssystemer.

### 5.3.6 Visualisering



*Figur 30: Visualisering av Sentralbygg 1 og 2*



*Figur 31: Visualisering av Sentralbygg 1 og 2*

## 5.3.5 Resultater Konsept 2

Bygget er etterisolert slik at bygningsdelene oppfyller kravene til u-verdier i TEK17. Da gjenstår det å se om en renovering av eksisterende ventilasjonsanlegg senker energiforbruket nok til å komme innenfor energirammen. Det gjøres den evaluering mot forskriftene og som man ser blir totalt beregnet energibehov blir 109,9 kWh/m<sup>2</sup> som er innenfor forskriftskravet.

Resultater av evalueringen	
Evaluering av	Beskrivelse
Energiramme	Bygningen tilfredsstillter energirammen ihht. §14-2 (1)
Minstekrav	Bygningen tilfredsstillter minstekravene i §14-3
Luftmengder ventilasjon	Luftmengdene tilfredsstillter minstekrav gitt i NS3031:2014 (tabell A.6)
Energiforsyning	Fossilt brensel benyttes ikke i oppvarmingsanlegget (§14-4)
Samlet evaluering	Bygningen tilfredsstillter byggeforskriftenes energikrav

Energiramme (§14-2 (1), samlet netto energibehov)	
Beskrivelse	Verdi
1a Beregnet energibehov romoppvarming	10,4 kWh/m <sup>2</sup>
1b Beregnet energibehov ventilasjonsvarme (varmebatterier)	11,1 kWh/m <sup>2</sup>
2 Beregnet energibehov varmtvann (tappevann)	5,0 kWh/m <sup>2</sup>
3a Beregnet energibehov vifter	14,0 kWh/m <sup>2</sup>
3b Beregnet energibehov pumper	1,2 kWh/m <sup>2</sup>
4 Beregnet energibehov belysning	25,1 kWh/m <sup>2</sup>
5 Beregnet energibehov teknisk utstyr	34,5 kWh/m <sup>2</sup>
6a Beregnet energibehov romkjøling	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
6b Beregnet energibehov ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	8,6 kWh/m <sup>2</sup>
Totalt beregnet energibehov	109,9 kWh/m <sup>2</sup>
Forskriftskrav netto energibehov	115,0 kWh/m <sup>2</sup>

Minstekrav (§14-3)		
Beskrivelse	Verdi	Krav
U-verdi yttervegger [W/m <sup>2</sup> K]	0,18	0,22
U-verdi tak [W/m <sup>2</sup> K]	0,10	0,18
U-verdi gulv mot grunn og mot det fri [W/m <sup>2</sup> K]	0,14	0,18
U-verdi glass/vinduer/dører [W/m <sup>2</sup> K]	0,8	1,2
Lekkasjetall (lufttetthet ved 50 Pa trykkforskjell) [luftvekslinger pr time]	1,5	1,5

Figur 32: Resultater fra simulering i Simien

Års simulering viser at viser at konsept 2 har betraktelig senket byggets energibehov. Casen har et energibehov på 225,7 kWh/m<sup>2</sup> og vil med disse tiltakene senke behovet til 94,9 kWh/m<sup>2</sup>, som er en nedgang på 58%.

Energibudsjett		
Energipost	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	43149 kWh	6,9 kWh/m <sup>2</sup>
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	77725 kWh	12,4 kWh/m <sup>2</sup>
2 Varmtvann (tappevann)	31303 kWh	5,0 kWh/m <sup>2</sup>
3a Vifter	79886 kWh	12,8 kWh/m <sup>2</sup>
3b Pumper	5037 kWh	0,8 kWh/m <sup>2</sup>
4 Belysning	156525 kWh	25,1 kWh/m <sup>2</sup>
5 Teknisk utstyr	187600 kWh	30,0 kWh/m <sup>2</sup>
6a Romkjøling	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	11804 kWh	1,9 kWh/m <sup>2</sup>
<b>Totalt netto energibehov, sum 1-6</b>	<b>593029 kWh</b>	<b>94,9 kWh/m<sup>2</sup></b>

Levert energi til bygningen (beregnet)		
Energivare	Levert energi	Spesifikk levert energi
1a Direkte el.	458268 kWh	73,4 kWh/m <sup>2</sup>
1b El. til varmepumpesystem	32349 kWh	5,2 kWh/m <sup>2</sup>
1c El. til solfangersystem	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
2 Olje	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
3 Gass	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
4 Fjernvarme	78403 kWh	12,6 kWh/m <sup>2</sup>
5 Biobrensel	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
6. Annen energikilde	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
7. Solstrøm til egenbruk	-0 kWh	-0,0 kWh/m <sup>2</sup>
<b>Totalt levert energi, sum 1-7</b>	<b>569020 kWh</b>	<b>91,1 kWh/m<sup>2</sup></b>
Solstrøm til eksport	-0 kWh	-0,0 kWh/m <sup>2</sup>
<b>Netto levert energi</b>	<b>569020 kWh</b>	<b>91,1 kWh/m<sup>2</sup></b>

Figur 33: Energibudsjett og levert energi til bygningen med tiltak.



## 6. Forskning og utvikling

### 6.1 Todelt stenderverk

Vanligvis blir det brukt bindingsverk med heltre for å bygge yttervegger, men med stadig strengere revideringer av tekniske forskrifter og krav til energibruk, har dette ført til at veggene må bygges tykkere for å få plass til mer isolasjon. På eldre bygninger er det mulig å lekte ut på utvendig og innvendig side, men dette er både arbeid- og materialkrevende.

