

August Johannessen og Jonas Mugås Madebo

Benytte historiske data til å forbedre det termiske energilagringssystemet til ZEB-laboratoriet

Bacheloroppgave i BIFOREN

Veileder: Bjørn Austbø

Medveileder: Jorge Salgado Beceiro, Thomas Elvrum Lassen og
Alexis Sevoult

Mai 2024

August Johannessen og Jonas Mugås Madebo

Benytte historiske data til å forbedre det termiske energilagringssystemet til ZEB-laboratoriet

Bacheloroppgave i BIFOREN

Veileder: Bjørn Austbø

Medveileder: Jorge Salgado Beceiro, Thomas Elvrum Lassen og Alexis Sevoult

Mai 2024

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Fakultet for ingeniørvitenskap

Institutt for energi- og prosessteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Forord

Denne oppgaven er den avsluttende oppgaven i bachelor i fornybar energi ingeniør. Bachelor oppgaven er skrevet i 6.semester og har emnekode FENT2900. Den er obligatorisk og teller 100 %. Oppgaven er skrevet gjennom Norges tekniske og naturvitenskapelige universitet. Gruppen har bakgrunn i energilagringfag og termodynamiske fag. Fakultet er ingeniørvitenskap.

Temaet til oppgaven er termisk energilagring på ZEB-laboratoriet som er et prosjekt mellom SINTEF og NTNU. Hensikten med oppgaven er å finne og etablere klare rammer for hvordan energilagringssystemet på ZEB-laboratoriet kan utbedres basert på historisk data.

Gruppen ønsker å takke intern veileder Førsteamanuensis Bjørn Austbø for hjelpfull oppfølging gjennom semester. Gruppen ønsker også å takke de eksterne veiledere fra SINTEF Forskningsleder Jorge Salgado Beceiro og Forskningsingeniør Thomas Elvrum Lassen for muligheten til å samarbeide med Sintef og tilgang på Sintefs influxdatabase og Grafana database samt gode tips til oppgaven. Den siste gruppen ønsker å takke er ekstern veileder fra Cartesian Chief Technology Officer Alexis Sevout for god oppfølging på PCM dynamikk delen av oppgaven og gode tips.

Kilde til forsidebilde: ZEB-laboratoriet 2024

Sammendrag

Denne bacheloroppgaven har beregnet på forskjellige muligheter med bruk av et fase endrende materialet som energilagringssystem i ZEB-laboratoriet på Gløshaugen. Bygningen er et prosjekt i nullutslipp mellom SINTEF og NTNU. Hensikten med beregningene var å finne en bedre metode for hvordan energilageret skal brukes videre basert på historiske data. Dette ble gjort med å finne et modell for hvordan ønsket effekt kan bli hentet ut og hvilke turtemperatur som trengs for å hente denne effekten. Modellen var basert på energinivå, altså temperaturen på energilageret. Videre ble det kjørt en begrenset simulasjon i Python som testet for rammeverket på energinivå og effekt. Energibehovene var uendret fra hva den historiske dataen.

Det var fem forskjellige scenarier som ble testet opp mot hverandre, det første av den var bruken av energilageret basert på historiske data. Det første av de nye scenariene ble simulert for å kun kjøre oppladninger om natten. Den neste er en som kun blir oppladet om ZEB-laboratoriets egne solceller produserer et overskudd av energi. Det tredje nye scenariet baseres på en kombinasjon av de to forrige. Prioriteten i dette scenariet er at den skal lade soloverskuddsenergi dersom det er mulig. Det siste nye scenariet som ble testet for var en modell som kun skulle prøve å flate ut energikurven fra dag til dag.

Resultatene fra energilagerets energimodell er at den kan gi en viss grad av upresise svar, men at modellen i denne oppgaven tilfredsstillende behøver som ble siktet etter. Når det gjelder simulasjonen og hvilke av scenariene som viste seg til å være mest og minst gunstig, var den originale minst gunstig både økonomisk og miljømessig. Den som var mest gunstig både økonomisk og miljømessig var kombinasjonsscenarioet. I tillegg til dette prestere nattladingsscenarioet bra både økonomisk og miljømessig. Dette viste viktigheten av å benytte mulighetene på natten om vinteren når oppvarmingsbehovene ikke er like høye i tillegg til at prisene er lavere. Kombinasjonsscenarioet som presterer best hadde en evne til å tilbasse behovene til bygget best og ble dermed den mest økonomiske. En slik modell for benyttelse av energilageret kan være gunstig for ZEB-laboratoriet med energi- og kostnadsbesparelse, men det kan også jobbe mot deres mål om nullutslipp.

Abstract

This bachelor's thesis examines various applications and uses of a phase change material (PCM) as an energy storage system in the ZEB-laboaratory at Gløshugen. ZEB stands for zero emission building which is the aim of this laboratory through its lifteitme. The purpose of the calculations in this thesis were to discover better methods to use the latent energy storage system based on historical data. This was acheived through custom models that calculated desired power based on the flow temprature and the energy levels of the energy storage system. Additonally, there were simulations in Python which would test the framework on energy levels and power of the energy storage system. The energy demands was unchanged from the histroical data.

There were five different scenarios that were tested and compared with each other. The first scenario used the energy storage system based on historaical data. The second one simulated a scenario where the energy storage system was charged at night. The third scenario simulated charging the energy storage system only when there was a surplus of solar energy produced. The fourth was a combination of night charging and charging with surplus of solar energy production, with the priority being using as much solar energy possible possible. The final scenario was designed for peak shaving of the heating demand.

The results from the energy storage model is that it can give somewhat unprecise awnswers, but the model in this thesis satsifies the needs that were aimed for. When studying the simulations and which were the most and least favorable, the original scenario was the least favorable in both economics and environment. The scenario that was the best for both economics and enviornment was the combination scenario. Aditionally, the night charging scenario performed well in both terms of economics and enviornment. This showed the importance of using the opportunity to charge at night time in winter periods while the energy demand and cost are lower. The combination scenario that performed the best also had the best ability to adapt to the demands of the building. The use of a this model on the energy storage could be favorable for the ZEB-laboratory both in terms of energy and cost savings, and also to work towards their goal of zero emmissions.

