

Ola Lædre  
Atle Engebø  
Erlend Andenæs  
Sara Hajizadeh  
Ole Jonny Klakegg  
Tore Kvande

## Erfaringer fra ZEB-laboratoriet: byggeprosessen, bygningsteknologien og bruken

Trondheim 05. september 2023



Foto: m.herzog/www.visualis-images.com

Rapport

# Erfaringer fra ZEB-laboratoriet: byggeprosessen, bygningsteknologien og bruken

**VERSJON**

Versjon nummer 1

**DATO**

05.09.2023

**FORFATTER**

Ola Lædre  
Atle Engebø  
Erlend Andenæs  
Sara Hajizadeh  
Ole Jonny Klakegg  
Tore Kvande

**PROSJEKTNUMMER**

949442100

**ANTALL SIDER OG VEDLEGG**

41 sider rapport og 2 vedlegg (på 7 sider)

**OPPDRAGSGIVER(E)**

Fremtidens Campus, NTNU

**SAMMENDRAG**

ZEB-laboratoriet i Trondheim fungerer som et fullskala laboratorium og nullutslippsbygg. Brukerne og andre kan studere effekten av forskjellige fasadeløsninger, tekniske system og utforminger. Denne rapporten er skrevet for å formidle erfaringene fra byggeprosessen, bygningsteknologien og bruken til NTNU Campusutvikling og ikke minst NTNU Campussamling. Rapporten er finansiert gjennom programmet Fremtidens campus, NTNU.

Prosjektet bruker allerede innsamlede data i kombinasjon med nye data fra bruken av ZEB-laboratoriet. Dataene er blant annet samlet inn gjennom et doktorgradsarbeid, praktisk involvering i planleggings-, gjennomførings- og driftsfasen, samt et masteroppgavearbeid.

Konklusjonene for byggeprosessen er at den benyttede tostegskontrakten og prosjektering med egne fagekspertter var nyttig når byggherren ønsket en kombinasjon av mange nye tekniske løsninger samlet i ett bygg. Det spesielle med bygningsteknologien er kombinasjonen av mange nye løsninger, som tidligere bare var prøvd ut hver for seg. Finjustering var nødvendig for å maksimere ytelsen til løsningene, men det var i ferd med å gå seg til. Erfaringene fra bruken er at et nullutslippsbygg kan fungere fint til kontorplasser og undervisning, og at det er bra for imagen til forskere som jobber med klimatilpasning med arbeidsplass der.

Oppsummert var det både teknisk og økonomisk krevende å bygge et av verdens mest bærekraftige bygg, men noen umulighet var det ikke.

**ISBN**

978-82-8289-205-6

**GRADERING**

Åpen

## Forord

Denne rapporten er skrevet for å formidle erfaringene fra byggingen av ZEB-laboratoriet på Gløshaugen til NTNU Campusutvikling og ikke minst NTNU Campussamling. Rapporten er kortfattet og gir oversikt over bakgrunns materialet. Hvis det er uklare punkter i rapporten – eller mot formodning uklare punkter i bakgrunns materialet – kan forfatterne kontaktes for en utgreiing.

Rapporten er en delleveranse fra forskningsarbeidet «ZEB-laboratoriet» som er finansiert gjennom programmet Fremtidens campus, NTNU. Andre delleveranser var en omvisning i ZEB-laboratoriet med en tilhørende powerpointpresentasjon.

Rapporten presenterer allerede innsamlede data i kombinasjon med nye data fra bruken av ZEB-laboratoriet. De tidligere innsamlede dataene handler om både byggeprosess og bygningsteknologi. Medforfatter Atle Engebø har tidligere samlet mye data om byggeprosessen i forbindelse med sitt doktorgradsarbeid. Forskningsprogrammet Klima2050 har samlet eksisterende dokumentasjon om bygningsteknologien på hjemmesiden [www.zeblab.no](http://www.zeblab.no). De nye dataene om bygningsteknologi kommer fra praktiske erfaringer fra driften av ZEB-laboratoriet. Medforfatter Sara Hajizadeh har samlet nye data om brukertilfredsheten i forbindelse med sitt mastergradsarbeid.

Avslutningsvis takker forfatterne Fremtidens Campus og ikke minst NTNU Campusutvikling for muligheten til å formidle erfaringene fra ZEB-laboratoriet. Det er et interessant byggeprosjekt som det er verdt å dra lærdommer fra. Vi vil gjerne formidle erfaringene fra byggingen av ZEB-laboratoriet og er tilgjengelige for videre utgreiing om det er ønskelig.

Trondheim, 5. september 2023

Ola Lædre  
Institutt for bygg- og miljøteknikk, NTNU

# Innholdsfortegnelse

|  |           |
|--|-----------|
| Forord .....   | 3         |
| Innholdsfortegnelse.....   | 4         |
| <b>1 Introduksjon – byggeprosessen, bygningsteknologien og bruken.....</b>               | <b>6</b>  |
| 1.1 <i>Bakgrunn for rapporten</i> .....  | 6         |
| 1.2 <i>Problemstillinger</i> .....   | 6         |
| <b>2 Fremgangsmåte.....</b>  | <b>7</b>  |
| 2.1 <i>Kort om ZEB-laboratoriet</i> .....  | 7         |
| 2.2 <i>Konseptet nullutslippsbygning – Zero Emission Building (ZEB)</i> .....            | 8         |
| 2.3 <i>Fremgangsmåten - byggeprosessen</i> .....   | 8         |
| 2.4 <i>Fremgangsmåten - bygningsteknologi</i> .....                                      | 8         |
| 2.5 <i>Fremgangsmåten - brukertilfredsstillelse</i> .....                                | 9         |
| 2.6 <i>Ressursene i arbeidet</i> .....   | 9         |
| 2.7 <i>Fremstilling av resultatene og analyse</i> .....                                  | 10        |
| <b>3 Byggeprosessen – prosjektgjennomføringsmodellen .....</b>                           | <b>11</b> |
| 3.1 <i>Tostegs samspillskontrakt</i> .....   | 11        |
| 3.1.1 <i>Kontraktuelle virkemidler</i> .....   | 11        |
| 3.1.2 <i>Organisatoriske virkemidler</i> .....   | 14        |
| 3.1.3 <i>Kulturelle virkemidler</i> .....  | 15        |
| 3.1.4 <i>Utfordringer og suksessfaktorer – to-stegs samspillskontrakt</i> .....          | 17        |
| 3.2 <i>Prosjektering med egne fageksperter</i> .....                                     | 18        |
| 3.2.1 <i>Oppstartseminar</i> .....   | 19        |
| 3.2.2 <i>ICE-sesjonene</i> .....   | 20        |
| 3.2.3 <i>Særmøter</i> .....  | 22        |
| 3.2.4 <i>Workshops</i> .....   | 22        |
| 3.2.5 <i>Utfordringer og suksessfaktorer – prosjektering med egne fageksperter</i> ..... | 22        |
| <i>Referanser – Byggeprosessen</i> .....   | 23        |
| <b>4 Bygningsteknologi – optimalisering av valgte løsninger .....</b>                    | <b>24</b> |
| 4.1 <i>Referansetall for energibruk i bygninger</i> .....                                | 24        |
| 4.2 <i>Klimatilpasning av bygninger</i> .....  | 26        |
| 4.3 <i>Voksboks/varmebatteri</i> .....   | 27        |
| 4.4 <i>Solskjerming</i> .....  | 28        |
| 4.5 <i>Ventilasjon</i> .....   | 28        |
| 4.6 <i>Passiv kjøling</i> .....  | 30        |
| 4.7 <i>Fuktsikring i byggeprosessen</i> .....  | 31        |
| <b>5 Bruken – sett fra brukernes ståsted .....</b>                                       | <b>33</b> |
| 5.1 <i>Fysisk miljø</i> .....  | 33        |
| 5.1.1 <i>Hvordan opplever brukerne det fysiske miljøet i ZEB-laboratoriet?</i> .....     | 33        |
| 5.1.2 <i>Hva er erfaringene med det fysiske miljøet i ZEB-laboratoriet?</i> .....        | 34        |
| 5.2 <i>Tekniske system</i> .....   | 34        |
| 5.2.1 <i>Hvordan opplever brukerne de tekniske systemene i ZEB-laboratoriet?</i> .....   | 34        |
| 5.2.2 <i>Hva er erfaringene med de tekniske systemene i ZEB-laboratoriet?</i> .....      | 35        |
| 5.3 <i>Fasilitetene</i> .....  | 35        |
| 5.3.1 <i>Hvordan opplever brukerne fasilitetene i ZEB-laboratoriet?</i> .....            | 35        |
| 5.3.2 <i>Hva er erfaringene med det fasilitetene i ZEB-laboratoriet?</i> .....           | 37        |
| <b>6 Oppsummering .....</b>  | <b>38</b> |
| 6.1 <i>Byggeprosessen</i> .....  | 38        |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 6.2   | <i>Bygningsteknologien</i> .....                                    | 39        |
| 6.3   | <i>Brukertilfredsheten</i> .....                                    | 41        |
| <b>Vedlegg 1 Forskjeller mellom ZEB-laboratoriet og andre null-/lavutslippsbygg .....</b>             |   | <b>42</b> |
| <b>Vedlegg 2 Fordeler og ulemper med å bygge Zero Emission Buildings (ZEB) – foreslått av ChatGPT</b> |   | <b>45</b> |
|   | <i>Fordeler med å bygge Zero Emission Buildings, 21.05.23 .....</i> | <i>45</i> |
|   | <i>Ulemper med å bygge Zero Emission Buildings, 21.05.23 .....</i>  | <i>46</i> |
|   | <i>Fordeler med å bygge Zero Emission Buildings, 05.09.23 .....</i> | <i>47</i> |
|   | <i>Ulemper med å bygge Zero Emission Buildings, 05.09.23 .....</i>  | <i>47</i> |

# 1 Introduksjon – byggeprosessen, bygningsteknologien og bruken

## 1.1 Bakgrunn for rapporten

NTNU Campusutvikling og NTNU Campussamling skal blant annet bygge bærekraftige, fleksible bygninger og byggekostnadene har fått mye oppmerksomhet. Behovet for å senke byggekostnadene økte da regjeringen reduserte kostnadsrammen for campusutviklingen i 2022.

NTNU og SINTEF Community har nylig bygget ZEB-laboratoriet på Gløshaugen Campus. Erfaringene fra ZEB-laboratoriet er preget av at det er nullutslippsbygg med høye ambisjoner for bærekraft som kombinerer mange nye løsninger. For å nå ambisjonene samlet prosjektorganisasjonen spesialistgrupper med ulik faglig bakgrunn i både utviklingsfasen og prosjekteringsfasen. Byggekostnadene ble holdt innenfor kostnadsrammen ved hjelp av verdistyrte prosjektering og tett prosjekteieroppfølging i byggeprosessen. Medvirkningsprosesser fra spesialistgrupper og bruk av digitale løsninger la til rette for en vellykket byggeprosess. ZEB-laboratoriet utmerket seg ved å teste innovative bygningsteknologiske løsninger, og har nå vært en miljøvennlig arbeidsplass med fleksible løsninger for kontorplasser og undervisning i et par år.

For at NTNU Campusutvikling og NTNU Campussamling og andre byggherrer skal lære fra planleggingen, gjennomføringen og bruken av ZEB-laboratoriet finansierte NTNU Fremtidens Campus et arbeid med å dokumentere erfaringene. Noen av de valgte løsningene medførte økte investeringskostnader – men fornuftige levetidskostnader ved lang levetid. Noen av de valgte løsningene var både mer bærekraftige enn minimumsløsningene beskrevet i TEK-17 og kostet mindre. De sistnevnte løsningene er å foretrekke for alle byggherrer, enten de mest opptatt av bærekraft eller økonomiske kostnader. Erfaringene fra ZEB-laboratoriet har en tydelig overføringsverdi for NTNU Campusutvikling, og denne overføringsverdien økte da kostnadsrammen ble redusert.

Denne rapporten er en av leveransene fra arbeidet finansiert av NTNU Fremtidens campus. ZEB-laboratoriet ga viktige erfaringer med byggeprosess og bygningsteknologi som hittil bare delvis er samlet. Mange av erfaringene er dokumentert tidligere, men denne rapporten er først med å gi en samlet fremstilling av erfaringene fra gjennomføringen og de første driftsårene, både med tanke på byggeprosessen, den anvendte bygningsteknologien og samt den daglige bruken. Rapporten skal gi byggherrer for bærekraftige bygg en oppsummering av de viktigste læringspunktene.

## 1.2 Problemstillinger

Rapporten sammenstiller erfaringene fra byggeprosessen, bygningsteknologien og bruken av ZEB-laboratoriet for NTNU Campusutvikling.

Problemstillingene rapporten svarer på er:

1. Hva var nytt med byggeprosessen og bygningsteknologien på ZEB-laboratoriet?
2. Hva er de samlede erfaringene med byggeprosessen og bygningsteknologien på ZEB-laboratoriet 2 år etter overtakelsen?
3. Hva kan NTNU Campusutvikling lære av byggeprosessen og bygningsteknologien på ZEB-laboratoriet?

## 2 Fremgangsmåte

Rapporten presenterer allerede innsamlede data i kombinasjon med nye data fra bruken av ZEB-laboratoriet for å oppnå målet og svare på forskningsspørsmålene. Det er forfatterne som har samlet dataene.

Allerede innsamlet data omfatter dokumenter og referat fra intervju med nøkkelpersoner. I tillegg til intern prosjektdokumentasjon som kontrakt med entreprenør, møtereferat og referat fra prosjektsamlinger er en god del prosjektdokumentasjon eksternt tilgjengelig fra <https://zeblab.no/scientific-journals>. Intervjuene var med nøkkelpersoner fra gjennomføringen (NTNU, SINTEF og Veidekke), utvalgte brukere av bygget samt utvalgt personell fra driftsorganisasjonen.

De nye dataene ble samlet fra både vitenskapelig ansatte, teknisk-administrativt ansatte og studenter. De tverrfaglige dataene handlet om både bygningsteknologi, byggeprosess og bruken av ZEB-laboratoriet.

### 2.1 Kort om ZEB-laboratoriet

ZEB-laboratoriet er et levende kontorlaboratorium på 4 etasjer og 2000 m<sup>2</sup> som ligger i Trondheim på campus NTNU Gløshaugen, nær de eksisterende laboratoriene til SINTEF Community og NTNU Institutt for bygg- og miljøteknikk. Ambisjonen for CO<sub>2</sub>-utslipp er ingen netto utslipp over livsløpet – ZEB-COM.

Utformingen av ZEB-laboratoriet ble gjort i et samspill av NTNU, SINTEF Community, Orion og Veidekke Entreprenør med sitt team; LINK Arkitektur, Aas-Jakobsen, Siemens, Multiconsult, Bravida og Vintervoll. NTNU og SINTEF Community eier bygget i fellesskap. Norges Forskningsråd og Enova delfinansierte bygget.

ZEB-laboratoriet er et fullskala kontorbygg der bygningsfasader, komponenter og tekniske systemer kan modifiseres og skiftes ut. Bygningsdelene kan kobles sammen slik at de utgjør en del av eller et komplett nullutslippsbygg. Laboratoriets tilpasningsmuligheter gjør det mulig å undersøke ulike bygningskonfigurasjoner. Undersøkelser og demonstrering av ny teknologi i et fullskala kontorbygg er viktig for å redusere risikoen for andre som skal bygge nullutslippsbygg.

To år etter ferdigstilling tester fremdeles brukerne de nye løsningene for å optimalisere effekten av dem. Bygget danner et levende laboratorium der brukerne – som også bruker det som et vanlig kontor- og undervisningsbygg – blir en eksperimentell parameter som påfører lokalene varierende belastning. En viktig del av optimaliseringen innebærer å dokumentere erfaringene for at fremtidige byggherrer skal kunne lære av dem. Vanligvis forlater hele prosjektorganisasjonen bygget etter ferdigstillingen, men på ZEB-laboratoriet har mange av byggherrens representanter blitt igjen for å forske på erfaringene med de nye løsningene.

I oppføring kostet bygget 93 mill. kr, eks. MVA. Med 2000 kvadratmeter ble gjennomsnittsprisen cirka 46 500 kr/m<sup>2</sup> BRA. Entreprenøren anslår at bygget ble anslagsvis 25 % dyrere på grunn av de spesielle tekniske løsningene. Kostnaden for energiltak ut over kravene i TEK17 ble beregnet til 18 mill. kr og resten var kostnader på grunn av at bygget ble bygget som et fullskala laboratorium. Det er et pilotprosjekt som dokumenterer et stort potensial for å spare CO<sub>2</sub> i

byggenæringen, så ekstrakostnaden til bygging kan bli mer enn oppveiet av prosjektets nytte for samfunnet.

I 2022 fikk ZEB-laboratoriet *Statens pris for byggkvalitet*. Kommunal- og distriktsminister Sigbjørn Gjelsvik overleverte prisen. I begrunnelsen het det blant annet at årets vinner utvikler løsninger som kan hjelpe oss med det grønne skiftet. Samme år fikk ZEB-laboratoriet Bygg21 sin pris for beste praksis; *Betonghammeren*. ZEB-laboratoriet har sine egne hjemmesider på [www.zeblab.no](http://www.zeblab.no).

## 2.2 Konseptet nullutslippsbygning – Zero Emission Building (ZEB)

ZEB-laboratoriet er unikt i verdenssamheng med hvordan det er planlagt for å oppnå netto null CO<sub>2</sub>-utslipp gjennom sin levetid. Den CO<sub>2</sub>-mengden som blir sluppet ut i forbindelse med bygging av bygget, skal kompenseres gjennom negativt utslipp i driftsfasen slik at bygget oppnår netto null CO<sub>2</sub>-utslipp i løpet av 60 år.