For å kunne tilfredsstillе passivhuskrav er det nødvendig med veggetykkelse på opp mot 400 mm, og for å kunne nå dette er det i prinsippet kun to hovedalternativer som gjenstår; gjennomgående ytterveggløsning og todelt løsnings. Lavblokkprosjektet Løvåshagen i Bergen var det første prosjektet i Norge som benyttet seg av konseptet med dobbeltvegger. Det ble benyttet bindingsverkkonstruksjon med 98 mm bredde både innvendig og utvendig. Denne løsningen er konstruert for utfyllende bindingsverk i en bærende betongkonstruksjon. I dette prosjektet ble det oppnådd svært lave U- og kuldebro verdier i ytterveggene.



Figur 34: Prinsipiell oppbygning av todelt vegg med stender i heltre. Hentet fra: [68]

Det har blitt gjort flere kvalitative sammenligninger mellom dobbeltvegger og andre vegg løsninger. I 2009 gjorde John Strabue, en anerkjent amerikansk forsker, en omfattende studie der han sammenlignet to typer dobbeltvegger med 10 andre vegg løsninger.

Sammenligningene var basert på isolasjonsevne, robusthet i forhold til fukt, rasjonalitet i byggeprosessen, kostnad og materialbruk. I dette studiet fikk dobbeltveggene en

totalvurdering på 15 av 25 mulige poeng, der en tradisjonell bindingsverkvegg fikk 17 poeng. Dobbeltveggene fikk fratrekk for høyt materialforbruk og tidsbruk, men i ettertid har det blitt konkludert med at hvis man ikke bruker inntrukket dampsperre, vil det bli en stor fordel med dobbeltveggeløsninger for å bruke innblåst isolasjon. På denne måten vil ikke installasjonen være like tidkrevende, og det vil bli mulig å isolere hele veggen i en rask og enkel operasjon.

## 6.2 VIP isolasjon

Med de stadige strengere kravene som fører til tykkere vegger, er det også forsket mye på å utvikle mer effektive isolasjonsmaterialer med redusert konduktivitet.

Vakuumsisolasjonspaneler er et isolasjonsmateriale det har blitt forsket mye på de siste årene. Selv om panelene har stor varmemotstand, synker den effektive isolerende effekten betraktelig når panelene integreres i bygningsdelene. Den største fordelene med vakuumsisolasjonspanel er at det er svært plassbesparende og er ca. fem ganger tynnere enn tradisjonelle isolasjonsmateriale



Figur 35: Vakuumsisolasjonspanel. Hentet fra: [69].

Sintef gjorde i 2014 en studie i samarbeid med ZEB i NTNUs laboratorier i Trondheim. Hensikten var å forske på mulighetene ved vakuumsisolasjonspaneler, og om de kunne energi effektivisere verneverdige bygg på en god og fuktsikker måte. Framgangsmåten i studiet var å isolere en murvegg med tre bjelkelag, med vakuumsisolasjonspaneler på innsiden. Det ble først gjennomført en parametrisk studie for å evaluere innvirkningen på fuktinnholdet i

veggen basert på klima, tykkelse og mur kvalitet. Veggen ble også utsatt for slagregn og temperaturforskjeller. Målingene viste at det ikke var noen signifikant forskjell på veggen med og uten vakuumisolasjonspaneler på innsiden. Konklusjonen ble at med et godt planlagt design kan også verneverdige bygninger bli energieffektive. Studiet viste også at klimaeksponeringen og skaderisikoen er høy, noe som medfører at aktsomhet i utførelsesprosessen er svært viktig.

### 6.3 Elektrokromglass

I dag finnes det forskrifter som etterspør bærekraftige løsninger, men det kan spekuleres om at det vil komme strengere krav i framtiden, slik som Breeam-standard for eksempel. Breeam-standard er et miljøsertifiseringsverktøy for bygninger som måler miljøprestasjon og sertifiserer bærekraftige bygg som tilfredsstillende kravene. Internasjonale studier viser at BREEAM-bygg har: lavere driftskostnader, høyere markedsverdi og økt brukertilfredshet. Elektrokromglass er smartglass som er produsert med hensyn til det grønne skiftet. Glasset benytter seg av *elektromatisme* der svak strøm, automatisk eller manuelt, forårsaker et skifte mellom ioner og elektroder og gjør glasset mørkere eller lysere basert på forholdene på utsiden. Vinduene kan da regulere inn slipp av solstråling etter behov av dagslys, oppvarming og kjøling. Smartglass AS viser ved en studie på elektrokromglass at ved en utetemperatur på 22 varmegrader kan innnetemperaturen reduseres med mellom fire til syv grader, og at både vinduene og systemet har lavt eller intet vedlikeholdsbehov.



Figur 36: «Smarte norske vinduer» Hentet fra: [70]

Det har også blitt gjort flere studier på en nyere teknologi innen glass, «*termokromeglass*». Forskjellen på dette glasset er at det reagerer på UV-stråler i dagslys og temperatur. Denne teknologien trenger da altså ikke å være koblet til det elektroniske anlegget.

I 2019 startet POB Entreprenør AS en krevende rehabilitering av Ticonbygget i Drammen. I dette rehabiliteringsprosjektet var det strenge krav, blant annet at bygget skulle produsere mer kraft enn det bruker selv. For å løse dette ble hele fasaden strippet og byttet ut med 4-lags isoleringsglass, termokromatiske glass, elektrokromiske glass og solceller. For å kunne nå minstekravet om et nullutslippsbygg ble de også nødt til å bytte ut alt av eksisterende tekniske anlegg og lage et helt nytt kontorlandskap. [71]



Figur 37: Krevende rehabilitering av Ticonbygget i Drammen. Hentet fra [71].



## 6.4 Lagring av energi

Det finnes i dag mange måter å lagre kraft på, noen er fortsatt på forskingsstadiet, mens andre er utbredt i stor skala. Dagens problemstilling retter seg mot at de mest utbredte metodene kun har evnen til å lagre energi i korte tidsrom, slik som lagring i kondensatorer eller i superledere. Det kommer stadig flere bygninger med egne solceller for å dekke deler av strømforbruket og redusere effekttopper på morgen og formiddag [72].