Symbolliste

Symbol	Beskrivelse	Enhet
A_s	Overflate areal	m^2
Bi	Biot-tallet	–
C_P	Varmekapasitet	$\frac{J}{kg \cdot K}$
COP_H	Ytelses faktor oppvarming	–
h	Varmeovergangstallet	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
h_{l,T_M}	Entalpi ved smeltepunktet	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
h_{s,T_M}	Entalpi ved frysepunktet	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
k	Ledningseven	$\frac{W}{m \cdot K}$
L_c	Karakteristisk lengde	–
m	Masse	kg
\dot{m}	Massestrøm	$\frac{kg}{s}$
Q_H	Varme til høytemperatur område	J
Q_{latent}	Latent varme	W
Q_{Conv}	Konveksjons overført varme	W
$Q_{f\ddot{o}lbar}$	Følbar varme	W
T	Temperatur	$^{\circ}C$
T_H	Temperatur ved høy temperatur side	$^{\circ}C$
T_L	Temperatur ved lav temperatur side	$^{\circ}C$
T_S	Overflate temperatur	$^{\circ}C$
T_{∞}	Omgivelsetemperatur	$^{\circ}C$
V	Volum	m^3
W_{netto}	Netto arbeid	J
Δh	Entalpi endring	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
\dot{Q}	Varme	W
\dot{Q}_{Conv}	Konveksjons overført varme	W

Forkortelser

Forkortelse	Engelsk	Norsk
AC	Alternating Current	Vekselstrøm
BIPV	Building-Integrated Photovoltaics	Bygningsintegrerte Solceller
CO ₂	Carbon Dioxide	Karbondioksid
COP	Coefficient of Performance	Ytelsesfaktor
LHS	Latent Heat Storage	Latent Varmelagring
NU	Nomenclature Update	Oppdatering av Nomenklatur
OLS	Ordinary Least Squares	Minste Kvadraters Metode
PCM	Phase Change Material	Faseendrende Materiale
PV	Photovoltaic	Fotovoltaisk
SINTEF	The Foundation for Scientific and Industrial Research	Selskapet for Industriell og Teknisk Forskning
NTNU	Norwegian University of Science and Technology	Norges Teknisk-naturvitenskapelige Universitet
VV	Heating Ventilation	Varme Ventilasjon
ZEB	Zero Emission Building	Nullutslippsbygning

Table of Contents

Forkortelser	v
List of Figures	viii
List of Tables	x
1 Innledning	1
2 Teori	2
2.1 Energilagring	2
2.2 Varmeoverføring og energibalanse	2
2.3 Termisk energi, følbar og latent varme og fase endrende materialer	3
2.4 Fase endrende material	4
2.5 Generelle klassiske lastprofiler og peak shaving	5
2.6 Fotovoltaisk system	6
2.7 Fjernvarme	7
2.8 Varmepumpe	7
2.9 Statistiske og beregnings metoder	7
3 Systembeskrivelse	8
3.1 Energisystem	8
3.2 Oppvarmingssystemet	9
3.3 Energilageret	9
3.4 Biovoksen	11
3.5 Modus	11
3.6 Solcellepaneler	14
3.7 scenarioene	14
4 Metode	15
4.1 Litteratur analyse	15
4.2 Antagelser	16
4.3 ZEB-laboratoriet	17
4.4 PCM dynamikk	17
4.5 Simulering av scenarioene	18
4.6 Økonomi og miljø	19
5 Resultat	21

5.1	Behov og ressurser	21
5.2	PCM dynamikk	23
5.3	Simulering av scenarioene	26
5.4	Økonomi, miljø, datamangler og kumulativ energi	29
6	Diskusjon	34
6.1	ZEB-laboratoriets behov og ressurser	34
6.2	PCM Dynamikk	36
6.3	scenarioene	38
6.4	Økonomi, miljø, datamangler og kumulativ energi	40
6.5	Feilkilder	42
7	Konklusjon	44
7.1	Fremtidig arbeid	44
	Bibliography	46
	Appendix	48
A	Pris	48
A.1	Strømpris	48
A.2	Fjernvarme pris	49
B	Vinkler på 3D figurere	50
B.1	Vinkler for 3D spenningsplottet	50
B.2	Vinkler for minste kvadratiske metode 3D plott	51
B.3	Vinkler for kubisk interpolasjons 3D plott	52
B.4	Visualisering av energilagerets rammeverk med analytiske ligningene til minste kvadratiske metode	53
B.5	Visualisering av energilagerets rammeverk med analytiske ligningene til kubisk interpolasjon	54
C	Gjennomsnitts-, tur- og returtemperatur til energilageret	55
D	Systemskjema og ventil	56
D.1	Systemskjema	56
D.2	Ventil	57

List of Figures

1	Figuren viser hvordan lagret varme korrelerer med temperatur. ”Sensible”, ”latent” og ”Thermochemical heat” er de engelske navnene på følbar, latent og termokjemisk varme. (Beceiro 2022)	3
2	Høy og lav effektkurve for en husholdning gjennom en hverdag og helg (Norheim 2022. Punktum et desimalskille.	5
3	Høy og lav effektkurve for et kontorbygg gjennom en hverdag og helg (Norheim 2022	6
4	Forenkling av energisystemet til ZEB-laboratoriet. (SINTEF 2024)	8
5	Det totale oppvarmingssystemet til ZEB-laboratoriet simplifisert til de relevante komponentene og knutepunktene.	9
6	Figurene viser innsiden av energilageret med temperaturmålinger på platene og mellom platene.	10
7	Forenklet skisser av oppvarmingssystemet som viser oppladings modusene til energilageret og dens ikke aktive modus.	12
8	Forenklet skisser av oppvarmingssystemet som viser utladings modusene til energilageret og dens ikke aktive modus.	13
9	Den originale bruken av energilageret til ZEB-laboratoriet gjennom seks uker med cirka tre måneder skille.	21
10	Solproduksjonen fra ZEB-laboratoriet gjennom seks uker med cirka tre måneder skille.	22
11	Lastprofilen for oppvarming og annen elektrisk energibehov til ZEB-laboratoriet gjennom seks uker med cirka tre måneder skille.	22
12	Energibalanse til ZEB-laboratoriet gjennom seks uker med cirka tre måneder skille.	23
13	Spredningsplott av energilagerets energinivå plottet mot deres gjennomsnittlige temperatur.	23
14	De forskjellige effektene gitt ut minutt for minutt gjennom hele tidsperioden. . . .	24
15	Spredings plott av varmeeffekt mot energinivå og turtemperatur til energilageret.	25
16	To forskjellige metoder brukt for å simulere forholdet mellom varmeeffekten, energinivået og turtemperaturen til energilageret.	25
17	Eksempler fra de forskjellige scenarioene på hvordan latent energilager kan bli brukt med lav solinnstråing og høyt oppvarmingsbehov. I figurene er punktum et desimalskille.	27
18	Eksempler fra de forskjellige scenarioene på hvordan latent energilager kan bli brukt med moderat solinnstråling og oppvarmingsbehov. I figurene er punktum et desimalskille.	28
19	Eksempler fra de forskjellige scenarioene på hvordan latent energilager kan bli brukt med høy solinnstråling og lavt oppvarmingsbehov. I figurene er punktum et desimalskille.	29
20	Varmekart over manglende data time for time over hele tidsperioden.	30
21	Kumulativ lageret energi i energilageret for de forskjellige scenarioene.	30
22	Månedlig økonomisk oversikt for alle scenarioene kun sett for energilageret.	31
23	Økonomisk oversikt for alle scenarioene for samlet system måned for måned. . . .	31