ZEB-laboratoriet har ikke negativt CO<sub>2</sub>-utslipp i bokstavelig forstand. Det trekker ikke CO<sub>2</sub> ut av atmosfæren. Det bygget gjør er å eksportere strøm fra solkraft, produsert med null utslipp i driftsfasen. I strømmettet regner man med et CO<sub>2</sub>-utslipp på X gram CO<sub>2</sub> per produserte kilowattime (kWh). Verdien av X vil i praksis variere ut fra hvilken kraftmiks som leverer til nettet til enhver tid. Som beregningsverdi i miljøregnskapet for ZEB-laboratoriet er X = 132 g CO<sub>2</sub>/kWh benyttet. Dersom nabobyggene henter strøm fra ZEB-laboratoriet, vil de få sine kilowattimer, men ikke utslippet på 132 gram g CO<sub>2</sub>/kWh. Dermed skal ZEB-laboratoriet ha spart et utslipp på 132 gram CO<sub>2</sub> per eksporterte kWh, og dette teller som negative utslipp. Summen av eksportert kraft fra ZEB-laboratoriet gjennom byggets levetid skal altså veie opp for CO<sub>2</sub>-utslippet som ble forårsaket av å føre opp bygget (Construction), å drifte det (Operation), og tilvirkning av materialene som bygget er laget av (Materials). Denne ambisjonen kalles ZEB-COM. Merk at definisjonen ikke omfatter produksjon av møbler og annet inventar som ikke er fastmontert byggeteknisk utstyr, som PC-er, infoskjermer eller kjøleskap. Dog regner med energien som går med til å drifte inventaret.

## 2.3 Fremgangsmåten - byggeprosessen

For å studere byggeprosessen for ZEB-laboratoriet gjennomførte daværende doktorgradsstudent Atle Engebø en longitudinal casestudie av utviklingsfasen som pågikk i nesten ett år. Data ble samlet inn med dokumentgjennomgang, 12 semistrukturerte intervjuer og totalt 20 observasjoner. Intervjuene varte tilsammen i omtrent 20 timer og resulterte i omtrent 100 sider med notater. Observasjonene varte totalt i cirka 80 timer og resulterte i omtrent 175 sider med notater. Etter den longitudinale casestudien av utviklingsfasen gjennomførte han en casestudie av ZEB-laboratoriet i gjennomføringsfasen.

Selv om prosjektorganisasjonen ble hindret av en omregulering og ble påvirket av Covid-pandemien var prosjektdeltakerne positive til gjennomføringen av byggeprosjektet. Det kan ha ført til at de var mer positive til de valgte virkemidlene i prosjektgjennomføringsmodellen enn det var grunnlag for, men samtidig taler den positive innstillingen for at virkemidlene fungerte bra.

## 2.4 Fremgangsmåten - bygningsteknologi

Kapitlet om bygningsteknologi er basert på erfaringer hentet fra prosjektering, oppføring og drift i ZEB-laboratoriet. Kapitlet er skrevet av postdoktor Erlend Andenæs, som har ledet et stort antall omvisninger for besøkende i bygget. Bygget ble prosjektert fra 2017, byggingen startet



sommeren 2019, og overtakelse skjedde i november 2020. Offisiell åpning ble utsatt til mars 2021 på grunn av koronapandemien. Professor Tore Kvande har vært NTNUs prosjektleder for ZEB-laboratoriet gjennom prosjektering og oppføring, og han har vært driftsansvarlig de første to årene av byggets levetid. Hans erfaringer har vært til stor nytte for kapitlet. Samtaler over tid med annet teknisk personell i bygget samt data fra testingen av byggets forskjellige løsninger har også blitt brukt som grunnlag. Forskningsartikler og rapporter om bygget er samlet på [www.zeblab.no](http://www.zeblab.no). Der er det også en kontinuerlig oppdatert informasjonstavle som viser nøkkeltall for byggets energiproduksjon og inneklimate.

## 2.5 Fremgangsmåten - brukertilfredsstillelse

Masterstudent Sara Hajizadeh brukte ZEB-laboratoriet som case. Hun så på sammenhengen mellom aktivitetene i tidligfasen og verdiskapingen av prosjekt. Masteroppgaven var omfattende, og det er delen om brukernes erfaringer fra den daglige bruken av ZEB-laboratoriet som ga grunnlaget for kapitlet om brukertilfredsstillelse. For å vurdere brukertilfredsstillelsen gjennomførte hun en Post Occupancy Evaluation. Post Occupancy Evaluation handler om å evaluere ytelsen til bygninger en stund etter at de er bygd og tatt i bruk.

Evalueringene kan gjennomføres på flere måter, og spørsmålene som besvares er ikke fullstendig standardiserte. Erfaringene fra bruken er samlet med en såkalt walkthrough og 15 komplette utfyllinger av ett omfattende spørreskjema. Både spørsmålene som ble stilt til brukerne i løpet av walkthrough og spørsmålene i spørreskjemaet er utformet av masterstudent Sara Hajizadeh etter inspirasjon fra flere sett av spørsmål laget for Post Occupancy Evaluation.

Walkthrough er en datainnsamlingsmetode som kan brukes i Post Occupancy Evaluation. Gjennomføringen av walkthrough på ZEB-laboratoriet skjedde på dagtid mens det var i bruk med postdoktor Erlend Andenæs som omviser. I tillegg til å observere i hvert av rommene ble brukere fra hver etasje stilt spørsmål om blant annet det fysiske miljøet i bygget, erfaringene med styringssystemene samt fasilitetene i bygget.

Svarene på spørsmålene stilt i løpet av walkthrough kan ha blitt påvirket av at det var tilfeldig hvilke brukere som ble spurt. Hvis det førte til at det var de mest positive brukerne som tok seg tid, kan det ha ført til for positive svar. Samtidig ville misfornøyde brukerne antakeligvis tatt seg tid hvis de fikk en mulighet til å formidle misnøyen. Videre kan svarene fra walkthrough og i spørreskjemaet ha blitt påvirket av at ZEB-laboratoriet hadde ledig kontorplasskapasitet på tidspunktet for datainnsamlingen. Brukerne kan ha blitt mer positive fordi det var bedre plass i kontorlokalene og bedre tilgang på felles fasiliteter enn når bygget er fullt belastet.

## 2.6 Ressursene i arbeidet

Ressursene i arbeidet var professor Ola Lædre, forsker Atle Engebø, postdoktor Erlend Andenæs, masterstudent Sara Hajizadeh, professor Tore Kvande og professor Ole Jonny Klakegg. Disse seks kjenner hverandres arbeider godt etter master- og doktorgradsveiledning, samarbeid og sampublisering ved NTNUs Institutt for bygg- og miljøteknikk. Erlend Andenæs og Atle Engebø kjenner gjennomføringsfasen for ZEB-laboratoriet godt fra doktorgradsarbeidene sine. Erlend Andenæs og Tore Kvande kjenner bruksfasen for ZEB-laboratoriet siden de har arbeidsplassene sine der.

Sara Hajizadeh kjenner instituttet etter å ha vært student og forskningsassistent knyttet til forskningsprosjektet Optimaltid før hun startet arbeidet med masteroppgaven. Ole Jonny Klakegg er prosjektleder for forskningsprosjektet Optimaltid og han har vært veileder for mastergradsarbeidet til Sara. Masteroppgavearbeidet var grunnlag for rapportdelen om erfaringene fra bruk av ZEB-laboratoriet, men masteroppgaven handlet i tillegg til erfaringene fra ZEB-laboratoriet i Trondheim om erfaringer fra et bygg med lignende ambisjoner i Groeningen, Nederland. Resultatene og konklusjonene fra masteroppgaven er supplert med Tore Kvandes og Erlend Andenæs' refleksjoner fra arbeidsdagene i ZEB-laboratoriet.

## 2.7 Fremstilling av resultatene og analyse

Resultatene fra arbeidet med byggeprosessen, bygningsteknologien og bruken er beskrevet i hvert sitt kapittel. Kapitlene er i utgangspunktet skrevet uavhengig av hverandre. Kapitlet om byggeprosessen er skrevet fra perspektivet til prosjektorganisasjonen som sto for planlegging, prosjektering og bygging. Kapitlet om bygningsteknologi er skrevet fra perspektivet til byggherrens bygningsteknologispesialister og driftsorganisasjon. Kapitlet om brukertilfredsstillelse er skrevet fra brukerperspektivet. Selv om kapitlene er skrevet uavhengig av hverandre, så handler de om samme bygning og er skrevet av personer som har samarbeidet på tvers. Når samme forhold er tatt opp i flere kapitler er tanken at det skal være utfyllende og ikke gjentakende.

I valget hva som skal være med og hva som ikke skal være med i rapporten er det lagt vekt på hvilke av erfaringene fra ZEB-laboratoriet som er mest viktige for Campussamlingen. Det er tenkt på at ett av effektmålene gitt i Kunnskapsdepartementets reviderte oppdragsbrev til NTNU Campussamling fra juli 2022 er at «*NTNU har en effektiv og bærekraftig campus*». ZEB-laboratoriet er et fullskala laboratorium og et nullutslippsbygg, men det er erfaringene knyttet til at det er et nullutslippsbygg som får mest oppmerksomhet i rapporten.

Datainnsamlingen og rapportskrivningen har fulgt en på forhånd fastsatt oversikt over milepæler. Arbeidet startet i første kvartal 2023. Resultatene ble presentert på et kort avslutningsseminar med en omvisning i ZEB-laboratoriet i august 2023.

Rapporten gir en kondensert fremstilling av resultatene med tilhørende overordnede konklusjoner. Det finnes mer detaljert bakgrunnsmateriale for det meste av innholdet. Bakgrunns materialet er i form av vitenskapelige artikler, rapporter tilgjengelig på [www.zeblab.no](http://www.zeblab.no) og prosjektdokumentasjon som kan være tilgjengelig for NTNU Campusutvikling etter henvendelse til forfatterne.

## 3 Byggeprosessen – prosjektgjennomføringsmodellen

Dette kapitlet er en syntese av i hovedsak fire vitenskapelige artikler og en masteroppgave. Engebø et al. (2021) og Engebø et al. (2020a) er mest brukt til å beskrive *samspillskontrakten* og elementene som inngikk i den. Engebø et al. (2020b), Time et al. (2019) og masteroppgaven til Lædre (2022) er mest brukt til å beskrive *prosjektering med egne fageksperter*.

### 3.1 Tostegs samspillskontrakt

Byggherren og entreprenøren inngikk en tostegs samspillskontrakt. Tostegskontrakt er en kontrakt mellom byggherre og entreprenør der den første delen omfatter utvikling av valgt konsept og den andre delen eventuelt omfatter en totalentreprise. NS8402 Alminnelige kontraktsbestemmelser for rådgivningsoppdrag honorert etter medgått tid lå til grunn for det første steget med utviklingsfasen. I steg en var entreprenøren rådgiver for byggherren. Prosjekteringen var entreprenørstyrt.

I steg en utviklet byggherren og entreprenøren prosjektet sammen. Entreprenøren fikk betalt for rådgivningen med prisformatet regningsarbeid. Dermed betalte byggherren for rettighetene til prosjekteringsmaterialet. Entreprenøren fikk ikke betalt for å utarbeide tilbudet for steg to.

Både byggherren og entreprenøren kunne valgt å la være å fortsette videre til steg to. Begge ville fortsette, så de inngikk en totalentreprisekontrakt basert på NS8407 Alminnelige kontraktsbestemmelser for totalentrepriser.

Steg to omfattet både detaljprosjektering og bygging. Kontrakten for steg to var en sumkontrakt med målpris. Hvis de samlede kostnadene til utførelse oversteg målprisen skulle partene dele kostnadene 50/50. Hvis de samlede kostnadene til utførelse kom under målprisen skulle partene dele besparelsene tilsvarende.

De følgende tre underkapitlene tar for seg virkemidlene som ble brukt for å fremme samspillet mellom partene i prosjektet. Først kommer et kapittel om kontraktuelle virkemidler, så et om kulturelle virkemidler før et om organisatoriske virkemidler. Til sist kommer et fjerde underkapittel om utfordringer og suksessfaktorer med tostegs samspillskontrakt for ZEB laboratoriet.

#### 3.1.1 Kontraktuelle virkemidler

Det var mange kontraktuelle virkemidler i kontrakten for prosjekteringen og byggingen av ZEB-laboratoriet. Tabell 3.1 gir en oversikt over virkemidlene før de blir beskrevet. Virkemidlene blir beskrevet i samme rekkefølge som de har i tabellen.

Tabell 3.1 *De kontraktuelle virkemidlene i prosjektgjennomføringsmodellen for ZEB-laboratoriet*

|                                   |
|-----------------------------------|
| Totalentreprise                   |
| Teamsammensetning                 |
| Tidlig involvering av entreprenør |
| Konfliktløsningsmekanisme         |
| Oppstartsseminar                  |
| Oppfølgingsworkshops              |
| Formell avtale om samarbeid       |
| Målpris (delt risiko/gevinst)     |
| Åpen bok/økonomisk åpenhet        |
| Felles mål                        |
| Felles beslutningstaking          |
| Særmøter                          |
| Kontinuitet for nøkkelpersonnell  |
| Rett til å bytte ut deltakere     |

Kontrakten beskriver hva og på hvilke betingelser entreprenøren skal levere. Byggherren bestemmer selv sin grad av involvering og hvor mye ressurser som skal brukes på kontroll av entreprenørens leveranser. Gjennomføringsmodellen på ZEB-laboratoriet tok utgangspunkt i en tostegs samspillskontrakt basert på en modifisert **totalentreprise** der byggherren var svært involvert i teamet som gjennomførte utviklingsfasen. Det var entreprenøren som styrte prosjekteringen i både utviklingsfasen og gjennomføringsfasen – såkalt entreprenørstyrt prosjektering. **Teamsammensetningen** har mye å si for evnen til å ta beslutninger. Flere av teammedlemmene var håndplukket av totalentreprenøren, og en av byggherrerepresentantene uttalte «Vi har blitt veldig godt kjent med dem [prosjektteamet] (...) og det har vært god kjemi i gruppen. Det har vært en vilje til å gå videre og løse problemer. Hele prosessen har vært veldig løsningsorientert». Byggherren uttalte at en ulempe med **tidlig involvering av entreprenør** var at det påløp store kostnader tidlig i byggeprosjektet, men i lys av prosjektets kompleksitet var det hensiktsmessig. Flere av de intervjuede uttalte tidlig involvering førte til at deltakerne ble kjent og fikk forståelse for hverandres roller.

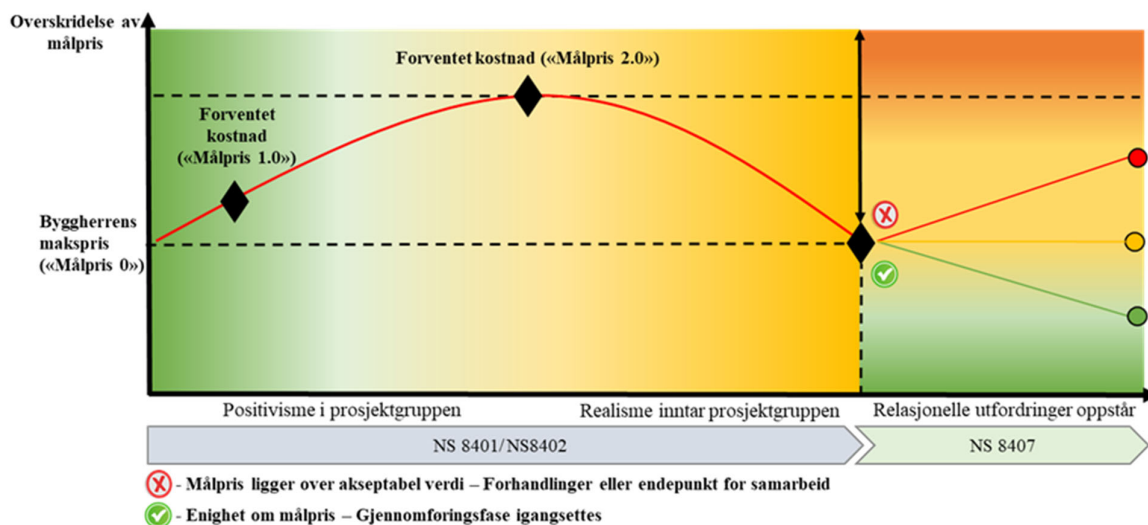
Kontrakten inneholdt en **konfliktløsningsmekanisme** der konflikter som teamet ikke klarte å løse måtte presenteres for en komité. Denne komiteen besto av ledende representanter fra entreprenøren og fra byggherren uten direkte tilknytning til prosjektet. Konfliktløsningsmekanismen ble avklart med alle deltakerne, men ble aldri tatt i bruk fordi teamet klarte å forhindre uoverensstemmelsene fra å eskalere.

**Oppstartseminar og oppfølgingsworkshops** ble gjennomført for å sørge for teambuilding og gi teamet kunnskap. Byggherren arrangerte blant annet oppfølgingsworkshops for å introdusere teamet til ZEB-COM<sup>1</sup> og Living Lab-kravene. Flere av underentreprenørene og rådgiverne sendte deltakere til disse workshopene for å lære på egen regning. Bruk av workshops for å utvikle de involverte faglig økte prosjektkostnadene, men de førte til at teamet forsto byggherrens ambisjoner.

<sup>1</sup> Fra [www.zeb.no](http://www.zeb.no): ZEB-COM: “The building’s renewable energy production compensates for greenhouse gas emissions from construction, operation, and production of building materials”

Den **formelle avtalen om samarbeid** ble iterativt utviklet og signert av teamdeltakerne i løpet av oppstartsseminaret. Avtalen skisserte retningslinjer for hvordan prosjektteamet skulle samarbeide, og slettet dermed noen organisatoriske grenser.

**Målpris** med delt risiko/gevinst ble kombinert med **åpen bok**. Byggherren og entreprenøren var enige om å dele risiko og gevinst. Partenes tradisjonelle tankesett gjorde det vanskelig å komme frem til en endelig målpris byggherren hadde finansiering til. For eksempel forventet prosjektteamet at byggherren ønsket å få så mange kvadratmeter som mulig, mens byggherren ville prioritere kvalitet over kvadratmeter. Forhandlingene om målpris tok tid, men begge partene så seg tjent med å gå videre til steg to så de kom til enighet. Figur 3.1 viser hvordan målprisen utviklet seg i løpet av utviklingsfasen.



Figur 3.1 Målprisutviklingen i løpet av utviklingsfasen, slik den var for ZEB-laboratoriet (sakset fra Engebø et al., 2021).