Om sommeren vil det være betydelig med overskuddsstrøm som kan selges tilbake til nettet, men på grunn av grensen på 100 kW i plusskundeordningen, må noe av strømmen strupes. Med gode løsninger for lagring av overskuddsenergi vil strømmen som må strupes reduseres, samt at dette kan spares og brukes igjen om vinteren [72].

I industri og bygg er omtrent halvparten av det totale energibehovet i form av termisk energi (varme og kulde). Energibehovene vil ha daglig store variasjoner og kan føre til:

- *Termiske systemer må overdimensjoneres for å kunne håndtere de høyeste lastene.*
- *Produksjonskapasiteten må begrenses for å unngå strømavbrudd når effektuttaket er større en maksimalkapasiteten på nettet.*
- *Høyere strømregninger som en følge av høy topplast.*

I en studie av *Internasjonal Energy Agency (IEA)* er *termiske energilager (TEL)* en viktig faktor for å kunne oppnå en mer fleksibel, pålitelig og bærekraftig håndtering av det termiske og elektriske energibehovet i industrien. Integrerte termiske enheter brukt som termiske batterier er en effektiv løsning for å gjøre termisk produksjon uavhengig av energinettet og vil gi en bedre bruk av energi fra nettet under topplastperioder, samtidig som det vil være økonomisk gunstig for forbrukere når det er lav energiproduksjon og høyt energibehov [72].

Ved Zeb-laboratoriet i Trondheim forskes det på hvordan man skal utvikle PCM-TEL for å:

- Redusere klimagassutslipp fra drift av bygninger gjennom økt bruk av lokalprodusert energi
- Redusere effektbehov gjennom fleksibel styring av energistrømmer innad i et bygg og mellom et bygg og omliggende energisystem.



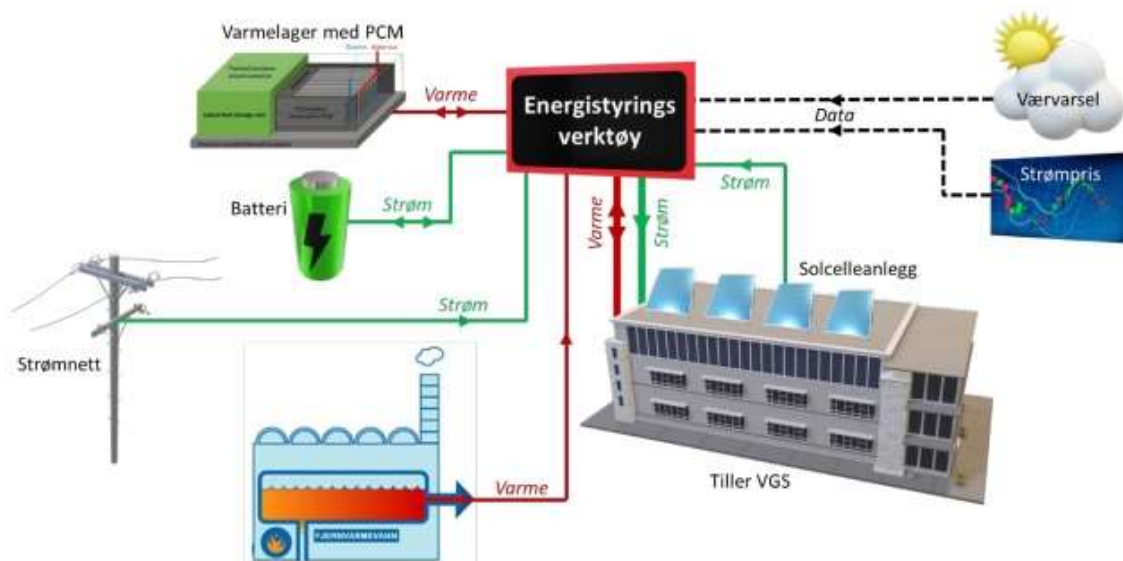
Figur 38: 200kWh PCM-varmelager installert i ZEB-laboratoriet (venstre); Pute-plater inn i varmelageret, uten PCM (høyre). Hentet fra: [72]

#### 6.4.1 Li-ionebatterier

*Li-ionebatteri (LiB)* er den teknologien man i dag ser som har byttet ut fossile brensel som energikilde for ulike utstyr og framkomstmidler. Blant disse er de mest kjente elektriske biler, sykler og sparkesykler. Teknologiutviklingen og ikke minst prisene per kWh for LiB har utviklet seg i stor fart de siste årene. Basert på energitetthet er det i dag ingen andre batteriteknologier som kan utkonkurrere LiB. Batteriene håndterer også høyere effekter, noe som gjør de godt egnet for oppladning ved solseller under overskuddsperioder.

#### 6.4.2 Gjenbruk av Li-ionebatteri

Systemer basert på brukte LiB blir stadig mer utbredt hos aktører både i Norge og Europa. Bakgrunnen for dette systemet er at LiB i elbiler regnes som oppbrukte når de har brukt kun 20-30% av sin opprinnelige energikapasitet. Vanligvis ville disse batteriene blitt sendt direkte til resirkulering, men det er blitt vurdert at gjenbruk av disse batteriene for mindre krevende applikasjoner er hensiktsmessig sett i et miljøperspektiv. Karbonfotavtrykket vil også bli betydelig redusert når batteriet blir gjenbrukt og forlenget levetid på opp mot 10 år. SINTEF har gjort flere studier innen dette temaet og senest i 2021 skrev de et konsept for fleksible løsninger for energilagring ved Tiller vgs i Trondheim. I dette studiet gjorde de sammenligninger mellom flere batteri slik som nye og gamle Li-ionebatteri, Redox flytebatteri og saltvannsbatteri [73].