24	Totale inntekter for de forskjellige scenarioene.	32
25	Totale kostnader for de forskjellige scenarioene.	32
26	Totale miljøpåvirkninger for alle scenarioene i utslipp kg CO ₂ for energiforbruk og produksjon.	33
27	Strømpriser gjennom hele tidsperioden for prosjektet. (plattform 2024)	48
28	Forskjellige vinkler på spredningsplottet for PCM	50
29	Flere vinkler på minste kvadratiske metode modellen.	51
30	Viser vinkler på kubisk interpolasjon modellen.	52
31	Et plott basert på analytiske ligningene til minste kvadratiske metode.	53
32	Et plott basert på analytiske ligningene til minste kvadratiske metode.	54
33	Eksempler på forholdet mellom gjennomsnittstemperaturen til energilageret og tur og returtemperaturen til vannet.	55
34	SINTEFs systemskjema varme og sanitær av ZEB-lab	56
35	Ventil-skisse	57

List of Tables

1	Testet for verdier av CrodaTherm 37 som er biovoksen i energilageret på ZEB-laboratoriet (Sevault and Næss 2020).	11
2	Tabellen presenter solcellepanelene sin posisjon type nominell effekt og areal (Sintef 2024a).	14
3	Denne tabellen presenterer rader som ble fjernet fra datasettet grunnet deres feilmålinger.	16
4	Tabellen presenterer utslippet til de forskjellige energikildene koblet til ZEB-laboratoriet.	20
5	Regresjonsligningene for de forskjellige fasene i Figur 13	24
6	Rammene for maksimal opplading og utlading for de forskjellige scenarioene.	26
7	Tabellen presenterer minste kvadratiske metoder sine R-verdi og ligninger.	26
8	Tabellen presenterer kubisk interpolering sine R-verdi og ligninger.	26
9	Tabellen i vedlegget viser fjernvarme prisen i tidsperioden Jan 2023 til Mars 2024.	49

1 Innledning

Verden står ovenfor klimaendringer og det er et behov for nye løsninger (Miljødirektoratet 2024a,b). Eksempler på løsninger strekker seg fra fornybare energikilder til effektiv energibruk og energilagring. Målet er å kutte ned på mengden utslipp av CO₂ og andre klimagasser som bidrar til global oppvarming. Det er mange sektorer som bidrar til klimagassutslipp. Eksempler på dette er industri, transport og bygg. Energibruk i bygg står for omtrent 35 % av utslippet i Norge og majoriteten går til oppvarming (Forskningsrådet 2022). Dermed er det stort potensial for å redusere utslippet fra bygninger.

I norske husholdninger og kontorbygninger står oppvarming av rom og vann for 80 % av energibehovet (NVE 2024). Det finnes flere tiltak for å prøve å håndtere dette behovet. I Norge brukes biomasse og fjernvarme, men elektrisk forsyning fra strømmnettverket står for den største delen av oppvarmingen (NVE 2024). Elektrisk forsyningen kan brukes til direkte oppvarming med panelovn og gjennom en varmepumpe. En varmepumpe bidrar til mer effektiv utnyttelse av energien til oppvarming (NVE 2024).

En lovende løsning som kan lede til mindre utslipp er nullutslippsbygg, også kjent som “zero emission building” (ZEB). Et slikt bygg skal minimere nytt utslipp og i løpet av sin levetid kompensere fullstendig eller delvis for utslippet relatert til produksjon og drift, dette varierer fra type ZEB (Miljødirektoratet 2024c). Dette gjør bygget ved å generere strøm fra egne fornybare kilder som den sender tilbake til strømmnettverket for å kompensere for eget utslipp (Miljødirektoratet 2024c).

ZEB-laboratoriet er et forskningsprosjekt på Gløshaugen mellom NTNU og SINTEF (Sintef 2024b). Dette er et kontorbygg som skal utforske nye muligheter for å finne innovative løsninger på energiforbruk og produksjon. Som et kontorbygg og laboratorium forskes det på hvordan personelle påvirker energiforbruket i bygningen. ZEB-laboratoriet benytter solceller til å generere fornybar energi for å jobbe mot netto nullutslipp i løpet av sin levetid (Sintef 2024b). Denne produksjonen er ikke alltid forutsigbar og det kan derfor være gunstig med et energilager. Energilagringssystemet skal kunne lagre overskuddsenergi for senere bruk, slik at det glatter ut effekt toppene til bygget. ZEB-laboratoriets energilager er en biovoks som lagrer latent termisk energi. Det er den første bygningen til å implementere en biovoks som fase endrende materialer, også kjent som “phase change materiel” (PCM), til energilager. (NTNU n.d.; Sintef 2024b)

Problemstillingen for dette prosjektet er å utforske hvordan utnyttelse av historisk data fra ZEB-laboratoriet kan forbedre bruken av byggets energilager. Hensikten er å tilpasse energilageret basert på hvordan den tidligere har blitt brukt for å fastsette et rammeverk. Rammeverket skal simulere forskjellige scenarioer for å finne løsninger som bidrar til energi- og kostnads besparelse. Samtidig skal løsningene arbeide mot ZEB-laboratoriets mål om nullutslipp.

Bacheloroppgaven inkluderer seks deler. Den første delen er en teoridel som vil forklare relevant teori knyttet opp mot varmeoverføring og varmelagring. Den vil også forklare de relevante komponentene i systemet i tillegg til matematiske metodene brukt. Den neste delen er en systembeskrivelse. Den kommer til å inkludere flere systemskisser og beskrivelser av de forskjellige komponentene som ZEB-laboratoriet har tilgang på. Videre er det metoden, hvor det vil bli forklart hvordan alle beregninger og simulasjoner ble gjennomført. Etter dette er det resultatene som kommer til å presentere alle de relevante funnene opp mot problemstillingen. Den nest siste delen er diskusjonen, der alle de forskjellige resultatene vil bli analysert og drøftet opp mot hverandre slik at en konklusjon kan trekkes. Til slutt er det en avsluttende del der konklusjonen til oppgaven som er svaret på problemstillingen vil bli presentert. I tillegg til dette vil også avslutningen inkludere en del med videre arbeid og anbefalinger for hvordan resultatene fra denne bacheloroppgaven skal bli benyttet.

2 Teori

I denne delen av rapporten vil relevant teori knyttet opp mot bacheloroppgaven bli presentert. Informasjon og formler relatert til energilagring, varmeoverføring, generelle lastprofiler og andre komponenter vil bli forklart.