I starten av utviklingsfasen med NS8402 lå målprisen likt med byggherrens makspris. Etter at en del tekniske løsninger var lagt inn økte forventet kostnad til Målpris 1.0, men kostnadsproblemet var størst etter at mange flere tekniske løsninger var lagt inn og entreprenøren beregnet Målpris 2.0 som lå langt over byggherrens makspris. Da gikk noe av positivismen over og realismen innhentet prosjektteamet. Det ble krevende å forhandle seg fra Målpris 2.0 til kontraktsummen for totalentreprisekontrakten med NS8407 i steg 2, som endte opp omtrent likt med byggherrens opprinnelige makspris.

I gjennomføringsfasen praktiserte partene **Åpen bok**, som betyr at byggherren hadde tilgang på entreprenørens budsjett for prosjektet. Byggherren ville ha økonomisk åpenhet for å hindre at entreprenøren valgte billige løsninger med lav kvalitet. Entreprenøren orienterte byggherren regelmessig om prosjektstatus, ga innsyn i kostnadsestimeringen og partene kunne åpent diskutere gjeldende målpris. Den mest fremtredende svakheten ved åpen bok var frykten for at entreprenøren kunne holde tilbake informasjon, for eksempel ved å vise estimater med utilstrekkelig detaljeringsnivå eller inkludere skjulte risikotillegg i prisene.

Kontraktfestede **felles mål** er sentralt. Det kan for eksempel illustreres med insentivene i rådgivningsoppdrag honorert etter medgått tid. Dess flere timer den prosjekterende fakturerer,

dess større blir inntjeningen. Kvaliteten på prosjekteringsmaterialet øker ikke nødvendigvis med antall fakturerte timer, så honoreringsformen kan føre til suboptimalisering. Målprisen – med honorering etter medgått tid med felles risiko/gevinst – representerte et felles mål. Delingen av risiko/gevinst gjorde det mulig for de prosjekterende å ta ett skritt tilbake når beslutninger ble tatt, der de kunne redusere omfanget av egne fakturerte timer når de så at det økte gevinsten for alle.

Partene var enige om at de skulle praktisere **Felles beslutningstaking** i utviklingsfasen. De fleste beslutningene ble tatt i Integrated Concurrent Engineering (ICE)-sesjonene der partene hadde representanter med kunnskap og myndighet til å ta beslutninger. Uløste problemer var ofte knyttet til avveiningen mellom kostnader og tekniske løsninger, og partene til tross for enigheten om felles beslutningstaking rådet det innimellom forvirring rundt hvem som burde ta de endelige avgjørelsene. Ved å ha hele prosjekteringsteamet fysisk tilstede kunne beslutningstakingen fremskyndes fordi uløste spørsmål ble sendes videre til parallelle **særmøter**. Deltakerne fra den felles ICE-sesjonen fortsatte videre til det særmøtet der det var størst behov for deltakelsen deres.

**Kontinuitet for nøkkelpersonell** er viktig for å bevare et integrert team, og oppdragsgivers **rett til å bytte ut deltakere** fra entreprenøren kan være nyttig å ta med i kontrakten. Kontrakten på ZEB-laboratoriet beskrev i tillegg muligheten for å økonomiske sanksjoner mot entreprenøren ved bytte av nøkkelpersonell. Retten til å bytte deltakere kan bidra til å holde medlemmene i prosjekteringsteamet på tærne, for eksempel i situasjoner der noen er uvillige til å tilpasse seg teamet.

### 3.1.2 Organisatoriske virkemidler

I tillegg til de kontraktuelle virkemidlene beskrevet i kontrakten hadde prosjektgjennomføringsmodellen organisatoriske virkemidler. De organisatoriske virkemidlene ble ikke direkte beskrevet i kontrakten, men byggherren og entreprenøren var likevel enige om å bruke dem. Tabell 3.2 gir en oversikt over de organisatoriske virkemidlene før de blir beskrevet. Virkemidlene blir beskrevet i samme rekkefølge som de har i tabellen.

Tabell 3.2 *De organisatoriske virkemidlene i prosjektgjennomføringsmodellen for ZEB-laboratoriet*

|   |
|---|
| BIM – Bygningsinformasjonsmodell        |
| ICE – Integrated Concurrent Engineering |
| Standardiserte ytelsesmål               |
| Tvisteløsningsråd                       |
| Standardiserte prosesser                |

Partene var enige om at **byggningsinformasjonsmodellen (BIM)** skulle være hovedredskapet for informasjonsutveksling. Modellen gjorde det mulig for alle deltakerne å raskt forstå problemer og registrere endringer underveis i prosjekteringen. Deltakerne delte sine fagmodeller kontinuerlig – selv om modellene ikke var ferdige. Dermed unngikk deltakerne å begrense informasjonsflyten, noe som kan være et problem i prosjekter der deltakerne ikke vil dele sine fagmodeller før de er endelige.

Hver uke gjennom utviklingsfasen var prosjekteringsteamet fysisk samlet til heldags **Integrated Concurrent Engineering (ICE)**-sesjoner. Først satt deltakerne samlet i fellessesjonen før de brøt opp for å jobbe i parallelle særmøter. Byggherren, entreprenøren, underentreprenørene og rådgiverne møttes i særmøtene på tvers av fag for å avklare spørsmål til kostnader og tekniske løsninger. Av og til falt deltakerne tilbake i et tradisjonelt mønster, der prosjekteringsmøtene dreide seg om å planlegge den neste ukens arbeid, men stort sett klarte de å bruke tiden i ICE-sesjonene på samordning og beslutningstaking.

**Standardiserte ytelsesmål** var viktige for å spore fremgang og identifisere mulige forbedringer. Entreprenøren målte fremdrift i prosjekteringen med hjelp av Percent Planned Complete (PPC). I PPC sammenlignes faktisk utførte aktiviteter med aktiviteter planlagt utført (uttrykt i %). Prosjekteringslederen brukte omtrent en time av hver ICE-økt på å spørre deltakerne om deres aktiviteter var fullført. Enkelt deltakere ble ikke straffet foran resten av teamet for ikke å ha blitt ferdig, men de måtte fortelle i plenum hvorfor de eventuelt var forsinket. Målingen av fremdriften i utviklingsfasen virket stimulerende på de fleste deltakerne i prosjekteringsteamet.

Selv om det ikke fikk noen tvister, så hadde partene et **Tvisteløsningsråd** og konflikteskaleringsstige. Hensikten med tvisteløsningsrådet var å unngå ressurskrevende og forsinkende behandling av tvister i domstolssystemet. Hensikten med konflikteskaleringsstigen var å hindre overbelastning av tvisteløsningsrådet. Partene hadde i tillegg nedfelte **Standardiserte prosesser** for møtестruktur for å unngå misforståelser. Det innebar at partene forpliktet seg til å stille med deltakerne med kunnskap og myndighet til å ta avgjørelser på de faste møtene.

### 3.1.3 Kulturelle virkemidler

I tillegg til de kontraktuelle virkemidlene og de organisatoriske virkemidlene hadde prosjektgjennomføringsmodellen kulturelle virkemidler. I likhet med de organisatoriske ble heller ikke kulturelle virkemidlene direkte beskrevet i kontrakten, men byggherren og entreprenøren var likevel enige om å bruke dem. Tabell 3.3 gir en oversikt over de kulturelle virkemidlene før de blir beskrevet. Virkemidlene blir beskrevet i samme rekkefølge som de har i tabellen.

Tabell 3.3 *De organisatoriske virkemidlene i prosjektgjennomføringsmodellen for ZEB-laboratoriet*

|                                      |
|--------------------------------------|
| Støtte fra ledelsen (organisasjonen) |
| Støtte fra ledelsen (prosjekt)       |
| Felles langsiktige interesser        |
| Ansvarlige fasilitatorer             |
| Felles lunsj                         |
| Gjensidig evaluering                 |
| Speed dates                          |
| Kultur uten beskyldninger            |
| Gjensidig respekt                    |
| Gjensidig avhengighet                |
| CV-bygging                           |

Ideelt sett bør organisasjonens mål samsvare med den enkelte prosjektdeltakers mål. Betydningen av **støtte fra ledelsen (organisatorisk og prosjektrelatert)** og **felles langsiktige interesser** ble tydelig for partene da ZEB-laboratoriet da byggingen ble midlertidig stoppet av kommunen på grunn av at Campusprosjektet til NTNU førte til ny behandling av reguleringsplanen for området

med den opprinnelig planlagte tomten. Da uttrykte ledelsen fra både byggherre og entreprenør at det planlagte ZEB-laboratoriet skulle gjennomføres, og både byggherren og entreprenørens representanter i prosjektet var tydelige på at de ønsket å fortsette til tross for oppholdet i fremdrift. Byggherrens representanter ville ha prosjektet gjennomført. Entreprenørens representanter var kanskje interessert i å gjennomføre prosjektet for å kunne stå sterkere i Campusprosjektets fremtidige konkurranser. Støtte fra ledelsen og en felles interesse av å unngå negative konsekvenser når uforutsette hendelser oppstår gjør det enklere å unngå problemer.

**Ansvarlige fasilitatorer, felles måltider, gjensidig evaluering og speed dates** var alle virkemidler som ble brukt i utviklingsfasen for ZEB-laboratoriet for å ha skape godt samarbeid i prosjektteamet. Formelt hadde prosjektet én ekstern ansvarlig fasilitator som var innleid av byggherren. I praksis fungerte entreprenørens prosjekteringsleder også som fasilitator. Begge gjorde nytte for seg. Fasilitatoren var dyktig i forhold til byggherrens leveringsmetode, mens prosjekteringslederen hadde kompetanse i forhold til entreprenørens leveringsmetode. Felles lunsjmåltid på dagene med ICE-sesjoner var et viktig virkemiddel for samarbeidet og teamfølelsen. Det var byggherren som spanderte lunsjen. Sosialiseringen gjennom halvtimen som var fast avsatt til lunsj ble oppfattet av deltakerne som en suksessfaktor som virket utover den rent fysisk forfriskende effekten som måltidet ga. Det er skrevet lite om bruk av gjensidig evaluering og speed dates i byggeprosjekter, men det ble brukt i utviklingsfasen for ZEB-laboratoriet for å evaluere og forbedre samarbeidet i prosjektteamet. Prosjektteamet hadde egne sesjoner der hver enkelt prosjektdeltaker møtte de andre prosjektdeltakeren en-til-en (speed date). For hver speed date ga begge deltakerne konstruktiv kritikk og ros etter en fastsatt punktliste om hva de følte om samarbeidet dem imellom (gjensidig evaluering). Det var uvant, men deltakerne ble tvunget til å ta opp både det som fungerte bra og det som fungerte dårlig i samarbeidet. Dermed unngikk teamet at vanskelige forhold ble liggende urørt.

Etableringen av **kultur uten beskyldninger og gjensidig respekt** i prosjektteamet handlet om å hindre deltakerne fra å brenne inne med nyttige meninger. Prosjektteamet gikk fra det prosjektdeltakerne kalte et "tradisjonelt motstridende forhold" til et samarbeid som forhindret tvister fra å eskalere til konflikter. Partene opplevde faglige uenigheter, men de ble diskutert uten at de eskalerte. En kultur uten beskyldninger der prosjektdeltakerne har gjensidig respekt for hverandre betydde at prosjektdeltakerne ikke fryktet konsekvenser av identifisere problemer eller delta med sine meninger. En fra prosjektteamet sa: «Jeg vil si at deltakerne følte seg komfortable. Meninger ble delt veldig åpent, til og med upopulære. Prosjektgruppen kan lære mer av hendelser ved å utvide og berike sine evner til å forstå fordelene ved unike erfaringer». Viktige bidrag til en kultur uten beskyldninger var en meget tydelig uttrykt holdning fra både byggherren og entreprenøren om at alle skulle dele meningene sine uten å kritiseres, samtidig som det var helt tydelig for prosjektdeltakerne at denne holdningen ble fulgt opp i praksis.

I tillegg til at byggherren og entreprenøren etablerte en kultur uten beskyldninger i prosjektteamet, klarte de å skape en følelse av **gjensidig avhengighet** blant deltakerne. Deltakerne så at de var avhengig av de andres kunnskap og kompetanse for å komme frem til løsninger som var gode nok for ZEB-laboratoriet. De innså at de ikke klarte å komme frem til de beste løsningene for sitt fag uten å ta hensyn til de andre fagene, og ikke minst at de måtte ta hensyn til de andre deltakernes innspill. Deltakerne opplevde gjensidig avhengighet fordi de gjorde en bedre jobb i teamet enn de ville gjort om de sto alene.



Et virkemiddel for å få deltakerne til å bidra til prosjektteamet var argumentet om **CV-bygging**. Ved hjelp av en mer eller mindre uttalt historie om at deltakerne prosjekterte et bygg helt i front strakk de seg kanskje lenger enn de ellers ville gjort. Deltakelse i prosjekteringen av ZEB-laboratoriet ville tatt seg bra ut på de fleste CV. Sterke CVer er et fremtidig konkurransefortrinn for både organisasjonene og for deltakerne, så det er bra for teamet om deltakerne skjønner at de opparbeider seg konkurransefortrinn ved å samarbeide.

### *3.1.4 Utfordringer og suksessfaktorer – to-steps samspillskontrakt*

En utfordring var innenfor utviklingen av målpris. Byggherrens låste budsjett, en forsinket oppstart og endret plassering av bygget etter at entreprenøren hadde gitt første målpris førte til vanskelige forhandlinger om målpris på slutten av utviklingsfasen. Det var vanskelig for entreprenøren å være tydelig overfor byggherren om hvor store kuttene i omfang var, og samtidig var det lett for byggherren å overse eller ignorere kuttene. Det kunne ha gitt problemer i gjennomføringsfasen.

Det gikk med en del tid i forhandlingene om målpris før entreprenøren skjønte at byggherren heller ville kutte areal istedenfor å kutte tekniske løsninger. Kutt i tekniske løsninger brøt med ideen om at bygget skulle fungere som et fullskala laboratorium i driftsfasen, så av to onder valgte byggherren reduksjon av areal.

Det at entreprenøren byttet både prosjekteringsleder og prosjektleder i overgangen mellom utviklingsfasen og prosjekteringsfasen kunne ført til utfordringer for prosjektet. Det ble brudd i kontinuiteten, og entreprenørens nye ledere hadde ikke samme kjennskap til forutsetninger som var gjort og beslutninger som var tatt tidligere i prosjektet. Det kan være at de heller ikke følte det nødvendige eierskapet. Både byggherren og entreprenøren var nødt til å være pragmatiske i forhandlingene om målprisen. Kjennskap til utviklingsfasen i prosjektet kan være en fordel for samarbeidet i gjennomføringsfasen.

Tidlig involvering av entreprenøren i prosjektet var en suksessfaktor som sikret byggbarhet. Med så pass mange nye og delvis uprøvde løsninger var fordelaktig for prosjektdeltakerne i utviklingsfasen at entreprenøren deltok i prosjekteringen. Gjennom deltakelsen hindret entreprenøren at det ble prosjektert løsninger som var umulige eller vanskelige å bygge.

Den grundige gjennomgangen i utviklingsfasen bidro til å identifisere usikkerhetene i prosjektet tidlig. Dermed ble det mulig å komme opp med tiltak for å både redusere usikkerheten og eventuelle konsekvenser av den. I tillegg fikk partene mulighet til å diskutere hvem som skulle ha ansvar for hvilke usikkerheter i forhandlingene om målprisen. Generelt så klarte partene å bli enige om at entreprenøren skulle ta ansvaret for usikkerheten som kunne kontrolleres, mens byggherren tok ansvaret for usikkerheten som kom av forhold utenfor prosjektet.

Den grundige gjennomgangen i utviklingsfasen bidro også til at entreprenøren fikk forståelse for hva som var viktig for byggherren – om enn noe sent. Når entreprenøren startet med kutt for å redusere estimert målpris gikk kuttene på de tekniske løsningene. Disse løsningene var nødvendige for at bygget skulle fungere som et laboratorium, så byggherren brukte tid på å forklare at kuttene heller måtte komme i antall kvadratmeter. Gjennomgangen i utviklingsfasen sikret maksimal måloppnåelse innenfor byggherrens stramme budsjett uten at entreprenøren skulle ha mye ekstra betalt. Organiseringen med to-steps samspillskontrakt ga byggherren gode styringsmuligheter.

## 3.2 Prosjektering med egne fagekspert

Det var viktig for byggherren å bidra aktivt inn i prosjektet med sin teoretiske kunnskap. For å sikre at de valgte løsningene var byggbare og at kostnadene ble forutsigbare ville byggherren ha med seg entreprenøren i utviklingen av prosjektet.

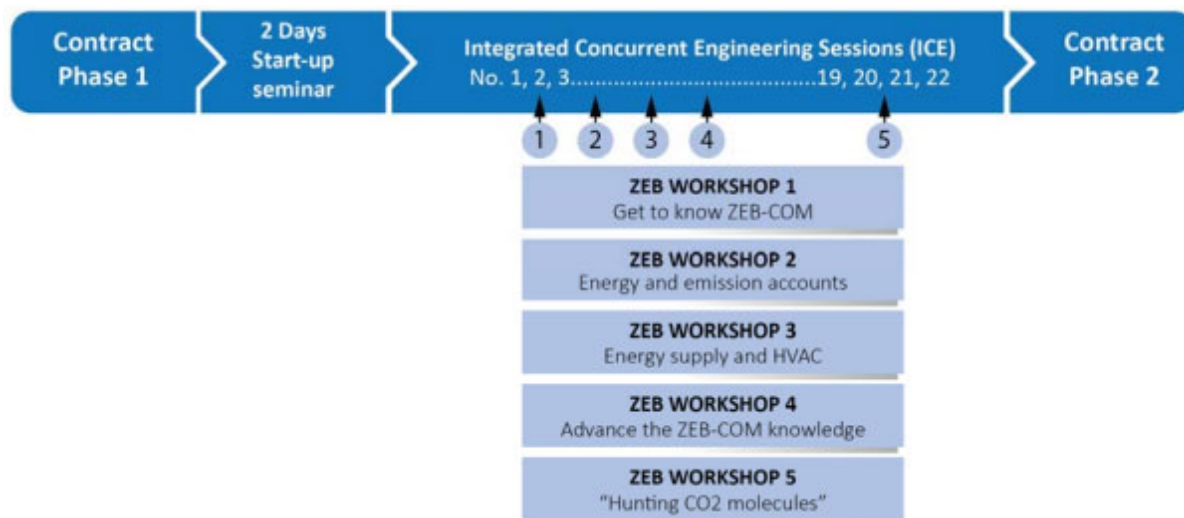
I steg en hadde byggherren og entreprenøren en samspillsorganisasjon med en Styringsgruppe, en Samspillsgruppe og en Prosjektgruppe, som illustrert i figur 3.1 fra Time et al. (2019). Prosjektet hadde ikke en tilsvarende samspillsorganisasjon for gjennomføringen.