Figur 39: Konseptskisse for ulike teknologi for energiproduksjon og lagringsmuligheter. Hentet fra [73]

I konseptet foreslo de at mesteparten av oppvarmingen ville komme fra fjernvarme. For å redusere store effekttopper om vinterhalvåret ville det bli brukt et PCM-basert varmelager for å lagre overskuddsvarme fra fjernvarmenettet i lavlastperioder [73].

## 7 Drøfting

### 7.1 Metode

Gjennom hele prosessen ble det gjennomført analyse av tegninger hentet fra arkivet til NTNU, Dora. Det ble tatt i bruk virkemiddelet *workshop* i samarbeid med veileder Bozena og David. En annen gruppe studenter som arbeidet med en lignende oppgave var likeså deltakende i workshopen og bidro til å fasilitere god gruppediskusjon. Disse øktene ble brukt til blant annet å drøfte forskningsdesign, relevant teori og løsninger. Videre ble det brukt programmer som Simien og Archicad for å gjennomføre nøyaktige analyser av data behandlet i denne oppgaven. Etter å ha utviklet konseptene ble litteratursøk primærmetoden for å finne gode kilder. Byggforsk og Sintef var blant aktørene med mest relevant litteratur for å besvare problemstillingene som er operasjonalisert i denne oppgaven.

#### 7.1.1 Planlegging

Det ble tidlig begynt å organisere hvordan drøftingen med forskningsdesign skulle skje, og også videre legge planer for prosessen fremover, og sette flytende frister som virkemiddel for progresjon. Noe av det første som ble ferdigstilt var en prosjektplan som skulle benyttes dynamisk for å skape progresjon i arbeidsprosessen med forbehold om kontinuerlige endringer. Parallelt med designet av prosjektplanen ble det konstruert timelister, disse ble brukt som et virkemiddel for å dokumentere arbeidsmengde i samme takt som arbeidet ble gjort. Følgelig ble det utarbeidet et forprosjekt som dannet grunnlaget for problemstillingen.

Gjennom problemstillingen begynte oppgaven å ta form, det ble lagd en disposisjon med kapittelinddelinger for å ha en ryddig oversikt over skjellet til oppgaven. Problemstillingen ble behandlet før den endelige tre-delingen ble definert. Disposisjonen fikk en rekke strukturelle endringer i takt med både skriveprosessen og ny kunnskap om temaet. Det argumenteres for å presentere teorien tidlig for å danne kunnskapsgrunnlaget nødvendig for å lese oppgaven. Analysen ble presentert før konseptet og resultatene for å belyse grunnlaget nødvendig for å forstå disse.

Workshopen som nevnt ovenfor var en kollektiv diskusjon med meg selv og min veileder, og en annen gruppe og deres veileder. Dette var et stort virkemiddel for å kunne så frem forskjellige perspektiver og individuelle synspunkt. Det kom frem mange gode innspill for løsninger og mange gode kommentarer på forskjellige tilnærminger som ble foreslått.

Mot slutten av oppgaven økte frekvensen av møter med veileder for å opprettholde god kvalitet, god struktur og gode diskusjoner rundt de forskjellige løsningene og ideene. Det var også en god kommunikasjonsforbindelse med eksterne aktører som nevnt tidligere i oppgaven. Dette ble gjort primært gjennom e-post og hovedsakelig i forbindelse med dataprogrammet Simien og for å få input i løsningsforslag på tekniske installasjoner og anlegg.

### 7.1.2 Datainnsamling

Det kom tydelig frem i starten av det var nødvendig å ta initiativ til å søke etter gamle tegninger og informasjon om Sentralbygg 1 og 2. Siden byggene er såpass gamle, ble det tatt utgangspunkt i at tegningene som ble brukt til gjennomføringen av prosjektet, var arkivert på arkivene til NTNU. Det ble sendt inn en forespørsel om å få tilgang til arkivet av gruppen, og fikk avtalt tidspunkt.

Siden det var flere som ønsket tilgang til arkivene ble det opprettet en kommunikasjonskanal, og gruppene gikk kollektivt sammen for å få tilgang. På arkivet ble det funnet prosjektmateriell som var grunnlaget for prosjekteringen og gjennomføringen av Sentralbygg 1 og 2. Disse tegningene illustrerte tydelig hvordan bygningskroppen var utformet, og viste dimensjoner og materialer som ble brukt for å isolere byggene. Tegningene av Sentralbygg 1 og 2 ga dermed et godt grunnlag for hvordan bygningen var bygget og prosjektert når det ble bygget. Det ble så innhentet relevant informasjon om lignende prosjekter og situasjoner. Det ble viktig å være kildekritisk tidlig, og innhente informasjon fra kilder som driver med relevant forskning. Det ble hentet informasjon fra Sintef rapporter, og Byggforsk, som holder på med mye forskning på dette temaet.

Sintef har utviklet mange rapporter som ga et godt grunnlag for hvilke løsninger som har blitt forsket på, og gjennomført tidligere. TEK17, NS3700 og andre tekniske standarder ble mye brukt under innsamling av data, som anses å være solide kilder. Det har også blitt sett på andre bachelor- og masteroppgaver for å få inspirasjon til forskningsdesignet. For å velge ut produkter og løsninger ble det valgt å bruke Google som søkemotor. Det er viktig å være kritisk til hvor informasjonen kommer fra. Når man vurderer et produkt fra leverandørers hjemmesider er sjansen lav for å lese kritiske synspunkter ettersom leverandørers primærfokus er å selge produktene sine. For å være kritisk ble det valgt å drøfte hvordan produktene eller løsningene skulle brukes og sammenligne dem med andre relevante produkter og annen informasjon tilgjengelig.