2.1 Energilagring

Energilagring er en teknologi som lagrer energi for senere bruk. Slik teknologi er relevant i energiforsyningssystemer grunnet at forbruk og produksjon av energi ikke alltid er sammenfallende. Et eksempel er solceller som produserer energi om dagen når solen er ute, mens den ikke kan produsere om kvelden når solen har gått ned. Energilagring er en fellesbetegnelse og har forskjellige bruksonråder som baseres seg på forskjellige vitenskapelige prinsipper for å lagre energi. Eksempler på type energi som blir lagret er termiskenergi, kjemiskenergi og mekanisk. (Burheim 2017; Kalogirou 2014; Rosvold and Hofstad 2023)

Energilagring er kritisk i flere sektorer som for eksempel kraftproduksjon, transport og oppvarming. Global oppvarming er en økende utfordring for samfunnet og for å overkomme dette problemet er det nødvendig med miljøvennlige løsninger. Fornybar energi er et eksempel på en miljøvennlig løsning, men siden vindturbiner og solcellepaneler er avhengig av eksterne faktorer så er det viktig å lagre energien for å tilpasse behov og etterspørsel i strømmnettverket. Forskjellige situasjoner har forskjellige utfordringer, dermed kreves forskjellige energilagringssystemer. Noen eksempler på energilager som tilpasser situasjonen er batteri som brukes i personbiler og tung transport som lastebiler som bruker hydrogen. For oppvarming av bygg kan teknologi som termisk energilagring brukes for å lagre varme til ønsket bruk. (Burheim 2017; Rosvold and Hofstad 2023)

2.2 Varmeoverføring og energibalanse

Det er tre fundamentale mekanismer for varmeoverføring. Disse er konveksjon, konduksjon og stråling. Konveksjon er varmeoverføring gjennom strømminger i væske og gass. Termisk energi i konveksjon er bevegelsen av partiklene i fluidet. Bevegelsen av partiklene i fluidet er avhengig av temperaturen til fluidet. Høyere termisk energi i fluidet tilsvarer høyere kinetisk energi i partiklene og motsatt. Fenomener som strømminger i atmosfæren og i havet kan forklares med konveksjon. Denne varmemechanismen brukes i alt fra matlaging, oppvarming av hus i form av fjernvarmeanlegg og kraftproduksjon. (Yunus A. Çengel 2020)

Konveksjon kan uttrykkes med Ligning 1 som er Newtons avkjølingslov som beskriver at varmeoverføring er proporsjonal med temperatur differansen. h er varmeovergangstallet med enhetene $W/(m^2 \cdot K)$. Varmeovergangstallet er en beregnet parameter og ikke en egenskap av fluidet. A_s er overflatearealet som blir varmet opp i m^2 , T_s er temperaturen på overflaten og T_∞ er temperaturen i omgivelsene med enhetene kelvin. (Yunus A. Çengel 2020)

$$\dot{Q}_{Conv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad (1)$$

Konveksjon fordeles videre i ytre og indre strømming. Ytre strømming er et fluid som beveger seg langs et objekt der grensesjiktet kan fritt vokse. Omgivelse er frittflytende og har null hastighet eller temperatur endring. For indre strømming er fluidet omringet av en overflate som leder til at grensesjiktet er begrenset. Beregninger på varmeoverføring i en tube kan beskrives med Ligning 2 dersom det er stabil flyt. \dot{Q} er effekten i W av varmeoverføringen, c_p den spesifikke varmekapasiteten til stoffet i enheten $J/(kg \cdot K)$ og ΔT er endring i temperatur. \dot{V} er volumstrømmen gitt ved enheten m^3/s og ρ er tettheten gitt ved kg/m^3 . (Yunus A. Çengel 2020)

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \frac{\dot{V}}{\rho} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

Videre er konduksjon varmeoverføringen mellom partiklene i stoffet fra den siden med mer energi til den siden med mindre energi. Den termiske resistansen i konduksjon er konduktiviteten som er materialets evne til å lede varme. (Yunus A. Çengel 2020)

Biot-tallet er forholdet mellom konduksjonsresistansen og konveksjonsresistansen. Ligningen for Biot-tallet er presentert i Likning 3, der Bi er Biot-tallet som er dimensjonsløst, h er varmeovergangstallet. L_C er den karakteristiske lengden med enhet m og k er den termiske motstanden med enhet $W/(m \cdot K)$. Biot-tallet er et mål på om temperaturen kan antas til å være tilnærmet konstant i hele objektet. En verdi på 0,1 eller mindre vil bety at temperaturen i stoffet er tilnærmet konstant. For en plan vegg kan også kritisk lengde antas til å være halvparten av bredden. (Yunus A. Çengel 2020)

$$Bi = \frac{h \cdot L_c}{k} = \frac{h \cdot V}{k \cdot A_S} \quad (3)$$

2.3 Termisk energi, følbar og latent varme og fase endrende materialer

Termisk energilagring går ut på lagring av varme og brukes i perioder der systemet har et overskudd av varme eller annen energi produsert som kan lagres for senere bruk. Termisk energilagring har et stort rekkevidde og er i bruk i industri som varmekraftverk, varmesentraler og oppvarming av leiligheter. Implementering av solenergi i romoppvarming har gjort termisk energilagring til et konkurransedyktig og relevant energilager for oppvarming av for eksempel boliger. I tillegg kan termisk energi brukes for å effektivisere oppvarmingssystemer med å avlaste oppvarmingsbehovet i periode med høyt forbruk. Eksempler på termisk energilagring er varmtvannsakkumulator, dampakkumulator, fase endrende material og termiske kjemiske energilager. Metodene brukt for å lagre varme er forskjellige, de kategoriseres inn i følbar- og latent varme og termo-kjemisk energilager. (Burheim 2017; Rosvold and Hofstad 2023; Sevault, Kauko et al. 2017)

Følbar varme er definert som varmeoverføring som kan registreres med sansene. Det er løslatt varme knyttet til temperaturendringer. Følbar varme er avhengig av at stoffet har en høy spesifikk varmekapasitet for å lagre og transportere varmen. Vann er et populært eksempel på følbar varmelager og brukes ofte med en varmtvannsakkumulator. I Figur 1 illustreres sammenhengen mellom temperatur og lagret energi i et følbart energilager. Det viser at temperatur og energi er proporsjonale mot hverandre. Det vil si at temperaturen øker proporsjonalt med mengden energi gitt. Følbar energilagring kan uttrykkes med Ligning 4. (Beceiro 2022; Rosvold and Hofstad 2023; Sevault, Kauko et al. 2017)