Figur 3.2 Samspillsorganisasjonen for utviklingsfasen av ZEB-laboratoriet (sakset fra Time et al., 2019).

Entreprenørens regionleder og eiendomssjefen satt i Styringsgruppen. Byggherrens prosjektleder, hans prosjektlederassistent og to ansvarlige ledere fra entreprenøren satt i Samspillsgruppen. Prosjektteamet besto av byggherrens og entreprenørens deltakere. Entreprenøren hadde med seg underentreprenører, rådgivere og arkitekt. NTNU/SINTEF var byggherre. Veidekke var entreprenør. LINK Arkitektur, Aas-Jakobsen, Siemens, Multiconsult, Bravida and Vintervoll var arkitekt, rådgivere og underentreprenører.

Gjennomføringen av møtene i utviklingsfasen var viktig for samspillet. Byggherren og entreprenørens prosjektteam gjennomførte et todagers oppstartseminar, ICE-sesjoner med tilhørende særmøter og fem workshoper der byggherren formidlet teoretisk kunnskap om nullutslippsbygninger. Figuren under viser antall ICE-sesjoner og at workshopene kom imellom. Figuren er sakset fra Time et al. (2019).



Figur 3.3 Skisse over rekkefølgen på oppstartseminar, ICE-sesjonene (med tilhørende særmøter) og workshopene (sakset fra Time et al., 2019).

De følgende fem underkapitlene tar for seg organiseringen av prosjektet. Organiseringen er en viktig del av gjennomføringsmodellen. Først kommer tre kapitler om henholdsvis et todagers oppstartseminar, ICE-sesjonene og de tilhørende særmøtene. Deretter kommer et kort kapittel om de fem workshopene. Til slutt kommer det femte underkapitlet med en kort beskrivelse av utfordringer og suksessfaktorer for prosjektering med egne fagekspert.

### 3.2.1 Oppstartseminar

Det første byggherren og totalentreprenøren gjorde etter signering av kontrakten var å arrangere et todagers oppstartseminar. Byggherren presenterte sine mål med ZEB-laboratoriet, og prosjektdeltakerne diskuterte hvordan disse målene skulle nås. I løpet av oppstartseminaret fikk deltakerne opplæring i de kontraktuelle, organisatoriske og kulturelle virkemidlene. Deltakerne brukte de to dagene på å bli kjent med hverandre fordi det er vanskeligere å skuffe noen du kjenner godt enn noen du ikke kjenner i det hele tatt.

I tillegg til at oppstartseminaret skulle gjøre deltakerne kjent med hverandre ble det – mer eller mindre ubevisst – benyttet til å sjekke gruppesammensetningen. Byggherren og den entreprenørstyrte prosjekteringsgruppen måtte ha de nødvendige fullmaktene og den nødvendige kompetansen til å ta avgjørelsene i prosjektet. I løpet av oppstartseminaret ble det klart at prosjektgruppen hadde gjennomføringsevnen som var nødvendig for å fullføre utviklingsfasen.

Prosjektgruppen brukte oppstartseminaret til å utvikle og signere en formell partneringavtale. Denne avtalen ga prosjektgruppen retningslinjer for samarbeidet. Retningslinjene skulle blant annet slette noen av de organisatorisk definerte grensene mellom byggherren, totalentreprenøren, arkitekten, rådgiverne og underentreprenørene.

I tillegg til å bli kjent, sjekke gruppesammensetningen og signere partneringavtale ble oppstartseminaret brukt til å planlegge hvordan prosjektdeltakerne skulle opprettholde relasjonene underveis i prosjektet. Mange av de kontraktuelle, organisatoriske og kulturelle virkemidlene for samarbeid i utviklingsfasen var nye for prosjektdeltakerne. Planleggingen

resulterte i konkrete tiltak, som for eksempel at prosjektdeltakerne skulle ha felles lunsj i løpet av ICE-sesjonene.

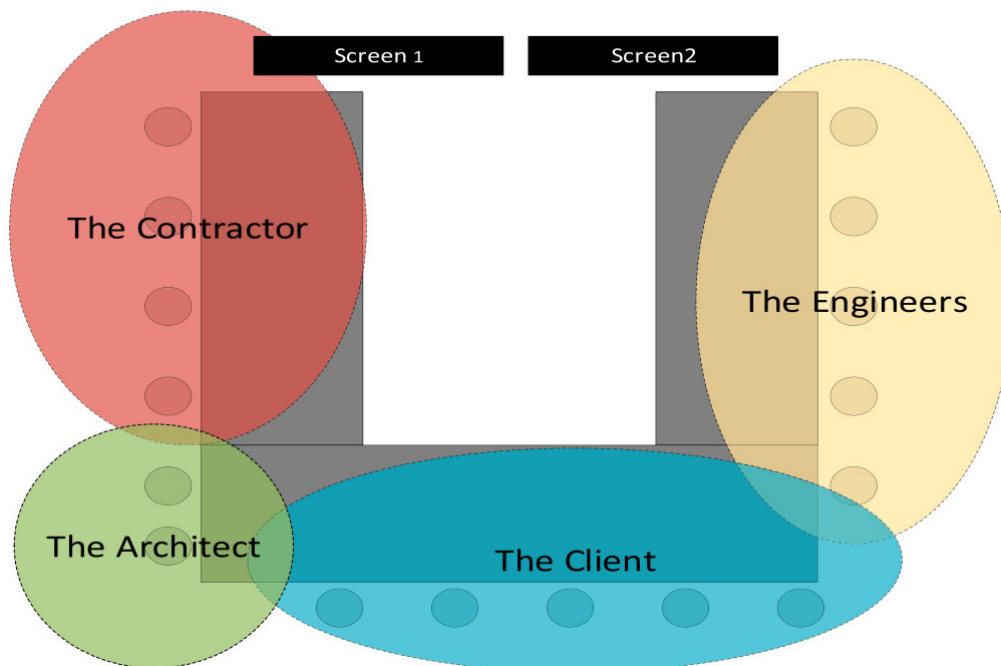
### 3.2.2 ICE-sesjonene

I utviklingsfasen hadde prosjektgruppen ukentlige Integrated Concurrent Engineering (ICE)-sesjoner som fulgte et standardisert oppsett. Hver sesjon startet klokken 08.30 i prosjektets Big Room med at totalentreprenørens prosjekteringsleder gikk gjennom agendaen før en "runde rundt bordet". Deretter ble oppgavene fra forrige uke fulgt opp og eventuelt sjekket ut før byggherren hadde sitt «kundeforventning». Så identifiserte prosjektgruppen hvilke problemstillinger de skulle jobbe med i den aktuelle sesjonen før de gikk i særmøter. Etter særmøtene kom prosjektdeltakerne tilbake til økten, og de delte seg i mindre grupper for å jobbe med disse problemstillingene. Etterhvert gikk de tilbake til fellessesjonen for å presentere hva de hadde kommet fram til og så beslutte hva de skulle jobbe med til neste gang. Prosjektdeltakerne spiste felles lunsj underveis, og ICE-sesjonene var ferdige rundt klokken 14.00. Deltakerne brukte mye tid i løpet av ICE-sesjonene på å måle de oppnådde resultatene mot prosjekteringsplanen. De fleste prosjektdeltakerne var aktive i plenumsdelen, men noen hadde tendenser til å ankomme sent samt sitte med mobiltelefon og datamaskin.

Utviklingsfasen hadde til sammen 22 ICE-sesjoner. Etter den 19. sesjonen fikk prosjektet en stopp som varte i et år på grunn av reguleringsplanarbeid som medførte at tomten ble flyttet. Etter det måtte alle prosjektdokumentene revideres. Bortsett fra at et par av totalentreprenørens deltakere ble erstattet etter at de måtte gå til et annet prosjekt etter den 19. sesjonen var det stort sett de samme deltakerne på alle sesjonene. En deltaker fra byggherren trådte ut underveis, og en rådgivende ingeniør ble byttet på grunn av omsorgspermisjon. Kontinuiteten ble betraktet som viktig for samarbeidet.

ICE-sesjoner la til rette for prosjektgruppen ved at de ble samlokalisert i et Big Room og deretter tvunget til å samhandle om mer eller mindre definerte oppgaver. Deltakerne forventet positiv oppførsel av hverandre og skulle legge liten vekt på organisatorisk tilhørighet. Samlokaliseringen skulle stimulere til deling av kunnskap og oppmuntre teambuilding. ICE-sesjonene ga en mindre hierarkisk måte å jobbe på ved at både byggherren og totalentreprenørens prosjektgruppe hadde deltakerne med kompetanse og fullmakter til å ta de fleste avgjørelsene på stedet.

Prosjektets Big Room var innredet med bord satt i en hesteko. Rommet var også innredet med to Smartboards som kunne brukes sammen eller uavhengig av hverandre. Det var reservert for ICE-sesjoner på tirsdager, men kunne reserveres av andre resten av uken. Figur 3.4 gir en oversikt over innredningen av rommet og ikke minst over hvordan prosjektdeltakerne pleide å sette seg i ICE-sesjonene.



Figur 3.4 Prosjektdeltakernes vante plassering ved bordet i ICE-sesjonene (sakset fra Engebø et al., 2020).

Utgangspunktet var at prosjektdeltakerne skulle plassere seg tilfeldig uten å ha faste plasser. Likevel indikerte observasjonene av ICE-sesjonene at deltakerne bevisst eller ubevisst satt i grupper. En typisk observasjon var at prosjekteringsleder (totalentreprenør) satt øverst til venstre. Ved siden av satt Prosjektlederen (totalentreprenør), deretter BIM-koordinator (totalentreprenør) og så prosjektutvikleren (totalentreprenør). På hjørnet nede til venstre satt arkitekten og eventuelt arkitektassistenten. Byggherrerepresentantene satt nederst, med prosjektlederen (byggherre) først, så bygningsfysikkeksperten (byggherre), laboratorieprosjekteringseksperten (byggherre), bærekraftseksperten (byggherre) og til slutt ventilasjonseksperten (byggherre) ytterst til høyre. Fra nederst til høyre og oppover satt henholdsvis Rådgivende Ingeniør VVS, Rådgivende Ingeniør Elektro, Rådgivende Ingeniør Automatisering og Integriert Teknisk Bygg (ITB)-koordinator. Trenden var tydelig selv om prosjektdeltakerne byttet plasser noen ganger.

Det var ingen av prosjektdeltakerne som kunne forklare hvorfor de satte seg i grupper utover spekulasjoner om det kunne være at de delte bakgrunn, utdanning, roller og fagspråk. Det var for eksempel ikke den samme gruppefordelingen når prosjektdeltakerne gikk i særmøtene. Siden fordelingen rundt bordet ikke så ut til å forstyrre samarbeidet – den ga heller prosjektdeltakerne en trygghet – ble det ikke gjort noe med den.

I detaljprosjekteringen som kom etter utviklingsfasen ble ICE-sesjonene erstattet av ukentlige prosjekteringsmøter. Både de rådgivende ingeniørene, nøkkelpersonell fra totalentreprenøren og representanter fra byggherren deltok der, men byggherren endret rolle. I detaljprosjekteringen nøyde byggherren seg med å sørge for at løsningene fra utviklingsfasen ble implementert og at nødvendige beslutninger ble tatt raskt for å unngå forsinkelser.

### 3.2.3 Særmøter

Særmøtene var en del av ICE-sesjonene. Det var som regel flere særmøter som gikk parallelt i ICE-sesjonene. Prosjektdeltakerne som ikke var med i noen av særmøtene kunne bruke tiden på andre oppgaver i for eksempel Big Room, men de måtte være tilgjengelige gjennom hele sesjonen.

Særmøtene tok for seg forskjellige tema som best kunne løses på tvers av fag og organisasjoner fra Big Room. I særmøtene deltok alle prosjektdeltakerne aktivt, også de som engasjerte seg mindre i plenumsdelen. De som viste tendenser til å ikke ha full oppmerksomhet i plenumsdelen var kanskje de som slet mest med å forene seg med fremgangsmåten i særmøtene.

### 3.2.4 Workshops

Prosjektorganisasjoner som skal bygge en ZEB-bygning, må gjøre valg som krever spesiell kompetanse. I utviklingsfasen organiserte prosjektet fem workshoper om definisjonen av nullutslippsbygninger (ZEB), energi- og utslippsregnskap, energiforsyning i bygninger, teknologi i ZEB og minimering av CO<sub>2</sub>-utslipp. Byggherren ønsket at prosjektdeltakerne skulle forstå hva målene for ZEB-laboratoriet betydde i praksis.

Workshopene økte prosjektgruppens samlede kunnskap om nullutslipp fra bygging, drift og materialer (ZEB-COM). Workshopene var populære, og flere av deltakerorganisasjonene sendte ansatte som ikke var deltok i byggingen av ZEB-laboratoriet for egen regning.

Prosjektkostnaden økte med workshopene, men de hadde positive effekter. For det første ga de en arena for teambuilding. For det andre bidro de til at totalentreprenørens prosjektgruppe forsto byggherrens ambisjoner. For det tredje bidro de til faglig utvikling hos de involverte. Samlet sett vurderte prosjektdeltakerne de positive effektene som mye større enn de negative.

### 3.2.5 Utfordringer og suksessfaktorer – prosjektering med egne fagekspertes

En utfordring prosjektet støtte på – som ikke nødvendigvis skyldes gjennomføringsmodellen – var at prosjektet ble satt på vent et år og at plasseringen av bygget ble flyttet som følge av en reguleringsplanendring. Utsettelsen på et år gjorde at deltakere fra hovedentreprenøren og noen av rådgiverne ble byttet ut. Endret plassering førte til mer prosjekteringsarbeid og økte kostnader. Gjennomføringsmodellen bidro kanskje til at disse utfordringene ble løst på en bedre måte enn de ville blitt med en annen gjennomføringsmodell.

Det var prosjektdeltakere med sterk fagkunnskap som hadde byggherreroller. For disse kunne det være fristende å engasjere seg som prosjekterende i tillegg. Det kunne ført til konflikter om de skulle prosjektert løsninger entreprenøren måtte ta ansvar for samtidig som de hadde en byggherrerolle der de kontrollerer entreprenørens leveranser.

Det var også en utfordring at ikke alle prosjektdeltakerne var vant til å jobbe i ICE-sesjoner med etterfølgende særmøter. De var vant til faste prosjekteringsmøter med en standard møteagenda, og ønsket å fortsette med slike møter istedenfor å jobbe parallelt i samme rom. For at prosjektering med egne fagekspertes skal fungere må alle prosjektdeltakerne være innstilt på det.

Prosjektering med byggherrens egne fagekspertes var en suksessfaktor som bidro til utstrakt bruk av nye teknologiske løsninger. Uten fagekspertes insistering på å ta i bruk nye teknologiske løsninger kunne det vært fristende å velge velkjente løsninger. Bruk av nye teknologiske løsninger

introduserer kanskje en uforutsigbarhet som entreprenøren vil unngå om mulig. Uforutsigbarheten kom av manglende erfaringer med løsningene. Fagekspertene fungerte som pådrivere samtidig som entreprenøren tydeliggjorde kostnadskonsekvensene av de teknologiske løsningene.

Prosjektorganisasjonen var tro mot organiseringen da prosjektet ble presset på tid og kostnad. Når prosjektdeltakere opplever press kan de ta beslutninger utenom de formelle beslutningslinjene og møttestrukturen. På ZEB-laboratoriet klarte prosjektorganisasjonen å holde seg til beslutningslinjene og møttestrukturen.

En annen suksessfaktor var at byggherren var tro mot de opprinnelige målene til tross for flytting av tomt og utsatt oppstart. ZEB-laboratoriet skulle bli et nullutslippsbygg som fungerte som et fullskala laboratorium. Byggherren kuttet heller i omfang enn i funksjon.

Prosjektdeltakerne fikk stadig vekk høre at prosjektet var organisert for å fremme samarbeid og at bygget skulle ha nye teknologiske løsninger. Både organiseringen og produktet var blant det mest spennende som var mulig å oppleve. Deltakerne utviklet kompetansen sin ved å være med i prosjektet. Ved å være med på ZEB-laboratoriet kvalifiserte totalentreprenøren, arkitekten, rådgiverne og underentreprenørene seg til å delta i de etterfølgende delprosjektene i campusutviklingen. Historien om at ZEB-laboratoriet var spennende organisert og det skulle ha spennende nye løsninger må ha motivert prosjektdeltakerne.

### Referanser – Byggeprosessen

Engebø, A., Torp, O. og Lædre, O. (2021). Development of Target Cost for a High-Performance Building. Proc. 29th Annual Conference of the IGLC. Lima, Peru, 14-16 Jul 2021. pp 3-12.

Engebø, A., Klakegg, O.J., Lohne, J., Lædre, O. (2020a). A collaborative project delivery method for design of a high-performance building. *International Journal of Managing Projects in Business* 13(6), 1141-1165.

Engebø, A., Klakegg, O.J., Lohne, J., Bohne, R.A., Fyhn, H., Lædre, O. (2020b). High-performance building projects: how to build trust in the team. *Architectural Engineering and Design Management*, 18(6), 774-790.

Time, B., Engebø, A., Christensen, M., Dalby, O., Kvande, T. (2019). The design process for achievement of an office living laboratory with a ZEB standard. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES). Volume 352, 012053.

Lædre, A.S. (2022). Entreprenørstyrt prosjektering – Erfaringer fra to samspillsprosjekter. Masteroppgave, Institutt for maskinteknikk og produksjon, NTNU, Trondheim.