## 7.2 Drøfting av resultater

Etter å ha gjennomført simuleringene kommer det tydelig frem at høyblokkene har stort potensialet for energieffektivisering. Det som er utfordrende, er å konkludere helt sikkert hvor stort potensialet for effektivisering er. Grunnen til dette er fordi gruppen ikke fikk tilgang på nøkkelinformasjon om tekniske systemer og det ble derfor tatt noen antagelser for inputen i Simien. Eksempel på slik informasjon er dekningsgrader, systemvirkningsgrader, luftmengder og SFP-faktor. Dette er en usikkerhet i oppgaven. Likevel ble denne inputen fylt inn i samråd med Thomas Sjøveian [43], og det er derfor rimelig å anta at resultatene er forholdsvis realistiske. I simuleringene av de nye konseptene ble store deler av de tekniske systemene byttet ut og nøkkelinformasjon ble hentet fra NS 3031. Dette gjør at det er mindre usikkerhet knyttet til disse resultatene.

Begge konseptene benyttes TES-elementer, som skal monteres imellom søylene. Dette legger til rette for kortere byggetid, som gjør at lokalene kan tas i bruk igjen raskere. På konsept 1 ble det foreslått bruk av *Plug and play* fasadesystem som i teorien virker som en veldig effektiv løsning for etterisolering av vegger. Det må nevnes at disse elementene er lite utprøvd og det kan være utfordringer knyttet systemet som ikke er kjent enda. Spesielt stilles det spørsmål til skjøtene og om de vil være helt tette.

Det ble tidlig klart i prosessen at ventilasjonsanlegget har stor innvirkning på et byggs energieffektivitet. Det var ikke mulig å nå kravene i TEK17 uten å gjøre oppgraderinger på systemet og det ble derfor valgt to ulike løsninger for konseptene. Spesielt viktig er det å ha en god varmegjenvinningsgrad og at det ikke flyttes unødvendige store mengder luft i anlegget. En rapport utviklet av SINTEF ble bakgrunnen for å beholde ventilasjonskanalene i konsept 2. Disse ble rehabilitert en gang mellom 2005-2007 hvor store deler av kanalene ble byttet. SINTEF anslår at dette er en svært bærekraftig løsning sammenlignet med å rive og bygge nytt.

I oppgaven blir det lagt frem flere innovasjoner som kan bidra til å energieffektivisere bygninger. En av disse er elektrokrome vinduer som kan dimme solinnslippet etter behov. Disse vinduene kan kombineres med sensorer slik at de slipper inn riktig mengde sollys og varme til enhver tid. Dette er en innovasjon som kan fungere i en smart fasade og bidra til å optimalisere energiforbruket. En annen innovasjon som FME ZEN forsker på er bruk av brukte li-ionebatterier for energilagring. Dette er også en løsning som kan bidra til et mer

effektivt energiforbruk. Slike løsninger er spennende og kan bli mer vanlig i fremtiden, men det er foreløpig utfordrende å måle effekten av disse.

Konsept 1 ble evaluert mot passivhusstandarden og tilfredsstillende kravet til energiytelse. I likhet med TEK17 stilles det også en del minstekrav til enkeltkomponenter i en slik vurdering. I resultatdelen var det usikkert om konseptet tilfredstilte kravene til blant annet kuldebro verdi og lufttetthet. Til slutt ble det konkludert med kuldebroene fra de gjennomgående betongsøylene ble for store, og at bygget dermed ikke nådde alle kravene til passivhusstandard.

### 7.3 Konklusjon

Resultatene fra simuleringene viser at casen har stort potensialet for energieffektivisering. Tiltak på bygningskropp og tekniske systemer kan sørge for en vesentlig reduksjon i både energiforbruk og klimagassutslipp fra bygninger. Høyblokka er oppført etter normal byggeskikk på 60-tallet og kan derfor være representativ for lignende blokkbebyggelse fra i samme tidsperiode. Nye innovasjoner for blant annet tekniske systemer, isolasjon og smarte fasader kan bidra til å senke energiforbruket ytterligere, men det er foreløpig vanskelig å måle effekten av slike løsninger. Mer effektive systemer for lagring og produksjon av lokal fornybar energi vil kunne bidra til at flere bygninger kan bli utslippsfrie i fremtiden.

Konsept 1 viser at det kan være mulig å renovere eksisterende bygninger slik at de holder passivhusstandard, selv om det ikke nådde alle minstekravene til enkeltkomponenter. Tiltaket kan derfor kalles en renovering med passivhuskomponenter. Spesielt viktig er store isolasjonstykkelser, vinduer med lave u-verdier, og økt effektivitet og grad av behovsstyring på ventilasjon, oppvarming og lys.

For andre eksisterende bygninger kan det være mulig å benytte Plug and play systemet på alle fasadene og dermed tilfredsstillende minstekrav til enkeltkomponenter. Tiltaket er omfattende og sannsynligvis svært kostbart, og det stilles derfor spørsmål til hvor realistisk det vil være å gjennomføre. Bygget har drastisk senket CO<sub>2</sub>-utslippene i drift, men kan ikke klassifiseres som et ZEB-O, da det fortsatt produserer et årlig utslipp på 7,0 kg/m<sup>2</sup>. En mulig løsning som kan senke klimagassutslippene til null er å utvide systemgrensene for energiproduksjon og produsere energi utenfor byggets fotavtrykk.

Konsept 2 er mindre omfattende sammenlignet med konsept 1 og er derfor kanskje et mer realistisk forslag til renovering av høyblokka. Konseptet viser at det kan være mulig å



beholde deler av eksisterende ventilasjon og oppvarmingssystem og fortsatt oppfylle kravene i TEK17. En mer tradisjonell og forutsigbar oppgradering av massivveggene kan også være å foretrekke, da Plug and play systemet er nytt og i liten grad utprøvd.