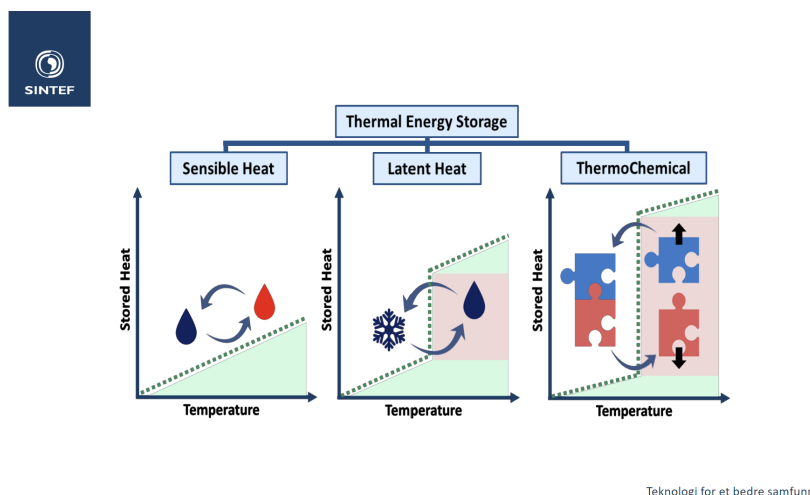


Figure 1: Figuren viser hvordan lagret varme korrelerer med temperatur. "Sensible", "latent" og "Thermochemical heat" er de engelske navnene på følbar, latent og termokjemisk varme. (Beceiro 2022)

$$Q_{f\ddot{o}lbar} = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (4)$$

Latent varmelagring benytter faseoverganger i materialer for å lagre energien. Under faseovergangen er stoffet isotermt og energien går til å endre aggregat tilstand. Et eksempel på dette er forholdet mellom is og vann. Når vann fryser til is vil vannets temperatur forbli konstant imens vannet tar til seg energi, prosessen vil være motsatt dersom is smelter. Latent varmelagring har fordeler over følbar varme, som for eksempel har den høyere energitetthet som bidrar til lavere lagringsvolum. I tillegg har latent varmelager som PCM 5-14 ganger større volumetrisk energitetthet enn et følbart varmelager. Sammenlignet med termo-kjemisk energilagringssystem er latent varme mer brukervennlig grunnet det er utfordringer rundt stabilitet, korrosjon og degradering per syklus. I Figur 1 illustreres at latent varme lagres og slippes ut gjennom faseendringen oftest mellom fast og væske form. Eksempel på teknologi med latent varmelagring er PCM. Ligning 5 viser mulig mengde energi som kan lagres over et tofase område. h_{l,T_M} er entalpien til lagrede latente varmen ved smeltepunktet i flytende tilstand. h_{s,T_M} er entalpien til det lagrede latente varmen ved frysepunkt i fast tilstand. (Beceiro 2022; Burheim 2017; Sevault, Kauko et al. 2017)

$$Q_{latent} = m \cdot \Delta h = m \cdot (h_{l,T_M} - h_{s,T_M}) \quad (5)$$

Termo-kjemisk energilager er materialer som lagrer varme i en reversibel kjemisk reaksjon. Varme lagres og slippes ut gjennom to stoffer som reagerer med hverandre og spaltes fra hverandre. Dette blir illustrert i Figur 1. (Beceiro 2022)

2.4 Fase endrende material

Fase endrende material er et eksempel på latent varmeteknologi som brukes i praksis. PCM teknologi har et stort rekkevidde i applikasjon fra energilagring til temperatur regulering for vedlikehold. PCM blir fordelt i organisk, uorganisk, metallisk og eutektisk energilager. (Burheim 2017; Jeon et al. 2013)

Organisk PCM fordeles videre inn i parafin og ikke-parafin. Styrkene til organisk PCM er at den er enkelt resirkulerbar, billig, kjemisk stabil med relativ høy latent varme i rangen 100-200 kJ/kg . Svakheter rundt organisk PCM er at den har lav ledningsevne i solid tilstand. I tillegg har organisk PCM lav tetthet og en relativ tidskrevende faseoverganger. Den passer best i applikasjoner der temperaturen er mellom 10 og 80 °C som termisk regulering av elektronikk. Dette kommer av smelte punktet til parafin er mellom 35 og 70 °C. Ikke-parafin brukes for å regulere temperaturen i leiligheter grunnet deres lave smeltepunkt. En lovende og ny organisk PCM som dukker opp på markedet er grønnsaksbasert PCM. Grønnsaksbasert PCM har kokepunkter mellom (-90) og 150 °C, latent varme mellom 150 og 220 kJ/kg og er fullstendig miljøvennlig og lett produserbart. (Jeon et al. 2013; Sevault, Kauko et al. 2017)

Den andre typen PCM er uorganisk som er den mest brukte og største kategorien av latent energilager. Uorganiske PCM har unike styrker og svakheter som gir dem egne applikasjoner som skiller dem fra de andre fasendre materialer er egenskaper som høymasseenhet, ikke brennbar, høy varmeledningsevne og generelt billigere. I tillegg tar faseovergangen i uorganisk relativ kort tid. Unike utfordringer for uorganisk er at den er lett nedbrytbar og PCM kan bli "supercooling" som vil si at den kan være flytende under frysepunkt (Shamseddine et al. 2022). Vanlig sammensetning av uorganisk PCM er salt som oksider, karbonater, sulfater, nitrater og halogenider eller salt hydrater. Smeltepunktet varierer fra 10-900 °C. Temperaturspannet betyr at uorganisk kan brukes i mange forskjellige temperaturområder, men er hovedsakelig i høye temperatur applikasjoner. (Jeon et al. 2013; Sevault, Kauko et al. 2017)

En metallisk PCM er metaller og metallbelegg ofte laget av cesium, gallium, aluminium og magnesium. Smelte punktet har et spenn mellom 30 og 700 °C. I høy temperatur applikasjoner anbefales det å bruke aluminium og magnesium grunnet det høye smeltepunktet. På den andre siden anbefales det å bruke cesium og gallium ved lavtemperatur forbruk. Styrken til metallisk PCM er at den har beste varmeledningsevne sammenlignet med andre typer PCM. De er trygge og enkle å jobbe med. Ulempen med metallisk PCM er den høye tettheten og lave latente varmen som fører til de blir tunge og mindre energi effektive. (Sevaut, Kauko et al. 2017)

Eutektisk PCM er teknologi med mangel på forskning. Den brukes oftest i gulvoppvarming i bolighus. Teknologi er sammensatt av et metallbelegg eller en spesifikk blanding av to eller flere stoffer som vil fullstendig transformere en fase til en annen. (Jeon et al. 2013; Sevaut, Kauko et al. 2017)

2.5 Generelle klassiske lastprofiler og peak shaving

Ved oppvarming av boliger, industri, kontor og servicenæring varierer energibehovet over dagen, uka og året. For effektiv energibruk er det nødvendig å tilpasse forsyningen etter behov. Behovene varierer av faktorer som sosial- og fysisk varmelast. I tillegg er det perioder om dagen der oppvarmingsbehovet er høyere som påvirker prisene da flere bruker strøm på samme tid fra strømmnettverket. (Norheim 2022)