## 4 Bygningsteknologi – optimalisering av valgte løsninger

Dette kapitlet beskriver noen av løsningene i ZEB-laboratoriet og erfaringene med dem. Det beskriver også hva NTNU Campusutvikling og NTNU Campusprosjektet kan lære av løsningene. De utvalgte løsningene er beskrevet som følger, i hvert sitt underkapittel:

- Referansetall for energibruk i bygninger
- Klimatilpassing av bygninger
- Voksboks/varmebatteri
- Solskjerming
- Ventilasjon
- Passiv kjøling
- Fuktsikring i byggeprosessen

### 4.1 Referansetall for energibruk i bygninger

#### *Hva er nytt*

Til energiberegninger brukes vanligvis sjablongdata basert på beregninger eller opplysninger fra produsenter. I ZEB-laboratoriet er det plassert energimålere på nesten alt teknisk utstyr, noe som gjør det mulig å overvåke energiforbruk i sanntid. Målingene kan brukes til å forbedre og korrigere nøyaktigheten til beregninger av forventet energiforbruk i andre byggeprosjekter.

#### *Hva er erfaringene*

Etter to års ordinær drift ser vi at noen poster på energibudsjettet langt overstiger det som på forhånd var forventet.

Sensorene har avdekket et større energiforbruk fra varmpumpeanlegg enn forutsatt til å sirkulere vann og til avriming om vinteren. Styringsalgoritmen som varmpumpene leveres med er dårlig tilpasset bygget og gir en del uheldig kjøring med stor slitasje på systemet. I kaldt vær stanser varmpumpen ofte og går inn i avrimingsmodus, noe som gir nedetid og fører til at byggets styringssystemer forsyner seg av mer energi fra fjernvarmenettet enn planlagt for å opprettholde energitilførselen. Det var forutsatt at varmpumpene skulle levere energi ved utetemperaturer ned til -25°C, men i praksis er det lite drift når temperaturen er -15°C eller lavere. Utedelene til varmpumpene er vist i figur 4.1.





Figur 4.1 Utedelen til varmepumpene.

Mengden energi brukt til sirkulasjonspumper for varmtvann har også vist seg å være mye høyere enn forutsett. Når kranene i springen åpnes skal det komme varmtvann fort, så varmtvann må ligge i rørene hele tiden. Der kjøles det gradvis av varmetap til omgivelsene. Vannet i rørene må dermed sirkuleres og ettervarmes ved jevne mellomrom. Siden varmepumpene ikke leverer høy nok temperatur, benyttes elektriske varmeelement som supplement. Det gjør at energiforbruket til varmtvann også er høyere enn forespeilet. Riktignok ligger overforbruket an til å nå 5-600 % av referanseverdien for 2023 til sammen, men det er ikke stort målt i kilowattimer.

Elektrisiteten som trekkes fra stikkontakter i bygget (plug-in-forbruk) er mye høyere enn antatt i prosjekteringen. Her er overforbruket så langt i 2023 over 20 000 kilowattimer i halvåret, eller mer enn fem kilowatt kontinuerlig effektforbruk i gjennomsnitt. I skrivende stund vites det ikke hva overforbruket skyldes, men det mistenkes at teknisk utstyr er feilregistrert på stikkontakt (f.eks. at varmtvannsberederen teller som plug-in-forbruk), og at energiforbruk i tekniske rom teller som plug-in-forbruk ved en feil. Denne teorien styrkes av at overforbruket har blitt lokalisert til etasjer hvor det omtrent ikke skal være plug-in-forbruk i det hele tatt. En masterstudent vil bli engasjert til å undersøke forbruket og energimålingene i detalj.

Bygget som helhet har litt overforbruk sammenlignet med prosjekterte tall, men ikke like dramatisk som for plug-in-forbruket. Energien som brukes av teknisk utstyr går til slutt tapt i varme, noe som gjør at behovet for oppvarming reduseres tilsvarende. Bygget ligger an til å bruke 20 000 kWt mindre til oppvarming enn antatt i 2023.

#### *Hva kan NTNU Campusutvikling lære*

Erfaringene i ZEB-laboratoriet tilsier at varmepumpene må følges opp mer nøye enn først antatt. Referansetallene for luft-til-vann-varmepumper er antagelig for optimistiske og bør særlig i kaldt vær tas med en klype salt. Varmepumpene i ZEB-laboratoriet har en forventet virkningsgrad (antall kWt varme ut per kWt elektrisitet inn) på 3,33, men har i skrivende stund bare oppnådd 2,26 som gjennomsnitt for 2023.

Teknisk utstyr og varmtvann ser også ut til å forbruke mer energi enn dagens referansetall tilsier.

## 4.2 Klimatilpasning av bygninger

### *Hva er nytt*

ZEB-laboratoriet er utformet med klimatilpasning i tankene, så det skal tåle å stå utendørs i hele sin levetid. Takrennen i solcelletaket er spesielt utformet for å kunne ta unna styrtregn av den størrelsen som kan forventes i løpet av 50 år. Hovedinngangen er plassert på den minst vindutsatte siden av bygningen for å gi god skjerming mot regninndrev. Taket er utført med smart dampsperre som gir konstruksjonen anledning til å tørke innover, en ny løsning som overvåkes med fukt- og temperatursensorer. Bak solcellene på tak og vegger er luftespalten ekstra bred, for å holde solcellepanelene avkjølt og transportere fukt ut av konstruksjonen. Her er det også mange sensorer, og det er mindre fuktsensitive materialer i luftespalten enn hva som er vanlig. Innfestingen av solcellene er utført med ekstra tanke på fuktsikkerhet. Det er valgt en fukt- og UV-beständig vindsperre for å gi lang levetid. Byggeprosessen var planlagt for å gi bygget minst mulig fuktpåkjenning i byggeperioden. Det gir et lavere fuktnivå i konstruksjonen og dermed lettere uttørking, samtidig som det er lavere risiko for muggdannelse i perioden bygget tørker. Et eget regnbed er etablert for å håndtere overvann i området. Belegningssteinen rundt bygget er spesialutviklet for å la overvann sive ned i fordrøyingslaget under. Figur 4.2 viser at belegningssteinen ser normal ut.



Figur 4.2 Selv om belegningssteinen er spesialutviklet for å la overvann sive ned i fordrøyingslaget under ser den helt normal ut.

### *Hva er erfaringene*

Vanligvis tar det lang tid før byggskader som følge av dårlig klimatilpasning blir synlige. Det er fremdeles litt for tidlig i byggets levetid til å dra noen endelige konklusjoner om effekten av tiltakene. Det har heller ikke vært «dimensjonerende uvær» i de to årene bygget har vært i drift.

Selve implementeringen av klimatilpasningstiltak i byggeprosjektet har gått bra. Løsningene overvåkes gjennom utstrakt bruk av sensorer, og så langt ser det fint ut.

#### *Hva kan NTNU Campusutvikling lære*

God tilpasning til det stedlige klimaet er viktig dersom nye bygninger skal tåle å stå utendørs gjennom hele sin levetid. Nye byggeprosjekter må inkludere tiltak som hjelper bygget å tåle de tøffeste forventede klimapåkjenningene, ikke bare i dag, men også i fremtiden. ZEB-laboratoriet er en utprøvningsarena for nye løsninger. Blant annet er overvannshåndteringssystemet koblet til en egen tank som for registrering av avrenning fra ulike fordrøyningsløsninger rundt bygget. Fordrøyningsløsningene kan også modifiseres for å prøve ut nye konsepter hvis ønskelig.

### 4.3 Voksboks/varmebatteri

#### *Hva er nytt*

Voksboksen er en tank som inneholder 3000 liter bio-voks laget av sertifisert palmeolje. Kort fortalt virker den som et varmebatteri, der vi kan lagre varme over kort tid. Sånn kan vi hente strøm fra nettet og drive varmepumpene når strømmen er billig, for eksempel midt på natta. Når strømprisene går til værs om morgenen fordi hele Trondheim skal varme opp husene sine, skrur vi ned varmepumpene og henter varme fra boksen i stedet.

Voksboksen kalles også en PCM-tank fordi den inneholder Phase Change Material, eller faseendringsmateriale. Faseendringsmaterialet vann kan brukes til å forklare hvordan dette virker. Du kan sette en kasserolle full av is på kokeplata og tilføre masse energi. Da smelter isen til vann, men smeltevannet vil ikke bli varmere enn 0°C før all isen har smeltet. Tilsvarende kan du sette kasserollen med vann i fryseren, så energi forlater systemet og vannet fryser til is. Men isen vil ikke bli kaldere enn 0 °C før alt vannet har frosset. Altså har vi et system der vi kan tilføre masse energi, og ta ut masse energi, uten at temperaturen endrer seg. I stedet endres bare forholdet mellom fast og flytende. Vann og is kan lagre veldig mye energi på den måten, men 0 °C er en veldig upraktisk temperatur å jobbe med. Voksen i boksen har et smeltepunkt på 37 °C i stedet. Det tar cirka 200 kWt å smelte all voksen – det tilsvarer en liten kokeplate (1200 W) som står på fullt i en uke. Dermed kan tilsvarende mengde energi hentes ut av boksen før den blir kaldere enn 37 °C igjen.

Merk at voksboksen ikke endrer hvor mye energi ZEB-laboratoriet bruker. Det kreves fortsatt like mye energi å holde bygningen varm. Men voksboksen gjør det mulig å regulere forbruket til tidspunkt det er billig å bruke energi. Den kan også gi varme samtidig som varmepumpene, slik at vi ikke trenger så kraftige varmepumper for å holde bygningen varm på kalde dager. På en kald dag kan bygningen trenge 24 kW for å holde på varmen. Hvis vi kan hente 10 kW fra voksboksen kan vi klare oss med 14 kW varmepumper. De er billigere i drift enn 24 kW varmepumper, og gjør at vi slipper å betale for ubrukt kapasitet de 364 andre dagene i året.

#### *Hva er erfaringene*

Voksboksen er fremdeles under utprøving, men den fungerer som den skal.

#### *Hva kan NTNU Campusutvikling lære*

Voksboksen er en prototype, men SINTEF har startet et spin-off firma for å videreutvikle PCM-tanker til kommersiell bruk.

## 4.4 Solskjerming

### *Hva er nytt*

Hovedformålet med solavskjerming er å redusere oppvarming og blending fra solstråling. Helst skal solstrålene avskjæres utenfor fasaden, så varmen ikke slipper inn i bygget. En gardin vil forhindre blending, men ikke oppvarming. Hovedutfordringen med utvendig solskjerming er systemet må ha mange bevegelige deler på utsiden av fasaden.

Egentlig er ganske lite nytt i solskjermingen i ZEB-laboratoriet. Det benyttes konvensjonell utvendig solavskjerming med «screens». Det nye og innovative er mulighetene som gis til å forbedre styringen av solskjermingen ut fra målte sensordata. Bygget har mange målere for inneklima, solstråling på alle flater, utetemperatur og vind. Forbedring av styringen pågår fremdeles, og det ser ut til å være mye å gå på i intelligent styring av solskjerming.

Skjermene går ikke ned når utetemperaturen er under 2 °C. Termometeret som måler utetemperaturen står utenfor bygget, ikke på fasaden. I kaldt vær er det fare for at skjermene blir fuktige før de ruller seg opp igjen, og da kan de fryse fast. Dermed fungerer ikke solskjermingen om vinteren, og man må bruke gardinene for å stoppe blending i stedet. Derimot har vi en hypotese om at det ikke er nødvendig å være så til de grader forsiktig. Når sola står på fasaden, blir den varmet opp til en høyere temperatur enn uteluften. Vi tester derfor nå ut styring av solavskjermingen etter andre temperaturgrenser enn standardinnstillingen.

### *Hva er erfaringene*

Undersøkelser blant brukerne av bygget viser at solavskjermingen er litt for «aggressiv» - den går ned når det er fint vær ute og brukerne gjerne vil se ut. Den kan også rulle seg opp når sola forsvinner bak en sky, og så rulle seg ned igjen rett etterpå. Bevegelse og motordur gjør det ganske forstyrrende når skjermene beveger på seg, og det er spesielt plagsomt hvis det skjer ofte og når det ellers er stille i bygget. Det jobbes med å forbedre styringsalgoritmen til å bli mer intelligent og mindre irriterende, ved å ta inn værmelding og sensordata. Vi vurderer styring ut fra sensor som måler solstråling (pyranometer) på den aktuelle fasaden og bruk av termometer på hver skjerm. Det pågår fremdeles en diskusjon om hvilken av de mange vindmålerne som skal brukes til styring.

### *Hva kan NTNU Campusutvikling lære*

En forbedret styringsalgoritme utviklet i ZEB-laboratoriet kan være til god nytte i andre bygg på campus. Værdata fra ZEB-laboratoriet er tilgjengelig for å brukes til styring i andre bygg, ettersom hele campus opplever omtrent det samme været til enhver tid. Algoritmen må muligens modifiseres til å ta hensyn til målt temperatur på fasadene til de forskjellige byggene, ettersom vindforhold og byggets farge kan påvirke temperaturen på fasaden.

## 4.5 Ventilasjon

### *Hva er nytt*

Alle som har spilt trombone eller valthorn vet at det å flytte luft i et rør krever en god del energi. Det er mye friksjon mot veggene i et rørsystem, særlig når luften beveger seg fort. I en bygning

brukes et ventilasjonssystem, hovedsakelig bestående av rør, til å transportere frisk luft inn til de forskjellige delene av bygget, og hente brukt luft ut.

I ZEB-laboratoriet har det vært en høy prioritet å redusere CO<sub>2</sub>-utslipp fra materialbruk. Produksjon av stål og betong genererer høyt CO<sub>2</sub>-utslipp, så det har vært ekstra viktig å redusere bruken av disse materialene. Samtidig er det, på grunn av friksjonen mot veggene, en dårlig idé å lage ventilasjonskanalene mindre og trangere. Friksjonen øker når ventilasjonskanalene blir mindre og trangere fordi luftens hastighet må øke. Merkelig nok er det mer CO<sub>2</sub>-vennlig å gå den andre veien: å bruke større kanaler. Store kanaler gjør at en tilstrekkelig mengde luft kan leveres selv om hastigheten er lav. En bred, langsom elv kan flytte mer vann enn en smal, rask fjellbekk. Lav hastighet betyr lite friksjon, slik at det kreves mindre energi for å flytte luften. Dermed trenger ikke viftene å jobbe så hardt, og da trekker viftene mindre strøm. Trikset for å oppnå lavt CO<sub>2</sub>-utslipp med store kanaler er å samtidig ha så få meter kanal som mulig.

ZEB-laboratoriet har et ventilasjonsaggregat stående i fjerde etasje. Frisk luft dyttes ned vertikale sjakter som har forgreninger ut i himlingen i andre og tredje etasje, og under gulvet i første etasje. I stedet for at kanaler leder til hver sin dyse rundt om i etasjene, fylles hulrom i himlingen og under gulvet med luft. Luften siver derfra videre ut i rommene ved bruk av et prinsipp som kalles fortrenningsventilasjon, der ny luft hele tiden skyver gammel luft ut uten at det foregår noe særlig blanding. I første og tredje etasje er det lokale åpninger til hulrommet der luften siver ut konsentrert på noen punkter, mens i andre etasje siver luften ut overalt gjennom himlingsplatene.

Avtrekksluft suges ikke opp i egne kanaler (bortsett fra på toalettene), den siver fritt opp langs taket og ut til trappesjaktene. Derfra fraktes den opp i fjerde etasje av skorsteinsprinsippet med at varm luft stiger. I fjerde etasje er luftinntaket på ventilasjonsaggregatet montert rett på veggen i toppen av trappene, der avtrekksluft suges inn gjennom en rist til varmegjenvinning før den kastes ut av bygget. Det gir også litt undertrykk som hjelper til med å trekke avtrekksluft opp trappene. Dermed har bygget nesten ingen avtrekkskanaler i det hele tatt. Prinsippet om langsom lufttransport fungerer også like bra i trappa som i de store ventilasjonskanalene.

### *Hva er erfaringene*

Ventilasjonen i bygget oppleves stort sett som bra. Målinger av luftkvalitet har ikke avdekket noen store problemer. Derimot kan møterommene, som er avstengt fra resten av rommene, oppleves å ha litt «tett luft» etter lange møter. Det skyldes delvis at vi ikke enda har fått optimalisert styringen av ventilasjonen i disse rommene.

### *Hva kan NTNU Campusutvikling lære*

Et ventilasjonsanlegg basert på fortrenningsventilasjon har vist seg å fungere bra i ZEB-laboratoriet. Anlegget forutsetter derimot en åpen romløsning uten mange små rom eller skillevegger. I lokaler hvor lydisolering er mer viktig (f.eks. i undervisningsbygg) kan løsningen være mindre egnet. Det gjør også at det ikke kan settes inn sikkerhetsdører mellom kontorareal og trappesjakter, men gitter burde i teorien fungere. Branndører kan utføres ved å bruke spjeld i veggene ved siden av, en løsning som også er brukt i branntrappen i ZEB-laboratoriet. Utdfordringen her kan være lydisolering, men det er i ZEB-laboratoriet løst ved å benytte en lydisolert innkassing til spjeldet.

## 4.6 Passiv kjøling

### *Hva er nytt*

ZEB-laboratoriet står i solskinnet og er kledd i svart, så det kan bli varmt inne på varme sommerdager. Da er det nødvendig med nedkjøling. Mange bygg løser dette med store kjølemaskiner, men disse krever mye energi. I ZEB-laboratoriet brukes ikke aktiv kjøling med kjølemaskin i daglig drift. Kjølemaskinen er installert for å være infrastruktur til forsøk der det er nødvendig å kjøle ned rommet, men brukes ikke i daglig drift. I stedet kan byggets vinduer åpnes etter behov for å skape gjennomtrekk. I Trondheim er det alltid kjølig nok ute til at gjennomtrekk gir en avkjølende effekt. Ved å åpne vinduer i forskjellige etasjer samtidig kan oppdrift utnyttes til å skape bevegelse i luften selv på vindstille dager. Algoritmen for å styre vinduene er fremdeles under utvikling. Det er også mulig å manuelt åpne og lukke enkelte vinduer i bygget for å øke kjøleeffekten, eventuelt å overstyre vinduene med app for å begrense den.