Som tabellen under viser er det heller ikke en enorm forskjell på konseptenes totale netto energibehov. Forskjellen er imidlertid større i netto levert energi da konsept 1 produserer fornybar energi. Hvis det hadde vært store forskjeller i kostnader mellom konsept 1 og 2 kan det på bakgrunn av dette argumenteres for at konsept 1 er et bedre og mer bærekraftig tiltak.

	Eksisterende bygning	Konsept 1	Konsept 2
Netto energibehov (kWh/m <sup>2</sup> )	225,7	80,4	94,9
Netto levert energi (kWh/m <sup>2</sup> )	194,1	57,5	91,1
CO2-utslipp i drift (kg/m <sup>2</sup> )	21,9	7,0	11,2

Tabell 4: reduksjon i energiforbruk og CO2 utslipp



## Referanser

- [1] A. M. Selberg, Interviewee, *Universitetslektor*. [Intervju]. April 2022.
- [2] FN, «Bærekraftig utvikling,» FN-sambandet, August 2021. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/tema/fattigdom/baerekraftig-utvikling>.
- [3] T. Keilman, «Bygger bedre kunnskap for en mer bærekraftig byggebransje,» Forskningsrådet, 16 Oktober 2020. [Internett]. Available: <https://www.forskningsradet.no/sok-om-finansiering/hvem-kan-soke-om-finansiering/naringsliv/prosjekter-naringslivet/bygger-bedre-kunnskap-for-en-mer-baerekraftig-byggebransje/>.
- [4] Sintef rapport, «Zero emission neighbourhoods in smart cities,» Sintef, NTNU, 2018. [Internett]. Available: <https://fmezen.no/wp-content/uploads/2018/11/ZEN-Report-no-7-Bilingual.pdf>.
- [5] Grønn byggallianse, «EUs taksonomi – nye rammebetingelser for bærekraft,» Juni 2021. [Internett]. Available: <https://byggalliansen.no/kunnskapssenter/nye-rammebetingelser-for-baerekraft-i-bygg-og-eiendom/#1606741285556-09053c2e-c366>.
- [6] Næringslivets Hovedorganisasjon, «EUs taksonomi og handlingsplan for bærekraftig finans,» NHO, [Internett]. Available: <https://www.nho.no/tema/energi-miljo-og-klima/artikler/eus-taksonomi-og-handlingsplan-for-baerekraftig-finans/>.
- [7] Sintef, «De mest bærekraftige byggene finnes allerede,» Desember 2020. [Internett]. Available: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2020/de-mest-baerekraftige-byggene-finneres-allerede/>.
- [8] Byggforsk, «620.016, Større tiltak i eksisterende bygninger. Planlegging og gjennomføring,» Sintef, August 2018. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/618>.
- [9] Lovdata, «Lov om planlegging og byggesaksbehandling (plan- og bygningsloven),» Juni 2008. [Internett]. Available: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2008-06-27-71>.
- [10] Direktoratet for byggekvalitet, «Byggeteknisk forskrift (TEK17),» September 2017. [Internett]. Available: <https://dibk.no/regelverk/byggeteknisk-forskrift-tek17/>.
- [11] Byggforsk, «473.101, Energikrav til bygninger. Oversikt,» Sintef, Juni 2016. [Internett]. Available: [https://www.byggforsk.no/dokument/5162/energikrav\\_til\\_bygninger\\_oversikt](https://www.byggforsk.no/dokument/5162/energikrav_til_bygninger_oversikt).
- [12] Byggforsk, «473.102, Energikrav til bygninger. Energirammer,» Sintef, Juni 2016. [Internett]. Available: [https://www.byggforsk.no/dokument/5164/energikrav\\_til\\_bygninger\\_energirammer#i25](https://www.byggforsk.no/dokument/5164/energikrav_til_bygninger_energirammer#i25).
- [13] Lovdata, «Lov om planlegging og byggesaksbehandling (plan- og bygningsloven),» *Fjerdel del: Byggesaksdel, Kapittel 31. Krav til eksisterende bygg*, Mai 2021.
- [14] Byggforsk, «473.015, Dokumentasjon av passivhus og lavenergibygninger,» Sintef, Desember 2013. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/4109>.

- [15] J. Mamen, «Klima,» 18 Mars 2022. [Internett]. Available: <https://snl.no/klima>.
- [16] Byggforsk, «700.110 Byggskader,» Sintef, September 2010. [Internett]. Available: [https://www.byggforsk.no/dokument/629/byggskader\\_oversikt](https://www.byggforsk.no/dokument/629/byggskader_oversikt).
- [17] Byggforsk, «533.163, Solskjerming. Typer og hensyn ved valg,» Sintef, Juni 2017. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/2930>.
- [18] Byggforsk, «471.008, Beregning av u-verdier etter NS-EN ISO 6946,» Sintef, September 2018. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/208>.
- [19] Byggforsk, «472.001, Kuldebroer,» Sintef, Oktober 2019. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/5206>.
- [20] Byggforsk, «473.020, Nullutslippsbygninger,» Sintef, August 2017. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/5177>.
- [21] M. Klinski, «Ambisiøs energioppgradering med etterisolert fasade,» 2014. [Internett]. Available: <https://www.sintefbok.no/book/download/1036>.
- [22] Timbeco, «Veggelementer,» [Internett]. Available: <https://timbeco.ee/no/produkter/byggelementer/veggelementer/>.
- [23] Sintef, «Bygg med prefabrikkerte elementer og unngå byggskader,» Sintef artikkel, 15 April 2021. [Internett]. Available: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2021/bygg-med-prefabrikkerte-elementer-og-unnga-byggskader/>.
- [24] Byggforsk, «520.110, Modulbygninger av tre,» Sintef, September 2020. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/5215>.
- [25] T. Farstad, «Presentasjon av fuktsikkerhet i moderne treelementer,» Sintef, [Internett]. Available: <https://www.sintef.no/contentassets/9c0131854e8c497594767721f68f75bd/fuktsikkerhet-i-moderne-fasadeelementer.pdf>.
- [26] J. Torres, R. Garay-Martinez, X. Oregi, . J. I. Torrens-Galdiz , A. Uriarte-Arrien, A. Pracucci, O. Casadei, S. Magnani, N. Arroyo og A. M. Cea, «Plug and Play Modular Façade Construction System for Renovation for Residential Buildings,» 18 September 2021. [Internett]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-5309/11/9/419/pdf?version=1631958539>.
- [27] S. T. Kolstad og B. Time, «Retningslinjer for forankring av prefabrikkerte elementer i tre (TES-elementer) til fasader ved oppgradering,» 2013. [Internett]. Available: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/2435235>.
- [28] Byggforsk, «723.638, Utskifting av vinduer,» Sintef, Mars 2018. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/680>.