Lastprofilen til husholdninger presenteres i Figur 2 og er gjenkjennelig i det høye forbruke om kvelden grunnet at beboerne kommer hjem og krever oppvarming som passer deres komfort. I tillegg er det en topp om morgningen grunnet at beboerne våkner og forbereder seg for dagen. I hverdagen vil toppen etter morgningen falle og ikke øke før kvelden. I helgen kommer toppen senere og faller ikke like signifikant som i hverdagen. Dette indikerer at folk forblir hjemme og våkner senere i helgen. (Norheim 2022)

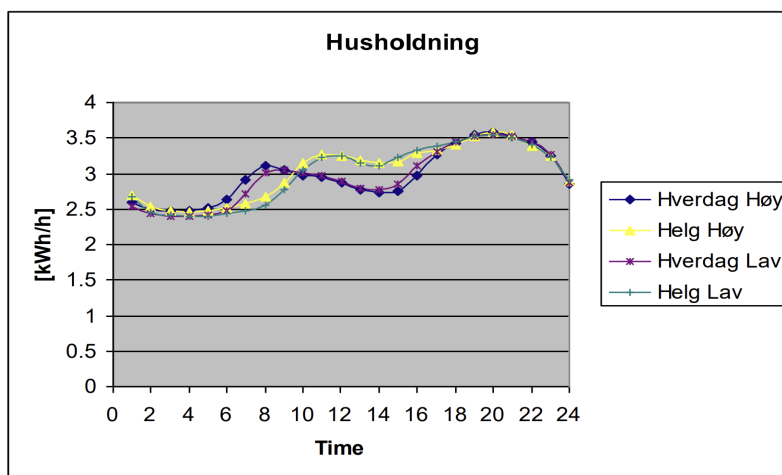


Figure 2: Høy og lav effektkurve for en husholdning gjennom en hverdag og helg (Norheim 2022. Punktum et desimalskille.

)

Typisk lastprofil for kontorer og skoler er representert i Figur 3, det er stor aktivitet i tidsrommet mellom klokken 08:00 til 16:00 i hverdagen. Den høye belastningen kan forklares med menneskene er på jobb eller skole og drar hjem etter 16:00. I helgen er det betydelig mindre aktivitet grunnet at det ikke er en arbeidsdag. Lasten om natten og i helgene går til oppvarming for vedlikehold. (Norheim 2022)

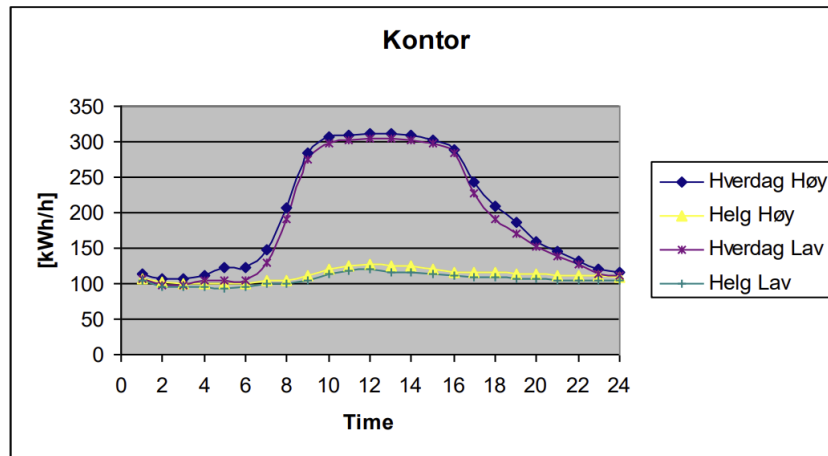


Figure 3: Høy og lav effektkurve for et kontorbygg gjennom en hverdag og helg (Norheim 2022)

Lastprofilene i Figur 2 og 3 er generelle representasjoner av energibehovet til den gjennomsnittlige husholdning og kontorbygg. Effekt- og energitopper er en utfordring for bedriftene som selger energien fordi det kan føre til overbelastning av kabler og transformatorer i nettet og/eller i verste scenarioer skape høyt spenningsfall over kablene. Bedrifter bruker strategier som peak shaving for glatte ut effekttopper. For å unngå effekttoppene vil bedriften enten implementere teknologi, programmer eller regelverk. Eksempler bedriften kan bruke for å lette opp på strømnettverket er energilager, smartladere og strømpriser. Den andre metoden går ut på å integrere andre energikilder på lokalt nivå for å lette nettverket. (Gridx 2024; *The increasing importance of demand-side flexibility – gridX* 2024)

2.6 Fotovoltaisk system

Fotovoltaisk eller “photovoltaic” (PV) solceller er et apparat som konverterer sollys til elektrisk energi. En PV-celle er laget av to eller flere tynne lag av halvledere og oftest er halvlederne laget av silisium. PV-celler generer strøm av at solstråler treffer overflaten av cellen der fotonet blir absorbert av silisiumatomene i cellen, dette fører til frigjøring av elektroner i valensbåndet. De frigjorte elektronene faller i lederbåndet av ledningsmaterialet i solcellen og brukes til å drifte elektriske materialer eller lade batterier. (Kalogirou 2014)

Det er forskjellige fotovoltaiske celler som er tilgjengelig i dag. De to mest utbredte typene PV-celler er krystallinsk som tilsvarer 80 % av markedet. Den andre er tynn-film og er rundt 20 % av markedet. Krystallinsk og tynn-film PV-celler har sine styrker og svakheter som gjør dem attraktive i forskjellige applikasjoner. Krystallinske celler er mer effektive i høye effektforsyninger per areal imens tynn-film har billig produksjon og effektiv i forhold til sin maksimale effekt og opererer bedre i høye temperaturer. En ulempe med krystallinske celler er at virkningsgraden synker 0,4-0,5 %/°C når uteklima øker fra 20 °C. (Kalogirou 2014)

Krystallinsk fotovoltaisk celle fordeles videre inn i monokrystallinsk og multikrystallinsk. Monokrystallinsk PV-celle betyr at materialet er satt opp av bare Si-krystaller og tilnærmet ingen defekter i krystallstrukturen. Styrken til monokrystallinske celler er deres virkningsgrad som ligger mellom 14-15 % og de dyreste er på 20 %. Ulempen med monokrystallinske celler er deres kompliserte produksjon og dermed dyre kostanden. (Kalogirou 2014)

Multikrystallinske silikon celler er den andre typen av krystallinsk fotovoltaisk celle. Den blir produsert av å bruke mange monokrystallinske silisiumkrystaller. Multikrystallinske er billigere å produsere sammenlignet med monokrystallinske grunnet at de er lette å lage. På den andre siden har multikrystallinske lavere virkningsgrad sammenlignet med monokrystallinske celler, på 13-15 % og 17 % på det høyeste. (Kalogirou 2014)

2.7 Fjernvarme

Fjernvarme er et sentralvarmeanlegg som unytter overskudd av varme produsert fra lokale ressurser. Eksempler på lokale ressurser er biobrensel, avfall og spillvarme fra industri. Overskuddsenergien hadde ellers blitt tapt til omgivelsene. Hensikten er å forsyne en bydel eller flere bygg med energi til varmt tappevann, oppvarming eller industrielle prosesser. (*Fjernvarme* 2024; *Fjernvarme — Statkraft* 2024)

2.8 Varmepumpe

Varmepumpe er en elektrisk maskin som transporterer termisk energi fra et kaldt varmereservoar til et varmt. Hensikten med en varmpumpe er å opprettholde temperaturen i en bolig eller annen bygg over omgivelsestemperaturen. I industri blir varmpumper brukt for å sørge for varmeoverføring i prosesser der det er et behov for forhøyede temperaturer (Moran 2021). En ideell syklus består av fire ledd. Først er det en isentropisk kompresjon og deretter isobar nedkjøling, etter denne kommer en isentalpisk ekspansjon og til slutt en isobar oppvarming. Varmepumper er et populært og miljøvennlig alternativ for å varme opp hus og bygg.