### *Hva er erfaringene*

Så langt har automatisk styrt vinduskjøling kun vært i aktiv bruk i løpet av noen varme sommerdager i 2023. Algoritmen for å styre vindusåpningen er fremdeles under utvikling. Erfaringene så langt er gode, men siden det sjelden er veldig varmt i Trondheim er det utfordrende å stressteste forskjellige løsninger eller sammenligne innstillinger. Det blir ikke så mange anledninger til å hente data i løpet av et år.

En løsning basert på åpne vinduer har sine konseptuelle begrensninger. Det er en løsning som slipper inn støy ganske fritt, noe som kan være irriterende på dager der driftsavdelingen holder på utenfor med gress- eller kantklipper, eller det er mye trafikk med lastebiler. På samme måte slipper eventuell forurensning lett inn i bygget, inkludert pollen. Likevel fungerer løsningen godt i ZEB-laboratoriet, fordi det ligger i et stille område.

På dager det er varmt og lummert ute, blir det også lummert i bygget når vinduene er åpne. Det er en sjelden værtype i Trondheim, men man skal ikke så veldig langt sørover før det blir adskillig vanligere. Når det er svært varmt ute og vindstille er det også liten kjøleeffekt å hente ved å åpne vinduene.

Ved ett tilfelle har systemet måttet hente seg inn fra driftsavbrudd på en varm sommerdag. I forbindelse med en test av brannslukningsanlegget fredag 19. juni 2023 gikk styringsalgoritmen inn i en modus der alle vinduene lukkes. Denne modusen ble ikke opphevet slik den skulle. Det må gjøres manuelt. Den påfølgende helgen og mandagen var det veldig varmt og bygget sto uten kjøling helt til mandag formiddag. Det ble svært varmt i fjerde etasje, og aller verst i inverterrommet til solcellene, som ble beskrevet som «en badstue» av personell som gikk inspeksjonsrunde. Det er en situasjon som helst bør unngås i fremtiden. Da anlegget ble satt i gang igjen på mandag tok det omtrent et døgn før bygningsmassen hadde kjølt seg ned igjen til behagelige temperaturer.

### *Hva kan NTNU Campusutvikling lære*

Avkjøling basert på vinduer kan ha god effekt, men god styring er viktig. Erfaringer fra ZEB-laboratoriet vil kunne brukes til å utforme gode systemer til bruk i flere bygninger på campus. Systemet med passiv kjøling baserer seg på en åpen romløsning.

## 4.7 Fuktsikring i byggeprosessen

### *Hva er nytt*

ZEB-laboratoriet er bygget i limtre og massivtre. Det er materialer som er sensitive for fukt. Ikke bare kan det gro mugg og råte i vått trevirke, men trevirke som tørker kan krympe og vri seg. For å unngå å fukte opp konstruksjonen for mye i byggeperioden er det vanlig å benytte et beskyttende telt rundt bygget når det skal bygges.

Derimot er det en del ulemper med slike telt. Først og fremst i form av kostnader, men det er også en del CO<sub>2</sub>-utslipp forbundet med å lage og sette opp teltet, som må «skreddersys» til den enkelte bygning. ZEB-laboratoriet har en høy og spiss fasong som gjorde telt mindre egnet, altså enda dyrere. Derfor ble det bestemt å benytte en annen fuktsikringsstrategi for ZEB-laboratoriet.

Det var to hovedideer bak strategien: 1) Å begrense oppfukting av materialene under byggeprosessen, og 2) å legge til rette for at trevirket kunne tørke før det ble bygget inn av andre materialer. Tørkingen ble overvåket med fastmonterte og håndholdte fuktsensorer.

Monteringen av bæresystemet i bygningen ble berammet til juli og august, da været vanligvis er på det tørreste i Trondheim. Det ble holdt et høyt tempo for å få taket på plass før fuktseasonen begynte. Dette var delvis vellykket – været holdt seg tørt helt til uken før taket ble lagt.

Bæresystemet i ZEB-laboratoriet benytter massivtre – krysslaminert tre (KLT) – i minst mulig grad, fordi en massivtrekonstruksjon tørker langsommere enn et skjelett av limtre. Massivtre ble benyttet i etasjeskiller, heissjakt, trappesjakt, og skivevegger (vegger med horisontal avstivende funksjon) midt i bygget. Det er bare to steder det er benyttet massivtre i ytterveggen: den ene veggen i heissjakten og den ene veggen i branntrappen. Selve klimaskallet (ytterveggen) er bygget som en påhengsfasade på utsiden av bæresystemet, slik at hele bæresystemet befinner seg på innsiden av dampsperran. Der massivtre er benyttet i ytterveggen er det ikke dampsperre, den avsluttes med teipede skjøter for å sikre tetthet. Gulvene i bygget er utført i trematerialer og bruker ikke avrettingsmasse, noe som også reduserer fukttilskuddet betraktelig.

Materialer som ikke var en del av bæresystemet, ble beskyttet for å unngå at de ble fuktige i byggeprosessen. Det ble ikke levert slike materialer til byggeplassen før råbygget sto ferdig, for å sikre at det fantes et sted under tak å lagre dem. Første etasje ble brukt som lager for bygningsmaterialer. Der var det både regnsikkert, og materialene lå på byggets betongsåle i stedet for på gulvelementene i massivtre (noe som ville ha hemmet uttørkingen). Hver morgen begynte arbeidsdagen på byggeplassen med å svabre regnvann vekk fra konstruksjonen.

Å gi materialene tid til å tørke var den andre komponenten i strategien. Trefukt ble målt på flere tidspunkt i prosessen for å holde oversikt over hvordan materialene tørket, og de ble bare bygget inn dersom de hadde nådd et fuktnivå lavere enn 15 vekt-%. Man ventet i det lengste med å montere gulvbelegg, for å gi etasjeskillene mest mulig tid til å tørke.

På grunn av fukt i byggeperioden ble det litt fremvekst av mugg på enkelte overflater. Dette var forventet på forhånd. Før ferdigstilling av bygget ble overflatene pusset og overflatebehandlet. Muggen ble dermed fjernet, og det var ikke for mer mugg å vokse frem nå som trevirket var blitt tørt.

### *Hva er erfaringene*

Målingene viste at fuktnivået i massivtreelementene sank raskt etter montering, og at uttørkingen fortsatte til et stabilt nivå ble nådd omtrent et halvt års tid etter at bygget ble lukket. Lufttetthetsmålinger ved overtakelse og etter ett år viste at krymping i treverket som følge av tørking ikke hadde ført til nevneverdige sprekker i bygningskroppen. Målinger av luftkvalitet har ikke påvist noen økning av organiske substanser i inneluften, som ville ha vært et tegn på muggvekst.

Noe krymping har derimot forekommet mellom bæresystemet og innervegger, og ført til at skjøter måtte males om og noe listverk justeres. Dette var forventet på forhånd, og en runde med slike reparasjoner var på forhånd planlagt å finne sted et år etter ferdigstillelse.

Noen overflater i trekonstruksjonen lot seg ikke overflatebehandle etter at bygget ble lukket. Blant annet gjelder det skråstag som står inntil vinduer i første og tredje etasje. Her er det fortsatt litt sverte synlig fra utsiden, men muggsoppen er for lengst død ettersom treverket har tørket ut.

### *Hva kan NTNU Campusutvikling lære*

Det er mulig å oppnå tilfredsstillende fuktsikkerhet i byggeprosjekter med massivtre og limtre, selv uten bruk av telt. Det krever derimot tett oppfølging, et strengt måleregime og mye kompetanse på byggherrens side.



## 5 Bruken – sett fra brukernes ståsted

Dette kapittelet er basert på deler av masteroppgaven til Sara Hajizadeh levert til Institutt for bygg- og miljøteknikk våren 2023. Hun så på hvordan arbeidet i tidligfasen påvirker bruksverdi. Tittelen var «From Ambition to Occupancy – Identifying Early Phase Activities Contributing to Use Value in Occupancy Phase of Building Projects: Case Studies of Energy Academy Europe, Groningen, and ZEB Laboratory, Trondheim». I forbindelse med oppgaven undersøkte hun hvor fornøyde brukerne av ZEB-laboratoriet var to år etter at bygget ble tatt i bruk. Hun vurderte mange punkter, men for oversiktens skyld går dette kapittelet stort sett bare gjennom punktene som er spesielle for nullutslippsbygninger. Dermed handler de tre underkapitlene om henholdsvis fysisk miljø, tekniske system og fasiliteter.

I tillegg til at ZEB-laboratoriet er et nullutslippsbygg er det et fullskala laboratorium med uttesting av tekniske løsninger. Uttestingen skjer mens bygget er i bruk. Alle brukerne deltar passivt og mer enn halvparten deltar aktivt i uttestingen. De følte seg komfortable med overvåkingen som kom av uttestingen, og regnet med at de innsamlede dataene fra bruken tok tilstrekkelig hensyn til Lov om behandling av personopplysninger (personopplysningsloven). Videre så de positivt på at driftsorganisasjonen responderte kjapt om det var noe som ikke fungerte. Brukerne opplevde at de lærte av å se hvordan teknologien i ZEB-laboratoriet fungerte i praksis. Bygningen hadde inspirert dem til å tenke mer på bærekraft både i jobbsammenheng og i privat sammenheng. De som svarte på spørreundersøkelsen opplevde det som positivt å jobbe i et fullskala laboratorium, men i dette kapitlet har brukernes opplevelse av å jobbe i et nullutslippsbygg fått mer oppmerksomhet enn brukernes opplevelse av å jobbe i et fullskala laboratorium.

Tilfredse brukere er selvsagt alltid bra, men det er enda viktigere i nullutslippsbygninger enn i andre bygninger. Nye tekniske løsninger som påvirker brukernes opplevelse av det fysiske miljøet – som det er i ZEB-laboratoriet – krever at brukerne er med. Energieffektive løsninger fungerer bedre om brukerne er positive enn om de er negative. For at ZEB-laboratoriet skal fungere bra må brukerne samhandle, for eksempel ved å akseptere høyere innetemperatur på sommerdager enn på vinterdager.

### 5.1 Fysisk miljø

Fysisk miljø i en bygning kan handle om mye. I undersøkelsen av brukertilfredshet i ZEB-laboratoriet var det henholdsvis *belysning, akustikk, innetemperatur og luftkvalitet* som fikk mest oppmerksomhet.

#### 5.1.1 Hvordan opplever brukerne det fysiske miljøet i ZEB-laboratoriet?

Et energieffektiviserings tiltak i ZEB-laboratoriet var å bruke naturlig *belysning* før kunstig lys når det det var mulig. Kunstig lys krever energi uansett for effektive lyspærene er, og på dager med behov for å kjøle ned bygget vil kunstig lys øke nedkjølingsbehovet. I tillegg til å være energieffektivt er naturlig lys bra for trivselen til brukerne. Satsingen på rikelig tilgang på naturlig lys i ZEB-laboratoriet var positivt for brukertilfredsstillelsen.

*Akustikk* er viktig for arbeidsmiljøet. I planleggingen og prosjekteringen hadde byggherren solid tilgang på bygningsakustikere som taklet bruken av bærekraftige materialer og løsninger. Brukerne opplevde ikke støy på grunn av materialvalgene eller utformingen av bygningsløsningene, men de

kunne oppleve det på grunn av at de satt i åpne kontorlandskap. Noen av brukerne var innom at de ble forstyrret av omvisninger og innimellom større samlinger i bygget, men det kom heller av at de satt i et fullskala laboratorium enn av at de satt i et nullutslippsbygg.

Stort sett var brukerne tilfredse med *innetemperaturen*, men de fant seg i at temperaturen varierte noe med årstidene. Flertallet av respondentene vurderte innetemperaturen som komfortabel nok både i sommer- og vintersesongen. Noen enkeltpersoner rapporterte at de kunne føle seg varme eller kalde, slik at de kunne tenkt seg lavere innetemperatur om sommeren og høyere om vinteren. Brukerne ville ikke slå fast om de opplevde at forskjellene i innetemperatur på sommers- og vintertid skyldtes at styringssystemene ikke var godt nok justert eller om det skyldtes et bevisst valg fra driftsorganisasjonen for å spare energi.

Innendørs *luftkvalitet* fikk positive tilbakemeldinger fra flertallet av respondentene. Innendørs luftkvalitet er bra for produktiviteten til de som jobber i bygget. Walkthrough – der brukere fra hver etasje fikk spørsmål om tilfredsheten med bygget – avslørte at ved langvarig bruk kunne luften kunne bli tung i noen av møterommene som var uten vindu. Luftkvaliteten ble oppfattet som bra nok i kontorlandskapene.

### 5.1.2 Hva er erfaringene med det fysiske miljøet i ZEB-laboratoriet?

Selv om ZEB-laboratoriet har mange nye løsninger som påvirker det fysiske miljøet virket brukerne tilfredse med belysningen, akustikken, innetemperaturen og luftkvaliteten. Spørreundersøkelsen og walkthrough resulterte i det samme inntrykket. Det er fullt mulig å bygge et ZEB-COM med bra fysisk miljø for brukerne.

Noen av brukerne opplevde at ventilasjonen i noen av møterommene ikke var tilstrekkelig ved sammenhengende, langvarig bruk. Det kan skje i andre bygninger også. Ventilasjon i møterom er noe som det eventuelt går an å gjøre noe med, i hvert fall om det skjer i tidlig planlegging av bygget.

## 5.2 Tekniske system

ZEB-laboratoriet er fullpakket av tekniske systemer. De systemene som fikk mest oppmerksomhet i undersøkelsen av brukertilfredshet var styring av *solskjerming*, *bevegelsessensorer* for styring av lys og *ZEB-laboratoriets* app.

### 5.2.1 Hvordan opplever brukerne de tekniske systemene i ZEB-laboratoriet?

Brukerne var fornøyd med *solskjermingen* og mulighetene for å styre den manuelt. Likevel ble det nevnt at den automatiske solskjermingen reagerte for fort, slik at skjermene gikk ned før sollyset ble plagsomt og opp før det sterke sollyset var borte. Det gjorde at den automatiske reguleringen til tider førte til forstyrrende bevegelser i solskjermingen. I tillegg førte det til hyppige manuelle overstyringer.

Den kunstige belysningen er styrt av *bevegelsessensorer*. Hvis det ikke er bevegelse i rommene blir lyset slått av. Bevegelsessensorene fungerte godt, men brukerne opplevde at lyset kunne bli slått av mens de jobbet. Brukerne selv mente at enkle tiltak kunne gi store forbedringer for brukerne. De foreslåtte tiltakene var å redusere følsomheten til bevegelsessensorene, forenkle mulighetene for manuell overstyring og introdusere flere muligheter til å styre lyset ZEB-laboratoriet sin app.

*ZEB-laboratoriets app* er tilgjengelig som Zeb-APP. De som har tilgang kan ved hjelp av appen legge inn egne preferanser for lys, temperatur og solskjerming for hvert enkelt rom i ZEB-laboratoriet. I tillegg til å styre de tekniske systemene kan appen blant annet brukes til å sende inn avviksmeldinger til driftspersonell og reservere møterom. Brukerne syntes at funksjonene i appen var nyttige. Den eneste innvendingen brukerne hadde mot appen var at den ikke hadde en egen funksjon for å rapportere problemer med selve appen som kunne gå til app-utvikleren. Det var ikke alltid brukerne fikk appen til å virke optimalt.

### **5.2.2 Hva er erfaringene med de tekniske systemene i ZEB-laboratoriet?**

Brukerne var gjennomgående fornøyd med de tekniske systemene i ZEB-laboratoriet, og for systemene som ikke fungerte optimalt foreslo brukerne enkle tiltak. Kort sagt hadde brukerne positive erfaringer med de tekniske systemene.

I tillegg til de positive erfaringene med de tekniske systemene, avdekket spørreundersøkelsen og walkthrough andre positive erfaringer også. Brukerne var tydelige på at de oppfattet ZEB laboratoriet som et bærekraftig bygg samlet sett, og at det bør inspirere andre byggherrer som vil sette opp bærekraftige bygg. Helheten gjør det til mer enn et prosjekt som prøver å fremstå som bærekraftig uten å være det i praksis. Den fornybare energien, energieffektiviteten og materialbruken gjorde at ZEB-laboratoriet ble oppfattet som bærekraftig.

På grunn av at brukerne oppfattet ZEB-laboratoriet som faktisk bærekraftig var de stolte over å ha arbeidsplassen sin der. Mange av brukerne har bygningsteknologi som sitt fagfelt, så slik sett var de kvalifiserte til å karakterisere ZEB-laboratoriet som bærekraftig. Samtidig må markedsføringsinnsatsen og kommunikasjonen om bygningens bærekraft ha vært effektiv. Denne positive oppfatningen av bygningens bærekraft må ha bidratt til den generelle tilfredsheten til brukerne.

En erfaring som noen av brukerne rapporterte om var at det å ha arbeidsplassen i ZEB-laboratoriet hadde ført til endringer både på jobb og privat. All oppmerksomheten rundt bærekraft i bygningen førte til at de begynte å tenke bærekraft i andre sammenhenger. De hadde redusert antall flyreiser og blitt mer bevisst på energibruk privat. Endringen i livstil virket å være større hos de brukerne som ikke var opptatt av bærekraft før innflyttingen enn hos de brukerne som hadde vært opptatt av bærekraft i forkant. ZEB-laboratoriet førte til positive virkninger utover aktiviteten i bygget.

## **5.3 Fasilitetene**

I tillegg til det fysiske miljøet og tekniske systemer så undersøkelsen på brukernes tilfredshet med fasilitetene i bygget. Viktige fasiliteter i ZEB-laboratoriet er *arbeidsplassene, stilleboksene, møterommene og fellesarealene* (kjøkken, venteområder, heis etc.).

### **5.3.1 Hvordan opplever brukerne fasilitetene i ZEB-laboratoriet?**

Spørreundersøkelsen avdekket ulike preferanser blant brukerne av ZEB-laboratoriet når det gjaldt *arbeidsplasser* i form av åpent kontorlandskap eller cellekontor. Omtrent 60 % av de som svarte på spørreundersøkelsen foretrakk åpent landskap. De resterende 40 % hadde en preferanse for cellekontor.