- [29] Direktorat for byggkvalitet, «Bytte vinduer? Velg vinduer som gir deg lys og varme,» 23 Mai 2018. [Internett]. Available: <https://dibk.no/bygge-eller-endre/puss-opp-energismart/bytte-vinduer-velg-vinduer-som-gir-deg-lys-og-varme/>.
- [30] E. Taveres-Cachat, «Smarte fasader, muligheter nå og muligheter i fremtida,» Sintef presentasjon, [Internett]. Available: [http://byggningsfysikk.no/NorskByggningsfysikkdag2017/09\\_Taveres-Cachat.pdf](http://byggningsfysikk.no/NorskByggningsfysikkdag2017/09_Taveres-Cachat.pdf).
- [31] Byggforsk, «321.231, Prosjektering av solcelleanlegg på bygninger,» Sintef, Juni 2021. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/5220>.
- [32] Norsk solenergiforening, «Solceller,» Norsk solenergiforening, [Internett]. Available: <https://www.solenergi.no/solstrm>.
- [33] Byggforsk, «552.455, Vannbaserte solfangere. Funksjon og energiutbytte,» Sintef, Desember 2011. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/542>.
- [34] Geze, «Energioptimalisert konstruksjon med intelligente fasader,» Geze, [Internett]. Available: <https://www.geze.no/nb/utforsk/emner/intelligent-fasade>.
- [35] S. S. Strand, «Smarte fasader kan gi aktive bygg,» Byggeindustrien, bygg.no, 26 Juni 2018. [Internett]. Available: <https://www.bygg.no/smart-fasader-kan-gi-aktive-bygg/1359466/>.
- [36] M. Mysen, E. Aronsen og B. S. Johansen, «Gjenbruk av ventilasjonskanaler,» Sintef rapport, 2014. [Internett]. Available: <https://www.sintefbok.no/book/download/979>.
- [37] O. Hellevik, «Forskningsmetode i sosiologi og statsvitenskap,» Oslo, Universitetsforlaget, 1991, pp. 14-15.
- [38] H. Olsson og S. Sørensen, Forskningsprosessen - kvalitative og kvantitative perspektiver, Oslo: Gyldendal, 2003.
- [39] K. Sander, «Kvalitativ metode og design,» studie, Februar 2021. [Internett]. Available: <https://estudie.no/kvalitativ-metode/>.
- [40] T. Varndal, «Datakvalitet,» Nasjonalt serivemiljø for medisinske kvalitetsregistre, 2017. [Internett]. Available: <https://www.kvalitetsregistre.no/>.
- [41] Wikipedia, «Liste over bygningene på campus NTNU Gløshaugen,» [Internett]. Available: [https://no.wikipedia.org/wiki/Liste\\_over\\_bygningene\\_på\\_campus\\_NTNU\\_Gløshaugen](https://no.wikipedia.org/wiki/Liste_over_bygningene_på_campus_NTNU_Gløshaugen).
- [42] Direktorat for byggkvalitet, «Byggeteknisk forskrift, TEK49,» 1949. [Internett]. Available: [https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere\\_regelverk/historisk-arkiv-1949---1987/byggforsk-1949-bind-i.pdf](https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere_regelverk/historisk-arkiv-1949---1987/byggforsk-1949-bind-i.pdf).
- [43] T. Sjøveian, Interviewee, *Sivilingeniør/M.Sc. – inn klima og energi*. [Intervju]. 5 Mai 2022.
- [44] Forsvarsbygg, «Rehabilitering av betongkonstruksjoner,» Forsvarsbygg, 8 Oktober 2015. [Internett]. Available: <https://www.forsvarsbygg.no/no/verneplaner/movik-fort/vedlikehold-og-restaurering/rehabilitering-av-betongkonstruksjoner/>.