Ligning 6 presenterer den reelle COP-faktoren til varmpumpen der Q_H er den termiske energien avgitt til det varme reservoaret og W_{netto} er netto elektrisk arbeid utført som i varmpumpens tilfelle tilsvarer arbeidet utført av kompressoren. COP-faktor viser hvor mye varme som blir produsert per elektrisk arbeid inn i systemet. Ved å reversere prosessen blir varmpumpen om til et kjøleanlegg som kan slik at den også kan kjøle ned rom ved behov. (Hofstad 2024)

$$COP_H = \frac{Q_H}{W_{netto}} \quad (6)$$

2.9 Statistiske og beregnings metoder

Lineær regresjon baseres på gitte datapunkter og vil gi en linje eller plan som estimat for et datasett. En høy korrelasjon i datapunktene vil gi mer presis regresjon. Videre er minste kvadratiske metode en estimering som regnes ut ved å kvadrere differansen mellom datapunktene og regresjonslinja for så å summere de. (Statistikk 2024; TMA4240 2024)

Kubisk interpolasjon er en splinefunksjon i tredje orden. Splinefunksjon brukes i numeriske analyser til å estimere en glatt plan eller linje basert på oppgitte datapunkter (Holden and Dick 2023). Metoden er relevant når det er nødvendig å finne en funksjon i et sett med datapunkter for å kunne tilnærme verdier. Kubisk interpolasjon er effektiv til å lage jevne og kontinuerlige funksjoner basert på kjente verdier. Metoden konstruerer kubiske polynomer for hvert intervall imellom datapunktene. Alle skjæringspunktene er kontinuerlige for både første og ander deriverte (Holden and Dick 2023). Kubisk interpolasjon brukes ofte på eksperimentelle datapunkter.

Determinasjonskoeffisient eller R^2 , er en statistisk metode som brukes til å sammenligne regresjon- og interpolasjonsmodeller for å finne mest presise modellen i forhold til faktiske data. Metoden viser hvor presis variansen til modellen passer til den totale variasjonen til dataene. En R^2 -verdi på 1,0 indikerer at modellen forklarer all varians i den avhengige variabelen. På den andre siden betyr en R^2 -verdi på 0,0 at modell ikke forklarer variansen i den avhengige variabelen (Løvås 2021). Selv om en modell har en høy R^2 -verdi kan den være overtilpasset eller undertilpasset data. I scenarier der modellen er overtilpasset eller undertilpasset er det lurt å vurdere R^2 -verdien med andre evalueringer av modellen, som for eksempel residualanalyse og kryss validering. (Hawkins 2004)

3 Systembeskrivelse

ZEB-laboratoriet består av flere forskjellige komponenter og systemer. Denne delen av rapporten vil beskrive hvordan ZEB-laboratoriets systemer og komponenter fungerer og operer sammen. Hovedfokuset til oppgaven vil være å se på det varmefordelingsnettverket til ZEB-laboratorium.

3.1 Energisystem

ZEB-laboratoriet har tilgang på ekstern infrastruktur og interne midler. Den eksterne infrastrukturen er fjernvarme og strømmnettverket i tillegg til tilgjengelig informasjon som værforhold og strømpriser. De relevante interne midlene ZEB-laboratorium har er solceller, varmepumper og et termisk energilagret. Det termiske energilagret er et latent varmelager, også kalt “latent heat storage” (LHS). I Figur 4 er sammenhengen mellom disse skissert i en forenklet modell. Figuren er inspirert av SINTEFs egne skisser (SINTEF 2024). Solcellene har mulighet til å levere strøm til bygget og til strømmnettverket. Strømmen fra nettverket kan også forsyne bygningen. Strømmen levert til bygget kan bli brukt på varmepumpen deretter kan den varme opp bygget eller energilagret. Energilageret og fjernvarmen benytter kun termisk energi, mens strømmnettverket og PV panelene kun bruker strøm. Varmepumpen og generelle behov i ZEB-laboratorium krever både strøm og varme. Kontrollsenteret i Figuren er lokalisert på NTNU Gløshaugen campus. (SINTEF 2024)

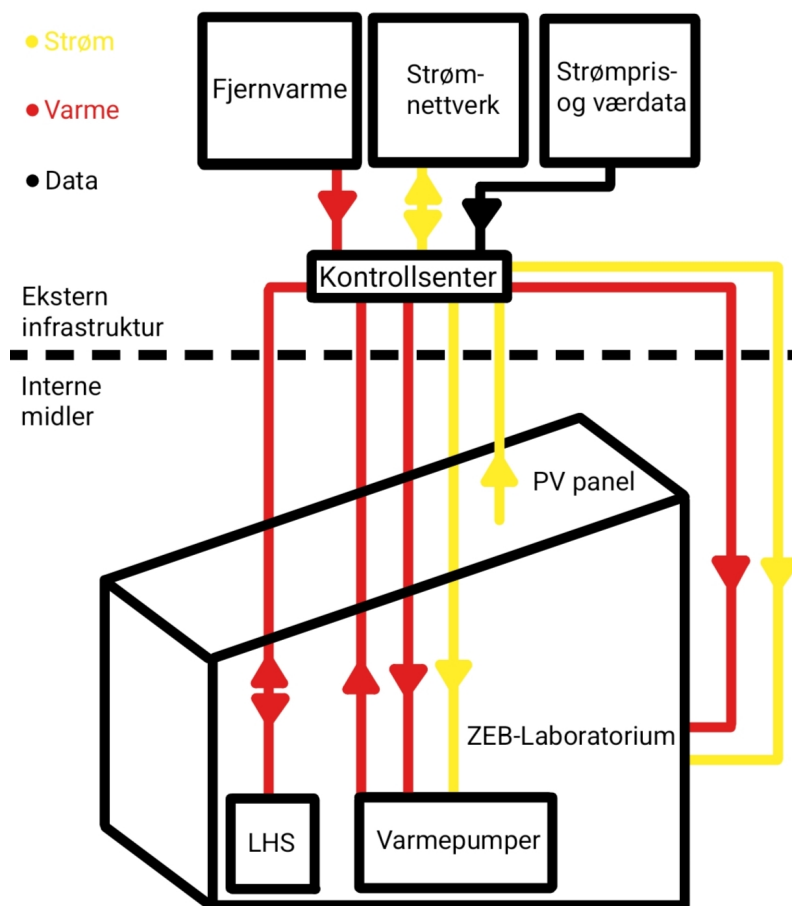


Figure 4: Forenkling av energisystemet til ZEB-laboratoriet. (SINTEF 2024)