Brukerne med preferanse for cellekontor at det ga muligheten til konsentrasjon og et visst privatliv. Det åpne kontorlandskapet førte til forstyrrelser i arbeidet i form av støy og bevegelser. De mente at innføring av stilleområder i kontorlandskapet kunne være et enkelt tiltak som ga mer ro til konsentrasjon og større følelse av privatliv.

De som foretrakk åpne kontorlandskap trakk frem at det ga en følelse av felleskap og la til rette for samhandling. De satt i åpent kontorlandskap med personer fra andre fag og fra andre organisasjoner. Selv om de kom fra andre fagfelt og andre organisasjoner hadde de som fellestrekk at de jobbet med problemstillinger som var relevante for ZEB-COM. Det åpnet for en positiv samhandling som ellers ikke ville funnet sted.

Hvis energieffektivitet er eneste kriterium kan åpent kontorlandskap være bedre enn cellekontor. Noen av brukerne mente at støy og mulighet for privatliv burde være med som kriterier. De foreslo derfor en blanding av åpne kontorlandskap og cellekontor for å gi brukerne flere alternativer. En slik blanding imøtekommer ulike arbeidsstiler og oppgaver, og kan gjøre det mulig for den enkelte brukeren å velge kontorplass etter behovet der og da. Det bør forbedre brukernes tilfredshet og produktivitet.

Det er utplassert *stillebokser* rundt om i ZEB-laboratoriet for å ha mulighet til å gjennomføre møter og snakke i telefonen uten å forstyrre de andre brukerne. Brukerne var generelt fornøyd med luftkvaliteten og muligheten til å arbeide uforstyrret i boksene. Noen av brukerne mente stilleboksene kunne hatt bedre lydisolering, for det kunne være mulig å overhøre hva som ble sagt inni for de som satt i området utenfor. For arbeidsopphold utover kortere telefonsamtaler var det ønskelig med mulighet for å koble bærbare datamaskiner til større skjermer. Disse brukerne ønsket seg også større skrivebord, mer komfortable stoler og bedre belysning.

Flere av brukerne skrøt av *møterommene* fordi de var velegnet til møter som handlet om bærekraft. Monitorene i inngangspartiet med sanntidstall for energieffektiviteten, materialbruken og innredningen i bygget ga møtedeltakerne opplevelse av å besøke spesialister i bærekraft. Møterommene økte mulighetene for å selge inn ideer og prosjekter som handlet om bærekraft.

I perioder ble reserverte møterom bli stående ubrukt selv om det var bruk for dem. Alle brukerne kunne reservere møterommene i ZEB-laboratoriets Zeb-APP, men det fantes ikke noen funksjon for å sikre at rommet faktisk ble brukt. En av brukerne foreslo at Zeb-APP kunne sende automatiske påminnere til de som hadde reservert rom og/eller legge til en innsjekkingsfunksjon. Hvis den som hadde reservert rommet ikke sjekket inn, kunne reservasjonen bli kansellert. Det var enkle grep som kunne økt kapasiteten av møterom.

Ved noen anledninger hadde spiserommet i første etasje blitt benyttet til større arrangement. Når dørene fra vrimlearealet i bunn av trappen til spiserommet sto åpne, gikk lyden oppover i etasjene. Noen av brukerne hadde blitt forstyrret av slike arrangement, men antakeligvis er det umulig å unngå alle former for forstyrrelser.

*Fellesarealene* i ZEB-laboratoriet ble vurdert som verdifulle, og brukerne hadde ikke konkrete forslag til hva mer som de eventuelt skulle hatt. De syntes det var greit med et tekjokken i fjerde etasje i tillegg til det i spiserommet i første etasje. Fellesarealene var store nok til vrimling og eventuelle pauser. Heisen var greit plassert med god adkomst, men brukerne foretrakk normalt å

bruke hovedtrappen foran heisen. Grunner til at trappen ble foretrukket var at den var vesentlig mer synlig enn heisen når man kom inn inngangsdøren, trappeløpet var fint og lyst samt at det var mer bærekraftig på alle vis å gå trappen istedenfor å stå i heisen.

### *5.3.2 Hva er erfaringene med det fasilitetene i ZEB-laboratoriet?*

Da de fikk spørsmål om det var bedre å jobbe i ZEB-laboratoriet enn i andre bygg de hadde jobbet i, svarte den ene halvparten at det var bedre og den andre at det var like bra. Ingen av brukerne svarte at det var verre å jobbe i ZEB-laboratoriet. Flertallet av brukerne ville anbefalt andre som søker en bærekraftig arbeidsplass en nullutslippsbygning som ZEB-laboratoriet. Årsakene til anbefalingen de oppga var miljøfordelen, helsefordelen, energieffektiviteten, innnetemperaturen og inspirasjonen til å leve mer bærekraftig.

Brukerne opplevde at fasilitetene i ZEB-laboratoriet la til rette for samhandling på tvers av fag og organisasjoner. De som svarte på spørreundersøkelsen nevnte mange forhold som bidro til samhandlingen:

- Blandingen av doktorgradsstipendiater, forskere og fast vitenskapelig ansatte på ulike steg i karrieren opplevdes som positiv, og læringen gikk flere veier.
- Blandingen av ansatte fra både NTNU og SINTEF – personer med forskjellig kompetanse på nullutslippsbygninger – gjorde at de kunne komplettere hverandre.
- Tilgjengeligheten av møtepunkter og felles oppholdsarealer bidro til en følelse av fellesskap. Arealene ga muligheter for uformell samhandling.
- Sammenkoblede kontorplasser, felles spiserom og delte møterom gjorde det uunngåelig å bli kjent med de andre brukerne.
- NTNUs og SINTEFs felles eierskap til bygget gjorde det naturlig å samarbeide om uttesting av løsningene i bygget og deretter om deling av de innsamlede data.
- Arrangement og fellesaktiviteter for brukerne i spiserommet gjorde at brukerne ble kjent i forskjellige settinger, og det senket terskelen for å samhandle.

Sett utenfra kan det at alle brukerne jobbet med problemstillinger som var relevante for nullutslippsbygninger, og at de jobbet i et fullskala laboratorium også ha lagt til rette for samhandling.

## 6 Oppsummering

Denne rapporten er skrevet for å formidle erfaringene fra byggingen av ZEB-laboratoriet på Gløshaugen til NTNU Campusutvikling og ikke minst NTNU Campussamling. Rapporten er kortfattet og gir oversikt over et større bakgrunnsmateriale. Forfatterne vil gjerne formidle erfaringene fra byggingen av ZEB-laboratoriet og er tilgjengelige for videre utgreiing om det er ønskelig.

Erfaringene fra ZEB-laboratoriet er preget av at det er nullutslippsbygg med høye ambisjoner for bærekraft som kombinerer mange nye løsninger. Byggherrene – NTNU og SINTEF Community – hadde til tross for de høye ambisjonene en stram kostnadsramme.

For å nå ambisjonene samlet prosjektorganisasjonen spesialister med ulik faglig bakgrunn i både utviklingsfasen og prosjekteringsfasen. Entreprenøren kom med tidlig i prosjektet for å sikre at spesialistene kom med løsninger som var praktisk og økonomisk gjennomførbare.

Byggekostnadene ble holdt innenfor kostnadsrammen ved hjelp av verdistyrt prosjektering og tett prosjekteieroppfølging i byggeprosessen. ZEB-laboratoriet har utmerket seg ved å teste innovative bygningsteknologiske løsninger. Nå har det vært en miljøvennlig arbeidsplass med fleksible løsninger for kontorplasser og undervisning i et par år.

Det er et underliggende poeng i rapporten at byggherren har organisert byggeprosessen på et nyskapende vis og valgt innovative løsninger for å få et bygg som tilfredsstiller kravene til ZEB-COM innenfor kostnadsrammen. Det hadde vært vanskelig med en standard byggeprosess og standard løsninger. Med så mange nye tekniske løsninger i et bygg som skal optimaliseres kan det også være vanskelig å bare ha fornøyde brukere. Derfor henger problemstillingene om byggeprosess, bygningsteknologi og brukertilfredshet sammen.

Rapporten sammenstiller erfaringene fra byggeprosessen, bygningsteknologien og bruken av ZEB-laboratoriet for NTNU Campusutvikling.

For å formidle erfaringene fra byggingen av ZEB-laboratoriet er følgende problemstillinger besvart:

1. Hva var nytt med byggeprosessen og bygningsteknologien på ZEB-laboratoriet?
2. Hva er de samlede erfaringene med byggeprosessen og bygningsteknologien på ZEB-laboratoriet 2 år etter overtakelsen?
3. Hva kan NTNU Campusutvikling lære av byggeprosessen og bygningsteknologien på ZEB-laboratoriet?

Problemstillingene er besvart for henholdsvis byggeprosessen, bygningsteknologien og brukertilfredsheten.

### 6.1 Byggeprosessen

*Hva var nytt:*

For å sikre null utslipp i byggets levetid – fra vugge til grav – har prosjektorganisasjonen valgt mange nye løsninger. For å komme frem til disse nye løsningene har gjennomføringsmodellen hatt

en kombinasjon av kontraktuelle, organisatoriske og kulturelle virkemidler som hittil ikke har vært så vanlig i byggeprosjekter. Gjennomføringsmodellen hadde flere virkemidler for å få deltakerne til å samarbeide enn bare de i kontrakten.

For å øke mulighetene til å ta i bruk de nye løsningene ble planleggingen og prosjekteringen av prosjektet gjennomført med Integrated Concurrent Engineering (ICE)-sesjoner og påfølgende særmøter. Kontrakten tok utgangspunkt i en målpris bestemt ut fra hvor mye penger byggherren hadde tilgjengelig. Byggherren og entreprenøren var enige om å dele over- eller underskridelser av målprisen.

#### *Hva er erfaringene:*

En byggherre kan ha en fremtredende eller tilbaketrukket rolle i et byggeprosjekt. Sammen med totalentreprenøren og dennes rådgivere var byggherren veldig involvert i planleggingen og prosjekteringen av ZEB-laboratoriet. Byggherren var representert ved forskere med teoretisk kunnskap om løsninger for nullutslippsbygg mens totalentreprenøren og rådgiverne ble tidlig involvert med sin praktiske kunnskap om gjennomførbare løsninger innenfor kostnadsrammen. Den tidlige involveringen gjorde at totalentreprenøren ble godt kjent med usikkerheten i prosjektet og byggherrens mål før signering av totalentreprisekontrakten.

#### *Hva kan NTNU Campusutvikling lære:*

Hvis NTNU Campusutvikling velger tilsvarende nye teknologiske løsninger i sine bygninger som i ZEB-laboratoriet er det hensiktsmessig med en entreprenørstyrt prosjektering der byggherreorganisasjonen er involvert i planleggingen og prosjekteringen med valg av løsninger. Entreprenørstyrt prosjektering sikrer byggherrens sikkerhet. Involvering av byggherreorganisasjonen sikrer at nye teknologiske løsninger faktisk blir valgt.

Skal nye bygninger på campus bygges med velutprøvde løsninger innenfor kjente rammer for kostnad, tid og kvalitet kan gjennomføringen skje uten å inkludere de nye kontraktuelle, organisatoriske og kulturelle virkemidlene testet i byggeprosessen på ZEB-laboratoriet.

## 6.2 Bygningsteknologien

#### *Hva var nytt:*

Det har ikke blitt utviklet så mye ny teknologi spesifikt for ZEB-laboratoriet. De enkelte løsningene hver for seg er ikke spesielle, men kombinasjonen av alle nye løsninger i ett bygg gjør ZEB-laboratoriet til et spesielt bygg. Prosjektet kombinerer innovative løsninger som er kjent fra før. Det som er mest unikt for dette bygget er at løsningene testes i samspill i full skala og i full drift. ZEB-laboratoriet fungerer som et testmiljø der nye løsninger blir prøvet ut og overvåket i en reell driftssituasjon, mens det vanlige er laboratoriemålinger eller teoretiske beregninger. ZEB-laboratoriet inneholder to helt like testceller der innklimaet kan reguleres separat fra resten av bygningen, slik at man for eksempel kan sammenligne ytelsen til to forskjellige systemer eller måle tilfredshet blant forskjellige brukergrupper.

Løsningene som testes ut i ZEB-laboratoriet omfatter flere typer teknologi som vil bli utbredt i fremtiden når byggenæringen skal nå sine klimamål. Teknologien omfatter blant annet et solcelleanlegg som leverer nok strøm til å dekke 2,5 ganger byggets netto årlige energibruk, et voksbasert varmelager, et hybrid ventilasjonsanlegg med svært lavt energibehov, smart styring av

ventilasjon og solskjerming og et passivt kjølesystem der vinduer åpnes og lukkes automatisk for å regulere temperaturen i bygget.

#### *Hva er erfaringene:*

Erfaringene fra ZEB-laboratoriet viser at teknologien kan fungere i samspill, men det er nødvendig å kjøre inn og justere systemet til byggets behov. Noen av systemene krever god teknisk kompetanse hos driftspersonellet og oppfølging av leverandør for justering. Andre systemer, blant annet styringsalgoritmene for enkelte tekniske systemer, er laget «på huset» og er under kontinuerlig utvikling.

Enkelte av systemene bruker en helt annen mengde energi enn forespeilet. Særlig energibruk fra stikkontakter er vesentlig høyere enn prosjektert, men det mistenkes at noen målere er lagt på feil kurs og at strømforbruket egentlig kommer fra tekniske systemer. Mindre energi enn ventet er brukt til oppvarming og ventilasjon, så det kan komme en utjevning her dersom målerne blir koblet riktig.

Av sikkerhetsmessige grunner skurrer mange systemer seg av når alarmer går. Det har vært problemer med oppstart av systemer etter nedetid. Ved strømstans på campus skal for eksempel ikke ZEB-laboratoriet sette spenning på strømmettet, så solcelleanlegget kobles ut automatisk når dette skjer. Å koble det på igjen må gjøres manuelt. I 2022 falt anlegget ut etter strømstans tidlig i juli, og det ble ikke koblet på igjen før driftsansvarlig kom tilbake fra ferie.

Ettersom bygget fremdeles er nytt og systemene fremdeles ikke har kommet i stabil drift er det tidlig å konkludere om hvorvidt målet om netto null CO<sub>2</sub> blir oppnådd i tide. Derimot er de foreløpige tallene ikke helt ulike det som ble prosjektert, så det antas å være gode sjanser for å nå målet.

#### *Hva kan NTNU Campusutvikling lære:*

Som utprøvningsarena for ny bygningsteknologi kan ZEB-laboratoriet være en verdifull ressurs for NTNU Campusutvikling. Noen av systemene og løsningene som i dag finnes i ZEB-laboratoriet kan benyttes i andre bygg med minimale behov for tilpasning. Nye systemer kan også monteres i ZEB-laboratoriet og prøves ut i full skala før de eventuelt tas i bruk i nye byggeprosjekter. Et godt samarbeid mellom ZEB-laboratoriet og NTNU Campusutvikling vil være til gjensidig nytte for begge parter, og kan resultere i bedre løsninger til bruk på nytt campus. NTNU Campusutvikling kan benytte seg av mulighetene som ZEB-laboratoriet dokumenterer til å bli et forbildeprosjekt for bærekraft i byggenæringen.

ZEB-laboratoriet har testet og samlet erfaringer fra bruk av ny bygningsteknologi. Kombinasjonen av mange nye løsninger i ett bygg er spesiell, men hver for seg er ikke de nye teknologiske løsningene spesielle. Utnyttelsen av en del av løsningene krever finjusteringer for å bli maksimal, men alt fungerer og driftsorganisasjonen har lært mye de første driftsårene. Hvis NTNU Campusutvikling vil bygge nullutslippsbygninger er byggherreorganisasjonen fra ZEB-laboratoriet med sine spesialister bygningsteknologi mer enn villig til å dele løsninger og erfaringene fra bruken.



### 6.3 Brukertilfredsheten

#### *Hva var nytt:*

Det nye på ZEB-laboratoriet er at det er et nullutslippsbygg som fungerer som et fullskala laboratorium med uttesting av mange nye løsninger. Bygget krever at brukerne er tolerante for virkningene av uttestingen og at de bruker bygget slik det er tenkt.

#### *Hva er erfaringene:*

Brukerne av ZEB-laboratoriet er generelt positive til testingen av nye løsninger og de eventuelle ulempene det medfører. Det er spesielt at brukerne er med på å forske på løsninger og optimalisere dem. For eksempel har temperatursvingninger, stor oppmerksomhet rundt energisparing og lyssensorer påvirket brukerne. Når brukerne har som oppgave å optimalisere løsningene så blir det vanskelig for dem å klage til andre over eventuelle ulemper.

#### *Hva kan NTNU Campusutvikling lære:*

Brukerne av ZEB-laboratoriet har funnet seg i ulemper brukere i bygninger uten det samme omfanget av nye løsninger ikke trenger å forholde seg til. Når bygget er så avansert er det mye som skal fungere. Skal nullutslippsbygninger fungere optimalt må brukerne være innstilt på det. Brukertilfredsheten øker antakeligvis når brukerne opplever at bygget fungerer bedre og bedre.

Prosjektorganisasjonen har lyktes med å bygge en historie om at ZEB-laboratoriet er unikt. ZEB-laboratoriet er prisbelønnet og brukerne har en opplevelse av å arbeide i et fremtidsrettet bygg. Noen av brukerne har latt seg inspirere av bygget til å prøve å leve mer bærekraftig, for eksempel ved å reise mindre med fly. Hvis NTNU Campusutvikling klarer å skape en historie om at NTNU virkelig får en fremtidsrettet campus kan det skape mer tålmodige og fornøyde brukere.