- [45] Ytongsiporex, «Varmeisolering,» [Internett]. Available: [https://www.ytongsiporex.no/no/docs/279240\\_Energi.pdf](https://www.ytongsiporex.no/no/docs/279240_Energi.pdf).
- [46] Byggforsk, «525.207, Kompakte tak,» Sintef, April 2018. [Internett]. Available: [https://www.byggforsk.no/dokument/387/kompakte\\_tak#i51](https://www.byggforsk.no/dokument/387/kompakte_tak#i51).
- [47] Rockwool, «HARDROCK Energy Systemtak,» [Internett]. Available: <https://www.rockwool.com/no/produkter-og-konstruksjoner/isolering-av-tak/flate-tak/hardrock-energy-systemtak/>.
- [48] Byggforsk, «544.206, Mekanisk innfesting av asfalttakbelegg og takfolie på skrå og flate tak,» Sintef, Mars 2016. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/506/>.
- [49] Byggforsk, «523.111, Yttervegger mot terreng. Varmeisolering og tetting,» Sintef, Mai 2015. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/3304>.
- [50] Byggforsk, «727.113, Ombygging og innredning av kjeller til boligrom,» Sintef, Oktober 2017. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/697>.
- [51] Byggforsk, «344.210, Strategier for valg av kontorløsning,» Sintef, Vår 2001. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/3000>.
- [52] Byggforsk, «533.102, Vinduer. Typer og funksjoner,» Sintef, September 2018. [Internett]. Available: [https://www.byggforsk.no/dokument/437/vinduer\\_typer\\_og\\_funksjoner](https://www.byggforsk.no/dokument/437/vinduer_typer_og_funksjoner).
- [53] C. Grini og T. Wigenstad, «LECO, Behovstilpasset ventilasjon,» Sintef rapport 73, 2011. [Internett]. Available: <https://www.sintefbok.no/book/download/900>.
- [54] Ener, «Energvent TS kabinett,» [Internett]. Available: <https://www.produktfakta.no/16/pdcnewsitem/03/19/73/Ventilasjon%20samlebrosjyre.pdf>.
- [55] K. Thunshelle, «Oppvarming via tilluft,» Sintef rapport 38, 2016. [Internett]. Available: <https://www.sintefbok.no/book/download/1107>.
- [56] SolarLab, «Customizing solar facades,» Solarlab Denmark, [Internett]. Available: <https://solarlab.dk/solar-facade-solutions/>.
- [57] K. Noreng, B. G. Brevik og J. E. Gaarder, «Temaveileder for flate tak,» Takprodusentens Forskningsgruppe, November 2020. [Internett]. Available: [https://tpf.zoomgrafisk.no/files/TPF\\_9\\_2021\\_28mai.pdf](https://tpf.zoomgrafisk.no/files/TPF_9_2021_28mai.pdf).
- [58] F. Vullum-Bruer, K. O. P. Bjørgen, H. Kauko, H. Svendsen og A. Sevault, «Konseptutredning – Fleksible løsninger for energilagring ved Tiller vgs,» Sintef rapport, Trondheim, 2021.
- [59] Byggforsk, «573.144 Ankerfeste i betong,» Sintef, Ferbruar 2013. [Internett]. Available: [https://www.byggforsk.no/dokument/600/ankerfester\\_i\\_betong](https://www.byggforsk.no/dokument/600/ankerfester_i_betong).
- [60] Direktoratet for byggekvalitet, «Byggteknisk forskrift (TEK17), §14-2. Krav til energieffektivitet,» Oktober 2020. [Internett]. Available: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-2/>.

- [61] Byggforsk, «723.312, Etterisolering av betongvegger,» Sintef, Desember 2014. [Internett]. Available: [https://www.byggforsk.no/dokument/678/723312\\_etterisolering\\_av\\_betongvegger](https://www.byggforsk.no/dokument/678/723312_etterisolering_av_betongvegger).
- [62] J. Rostad, Interviewee, *Bruk av prefabrikkerte tre elementer*. [Intervju]. April 2020.
- [63] Byggforsk, «523.255, Yttervegger av bindingsverk. Varmeisolering og tetting,» Sintef, September 2020. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/361/>.
- [64] A. Svensson, A.-J. Almås, P. Blom og M. Mysen, «Syv energiambisiøse oppgraderinger av yrkesbygg,» August 2013. [Internett]. Available: <https://www.sintefbok.no/book/download/970>.
- [65] H. H. Hansen, Interviewee, *Prosjektleder*. [Intervju]. 4 April 2022.
- [66] S. Mellegård og A. Svensson, «UPGRADE – Veileder for energiambisiøs oppgradering av yrkesbygg,» 2014. [Internett]. Available: <https://www.sintefbok.no/book/download/1031>.
- [67] Byggforsk, «752.250, Rengjøring av ventilasjonsanlegg,» Sintef, November 2004. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/723>.
- [68] Norsk Treteknisk institutt, «ENTRÈ - energieffektive trekonstruksjoner,» Juli 2011. [Internett]. Available: <https://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/rapporter/Rapport-84.pdf>.
- [69] A. Gustavsen, «Presentasjon i nye isolasjonsmaterialer i verneverdige bygg,» Forskningscenter for nullutslippsbygg (ZEB), Trondheim.
- [70] Byggmesteren, «Leverer smarte norske vinduer,» Byggmesteren, September 2017. [Internett]. Available: <https://byggmesteren.as/2017/09/13/leverer-smarte-norsk-vinduer/>.
- [71] Byggeindustrien, «POB Entreprenør AS krevende rehabilitering av Ticonbygget i Drammen,» bygg.no, Mars 2020. [Internett]. Available: <https://www.bygg.no/ticon/1427308!/?image=3>.
- [72] ZEB lab, «ZEB LABORATORY,» ZEB, [Internett]. Available: <https://zeblab.no/>.
- [73] Sintef, «Fleksible løsninger for energilagring ved Tiller VGS,» Sintef rapport, [Internett]. Available: <https://www.sintef.no/prosjekter/2020/fleksible-losninger-for-energilagring-ved-tiller-vgs/>.
- [74] Direktoratet for byggekvalitet, «Byggesaksforskriften (SAK10),» Februar 2022. [Internett]. Available: <https://dibk.no/regelverk/sak/>.
- [75] Regjeringen, «KOMPLEKS 9900496 Gløshaugen,» Trondheim, 2010.
- [76] N. Olsson, *Praktisk rapportskrivning*, Trondheim: Akademisk forlag, 2009.
- [77] Byggforsk, «523.255, Yttervegger av bindingsverk. Varmeisolering og tetting,» Sintef, September 2020. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/361>.