## Vedlegg 1 Forskjeller mellom ZEB-laboratoriet og andre null-/lavutslippsbygg

Det bør bemerkes at ZEB-laboratoriet som prosjekt har strukket seg langt for å oppfylle ZEB-COM-standarden og oppnå netto null utslipp. ZEB-laboratoriet har en del særtrekk som andre nullutslippsbygninger ikke har. Nullutslippsbygninger kan videre bygges med andre kombinasjoner av løsninger enn det som er valgt ved ZEB-laboratoriet. To av medforfatterne for denne rapporten, Erlend Andenæs og Sara Hajizadeh, gjennomførte en befaring til Energy Academy Building ved Rijksuniversiteit Groningen. Det er et bygg med lignende ambisjoner som ZEB-laboratoriet, og som kan være til inspirasjon for NTNU Campusutvikling. Dette vedlegget inneholder en kort opplisting av innovative løsninger brukt der som skiller seg fra løsningene i ZEB-laboratoriet. Sara Hajizadehs masteroppgave inneholder en mer detaljert beskrivelse av disse løsningene.

### Særtrekk ved ZEB-laboratoriet

Som kontor- og undervisningsbygg har ZEB-laboratoriet et lavt energiforbruk sammenlignet med andre bygningstyper. Byggets drift inneholder ikke noe utstyr som krever mye energi, eller som bråker, forurenses, vibrerer eller avgir mye varme, og som dermed ville ha påvirket byggets utforming. Forbruket av strøm og varmtvann til daglig drift er også beskjedent. Romløsningen er åpen, fordi bygget ikke har noen støykilder eller utpregede krav til stillhet. Det gir gode kår for ventilasjonsløsningen. ZEB-laboratoriet er også en ganske liten bygning. Dermed oppstår ingen problemer med å bli kvitt overskuddsvarme, og tilgangen på dagslys er ganske god overalt.

Fordi det forskes mye på systemene i ZEB-laboratoriet, er det mange ressurser tilgjengelig for å observere og overvåke systemene i bygget, med ansatte på heltid som følger opp systemene. Det hjelper også at nesten alle som sitter i bygget er utdannet med mastergrad i bygningsfag eller arkitektur, og en anelig andel har enda mer spesialisering. Det gjør at nesten alle brukerne har teknisk forståelse for systemene i bygget. Det er også et lite miljø hvor de fleste brukerne er på fornavn med driftsansvarlige, noe som ikke nødvendigvis kan forventes i andre bygg på campus.

### Energy Academy Building – andre løsninger

Energy Academy Building hos universitetet i Groningen i Nederland er en bygning på ca. 13 000 kvadratmeter, som er utformet for å ha svært lavt energiforbruk i drift. Energiproduksjon i bygget har fått mer oppmerksomhet enn CO<sub>2</sub>-utslipp, men for å bli sertifisert som BREAAAM-NL Outstanding er det bygget som et nullutslippsbygg over en periode på 40 år.

Det er et bygg med en driftsprofil som ligger tett opp mot et typisk campusbygg hos NTNU. Energy Academy Building har store fellesarealer, kantine, flere undervisningsrom, cellekontorer og laboratorier for realfag med alt teknisk utstyr det innebærer: lasere, gasskompressorer, avtrekk for kjemi-arbeid og annet laboratorieutstyr. I tillegg til å være et nesten-null-energi-bygg har det altså omtrent samme funksjon for Groningen Universitet som Realfagbygget har for NTNU.

Blant innovasjoner som er benyttet ved Energy Academy Building, som ikke finnes i ZEB-laboratoriet, kan nevnes:

- Vinterhage på sørsiden av bygget, som fungerer som forvarmer for ventilasjonsanlegget. Inntaket til ventilasjonsanlegget trekker luft inn fra vinterhagen, og mer luft trekkes inn

utenfra gjennom soloppvarmede rør i fasaden. Om sommeren kan systemet styres med spjeld så kjøligere uteluft kan trekkes rett inn i ventilasjonsanlegget i stedet.

- Store ventilasjonskanaler gjennom byggets kjeller, som er bygget i betong. Dermed kan betongen fungere som termisk masse som avkjøler tilluften om sommeren og varmer den opp om vinteren.
- Ledning av avtrekksluft til atrium, hvor et sentralt avtrekk fjerner luften fra bygget ved hjelp av skorsteinseffekten. Varmeveksling fra avtrekksluft til tilluft (som befinner seg på motsatt side av bygget) gjøres med en vannbåren varmesløyfe.
- Varmepumpe med varmeutveksling til et tjern på campus, som gir god tilgang på kulde om sommeren og varme om vinteren.
- Eget ventilasjonsanlegg for avtrekk i laboratorier. Resten av bygget benytter felles ventilasjonsanlegg.
- Passiv solskjerming med «sotede» vinduer. Glasset stopper mesteparten av solstrålingen, men gir fortsatt god utsikt.
- Laboratorier og utstyr som avgir spillvarme er plassert på nordsiden av bygget. Her er det større behov for varme, fordi sola ikke skinner der. Det gjør også at det ikke er fare for overoppheting.
- Skråstilte solceller på skråtaket (se Figur V1.1) som gir mulighet for å ha takvindu i solcelletaket, samtidig som taket dekkes av flere kvadratmeter solceller enn takets areal. Denne konfigurasjonen gjør også at toppen på solcelleproduksjonen ikke nås midt på dagen kl. 12, noe som er påbudt i Nederlands tekniske forskrifter. Merk derimot at denne løsningen gir mye større materialbruk per kWt produserte strøm enn et konvensjonelt solcelletak.



Figur V1.1 Energy Academy Building på campus til Groningen Universitet (skjermdump fra Google Earth av Nijenborgh 6, 9747 AG Groningen, Nederland).

Prosjektets egne hjemmesider:

<https://www.rug.nl/groundbreakingwork/projects/eae/>

<https://www.rug.nl/groundbreakingwork/projects/eae/sustainable-solutions>

## Vedlegg 2 Fordeler og ulemper med å bygge Zero Emission Buildings (ZEB) – foreslått av ChatGPT

Rapporten tar ikke for seg spørsmålet om det er hensiktsmessig å bygge Zero Emission Buildings. Forslaget til Fremtidens Campus om å igangsette et forskningsarbeid om erfaringene fra ZEB-laboratoriet tok utgangspunkt i at det er hensiktsmessig.

For lesere som ikke tar for gitt at det er hensiktsmessig å bygge nullutslippsbygninger har vi med oppramsingen nedenfor av fordeler og ulemper med å bygge Zero Emission Buildings. Fordelene og ulempene er gjengitt ordrett slik de ble foreslått av ChatGPT den 21.05.23 og 05.09.23. Den 21.05.23 oppga ChatGPT seks fordeler og seks ulemper med å bygge nullutslippsbygninger. 05.09.23 oppga ChatGPT ti fordeler og ti ulemper.

Utover at ChatGPT lærer fort om nullslippsbygninger er det mulig å trekke ut et par observasjoner. Den ene er at nullutslippsbygninger har både fordeler og ulemper. En annen er at informasjonen om nullutslippsbygninger som er tilgjengelig for byggherrer og entreprenører øker fort. En overordnet observasjon er at etter hvert vil mer kunnskap om materialer og tekniske løsninger i nullutslippsbygninger gjøre det mulig å øke fordelene og redusere ulempene med Zero Emission Buildings.

### Fordeler med å bygge Zero Emission Buildings, 21.05.23

Zero emission buildings, også kjent som nullutslippsbygg eller nullenergibygg, refererer til bygninger som er utformet og bygget for å minimere eller eliminere utslipp av klimagasser og redusere energiforbruket til nær null. Disse bygningene har flere fordeler:

1. Reduksjon av klimagassutslipp: Det største og mest åpenbare fordelen med zero emission buildings er at de betydelig reduserer eller eliminerer utslipp av klimagasser, spesielt CO<sub>2</sub>, som er hovedårsaken til klimaendringene. Bygningene oppnår dette ved å bruke fornybar energi, energieffektive teknologier og materialer med lavt karbonavtrykk.
2. Energibesparelser: Zero emission buildings er utformet for å være svært energieffektive. De bruker avanserte isolasjonsmaterialer, høyeffektive vinduer, energieffektiv belysning og apparater, samt optimaliserte oppvarmings-, ventilasjons- og klimaanlegg (HVAC-systemer). Dette fører til betydelige energibesparelser og lavere energikostnader over tid.
3. Forbedret inneklime og komfort: Zero emission buildings fokuserer på god luftkvalitet, termisk komfort og belysning. De er utformet for å ha sunne og behagelige innemiljøer som fremmer trivsel og produktivitet for bygningens brukere. God ventilasjon og filtrering av luft bidrar til å redusere eksponeringen for forurensninger og allergener.
4. Bærekraftig ressursbruk: Zero emission buildings tar sikte på å bruke ressurser på en bærekraftig måte. De kan omfatte materialer som er resirkulerte, fornybare eller har lavt karbonavtrykk. Byggemetoder som favoriserer prefabrikasjon og minimalt avfall, reduserer også miljøpåvirkningen og ressursforbruket i byggeprosessen.
5. Fremtidssikring og verdiøkning: I en tid med økende fokus på bærekraft og klimaendringer, blir zero emission buildings stadig mer etterspurt. Bygninger med lavt karbonavtrykk og høy energieffektivitet har en tendens til å ha høyere markedsverdi og kan tiltrekke seg investorer og leietakere som verdsetter bærekraftige løsninger.

6. Lederskap og omdømme: Zero emission buildings gir eierne muligheten til å vise lederskap og forpliktelse til bærekraftig utvikling. Organisasjoner som investerer i slike bygninger kan forbedre sitt omdømme og merkevarebilde ved å demonstrere ansvarlighet for miljøet og samfunnet.

Det er viktig å merke seg at zero emission buildings krever nøye planlegging, design og implementering. De kan kreve høyere opprinnelig investering, men de langsiktige fordelene, inkludert energibesparelser og reduserte driftskostnader, kan oppveie disse kostnadene over tid.

### Ulemper med å bygge Zero Emission Buildings, 21.05.23

Selv om zero emission buildings har mange fordeler, er det også noen potensielle ulemper og utfordringer forbundet med dem:

1. Høyere byggekostnader: Bygging av zero emission buildings kan være kostbart på grunn av behovet for avanserte energieffektive teknologier, materialer med lavt karbonavtrykk og installasjon av fornybare energikilder som solcellepaneler eller vindturbiner. Den initiale investeringskostnaden kan være høyere sammenlignet med tradisjonelle bygninger.
2. Kompleksitet og utfordringer ved design og implementering: Utformingen og implementeringen av zero emission buildings kan være kompleks. Det krever tett samarbeid mellom arkitekter, ingeniører og entreprenører for å integrere energieffektive systemer og teknologier sømløst i bygningsstrukturen. Det kan være utfordrende å sikre optimal funksjonalitet og effektivitet i alle aspekter av bygningen.
3. Avhengighet av pålitelig fornybar energikilde: Zero emission buildings er avhengige av pålitelig tilgang til fornybar energi, for eksempel sol- eller vindkraft, for å oppnå nullutslippsstatus. Imidlertid kan tilgangen til slike energikilder variere avhengig av geografisk beliggenhet og klimatiske forhold. Perioder med dårlig vær eller lav solinnstråling kan påvirke bygningens energiproduksjon og påliteligheten til fornybar energi.
4. Potensielle driftsutfordringer: Zero emission buildings krever nøye overvåking og vedlikehold for å opprettholde optimal ytelse og energieffektivitet over tid. Komplekse systemer som solcelleanlegg, varmepumper og energilagringsløsninger kan kreve spesialisert kunnskap for drift, overvåking og feilsøking. Manglende oppfølging kan føre til redusert effektivitet og driftsproblemer.
5. Begrenset tilgjengelighet av teknologi og kompetanse: I noen områder kan det være begrenset tilgjengelighet av avanserte energieffektive teknologier og eksperter som er kjent med design og implementering av zero emission buildings. Dette kan føre til utfordringer med å finne kvalifiserte fagpersoner og tilgang til pålitelige leverandører.
6. Behov for oppgradering og tilpasning over tid: Teknologien innenfor energieffektive systemer og fornybar energi utvikler seg stadig. For å opprettholde nullutslippsstatus og oppnå optimal energieffektivitet, kan zero emission buildings kreve periodiske oppgraderinger og tilpasninger etter hvert som nye teknologier og løsninger blir tilgjengelige.

Det er viktig å merke seg at selv om det kan være noen utfordringer forbundet med zero emission buildings, blir mange av disse utfordringene stadig mindre ettersom teknologiutviklingen skrider frem og markedet for bærekraftige byggeløsninger modnes.

## Fordeler med å bygge Zero Emission Buildings, 05.09.23

Bygging av nullutslippsbygninger, også kjent som nullenergibygninger eller zero emission buildings, har flere fordeler. Disse bygningene er utformet for å minimere miljøpåvirkningen og energiforbruket i løpet av hele livssyklusen, fra produksjonen av materialene til drift og avhending.

Her er noen av fordelene med å bygge slike bygninger:

1. Redusert klimagassutslipp: Nullutslippsbygninger bruker fornybar energi og energieffektive teknologier, noe som reduserer behovet for fossile brensler. Dette bidrar til å redusere utslipp av klimagasser, som karbondioksid (CO<sub>2</sub>), og hjelper til med å bekjempe klimaendringene.
2. Lavere energikostnader: Nullutslippsbygninger er utformet for å minimere energiforbruket. De bruker ofte solenergi, vindkraft eller annen fornybar energi til oppvarming, kjøling og strøm. Dette resulterer i lavere energikostnader for eiere og beboere.
3. Bedre innelima: Nullutslippsbygninger fokuserer på å forbedre innelimaet ved å bruke avanserte ventilasjonssystemer og materialer som bidrar til å opprettholde sunne og komfortable omgivelser for beboerne.
4. Lavere vedlikeholdskostnader: Ettersom nullutslippsbygninger vanligvis er utstyrt med energieffektive komponenter og bærekraftige materialer, krever de ofte mindre vedlikehold og har en lengre levetid, noe som kan redusere kostnadene over tid.
5. Styrket omdømme: Eiere og utviklere som investerer i nullutslippsbygninger kan fremme sitt miljøengasjement og bærekraftige praksis, noe som kan forbedre sitt omdømme og tiltrekke seg mer oppmerksomhet fra potensielle leietakere eller kunder.
6. Bærekraftig utvikling: Nullutslippsbygninger er en viktig del av en bærekraftig utvikling. De bidrar til å bevare naturressurser, redusere avfall og minimere økologisk fotavtrykk.
7. Lovgivningsmessige fordeler: Noen steder tilbyr insentiver, skattefordeler eller subsidier for bygging av nullutslippsbygninger. Dette kan gi økonomiske fordeler for prosjekteiere og utviklere.
8. Langsiktig verdi: Nullutslippsbygninger kan ha en høyere langsiktig verdi, da de er mer attraktive for investorer og leietakere som verdsetter bærekraft og lavt energiforbruk.
9. Forskning og innovasjon: Byggingen av nullutslippsbygninger driver innovasjon innen bygg- og energiteknologi, noe som kan føre til utvikling av nye og mer effektive løsninger for bærekraftig bygging.
10. Samfunnsfordeler: Nullutslippsbygninger kan ha positive effekter på lokalsamfunn ved å redusere luftforurensning og energiavhengighet, samt ved å fungere som et eksempel på bærekraftig praksis for andre bygninger.

Samlet sett har bygging av nullutslippsbygninger potensial til å forbedre miljøkvaliteten, redusere klimapåvirkningen og skape økonomiske fordeler for eiere og samfunnet som helhet.

## Ulemper med å bygge Zero Emission Buildings, 05.09.23

Selv om det er mange fordeler ved å bygge zero emission buildings (nullutslippsbygninger), er det også noen utfordringer og ulemper knyttet til denne tilnærmingen. Disse ulempene kan variere avhengig av sted, teknologisk modenhet og budsjett. Her er noen av ulempene med å bygge slike bygninger:

1. Høyere oppstartskostnader: Bygging av nullutslippsbygninger kan være dyrere enn å bygge konvensjonelle bygninger. Dette skyldes behovet for spesialiserte materialer, teknologi og design som kan øke de initiale investeringskostnadene.
2. Teknisk kompleksitet: Integrasjon av nullutslippsteknologi og energieffektive systemer krever høy teknisk kompetanse og planlegging. Dette kan føre til utfordringer i design- og byggeprosessen.

3. Begrenset tilgjengelighet av fornybar energi: Avhengig av stedet der bygningen er plassert, kan det være begrenset tilgang til pålitelig fornybar energi som sol- eller vindkraft. Dette kan øke avhengigheten av konvensjonell energi og redusere nullutslippens potensial.
4. Behov for regelmessig vedlikehold: Nullutslippsbygninger krever ofte regelmessig vedlikehold for å opprettholde effektiviteten til energieffektive systemer og teknologi. Manglende vedlikehold kan føre til redusert ytelse.
5. Lengre avkastningstid: Selv om nullutslippsbygninger kan redusere energikostnadene over tid, kan det ta lengre tid å oppnå en positiv økonomisk avkastning sammenlignet med konvensjonelle bygninger.
6. Begrenset tilgjengelighet av materialer: Noen bærekraftige materialer som brukes i nullutslippsbygninger, kan være kostbare eller vanskelig å få tak i. Dette kan påvirke tilgjengeligheten og kostnadene for byggeprosjektet.
7. Manglende kompatibilitet med eksisterende infrastruktur: Integrasjon av nullutslippsløsninger kan være vanskelig i områder der det eksisterende energi- og infrastruktursystemet ikke er kompatibelt med slike teknologier.
8. utfordringer med tilpasning: Nullutslippsbygninger kan være designet med spesifikke klimaforhold i tankene, og tilpasning til endringer i klimaet eller behovene til beboerne kan være utfordrende.
9. Mulige estetiske begrensninger: Designbegrensninger for nullutslippsbygninger kan begrense estetisk frihet og kreativitet i arkitektonisk design.
10. Opplæringsbehov: Beboere og brukere av nullutslippsbygninger kan trenge opplæring for å forstå og bruke de tilgjengelige teknologiene og systemene på en effektiv måte.

Selv om det er ulemper og utfordringer knyttet til å bygge nullutslippsbygninger, er det viktig å merke seg at mange av disse problemene kan overkommes med riktig planlegging, teknologisk utvikling og investering på lang sikt. Bærekraftige bygninger fortsetter å utvikle seg, og som teknologien modnes, kan mange av disse ulempene bli mindre fremtredende.