3.2 Oppvarmingssystemet

Distribusjonssystemet for ZEB-laboratoriet er satt sammen av to luft til luft varmpumper, varme ventilasjonsanlegg, et fjernvarmeanlegg, en akkumulator, et latent energilager, radiatorer for hver etasje og 800 L NU001 der “NU” betyr at det er en vanntank uten trykk (Statsbygg 2011). Dette blir illustrert i Figur 5, som er en simplifisert skisse av SINTEFs varme og sanitær skjema, SINTEFs skisse kan bli funnet i Vedlegg D.1. Varmepumpene bruker kjølemiddel R-290 med maks effekt på 16 kW hver. Fra februar 2024 ble varmpumpene erstattet med to nye varmpumper med høyere COP-faktor. I tillegg brukes det en mindre varmpumpe for kjøling og den har en maks effekt på 14 kW. I teorien skal bygningens maksimale effektive behov være 26 kW. Basert på Influxdatabasen (InfluxDB) sikter bygget generelt på en innetemperatur mellom 21 og 23 °C under arbeids tid og en innetemperatur mellom 15 og 17 °C. (Nocente et al. 2021)

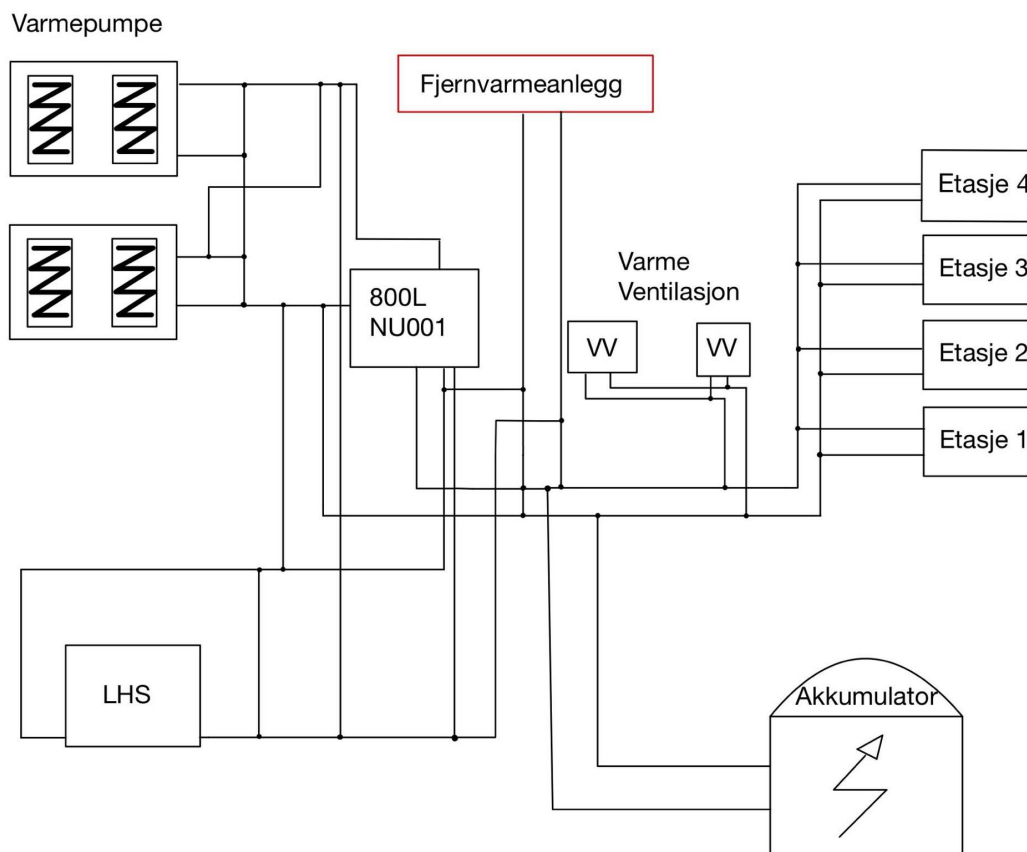
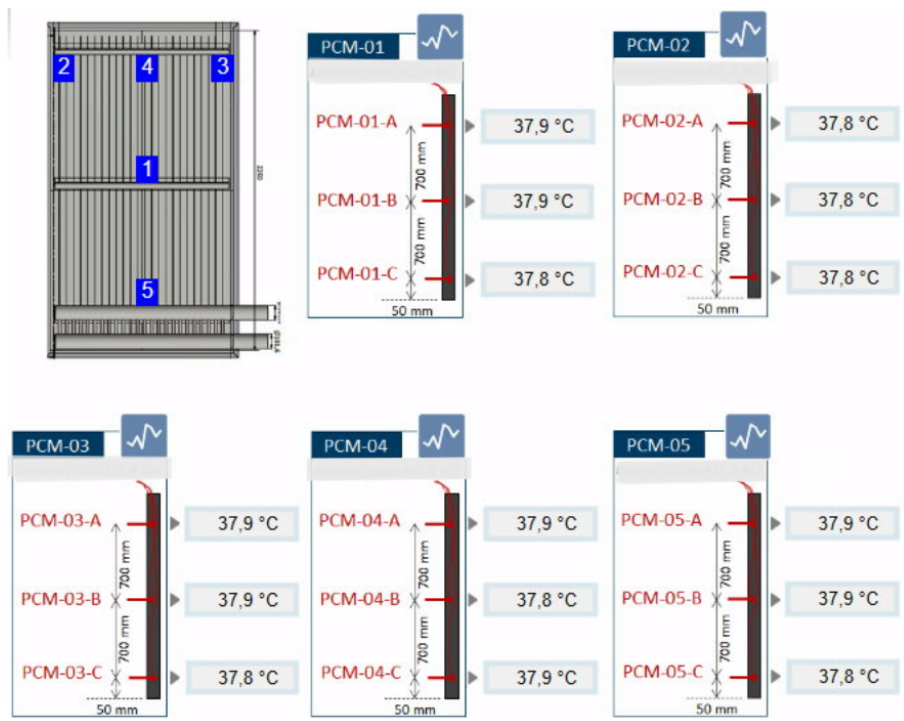


Figure 5: Det totale oppvarmingssystemet til ZEB-laboratoriet simplifisert til de relevante komponentene og knutepunktene.

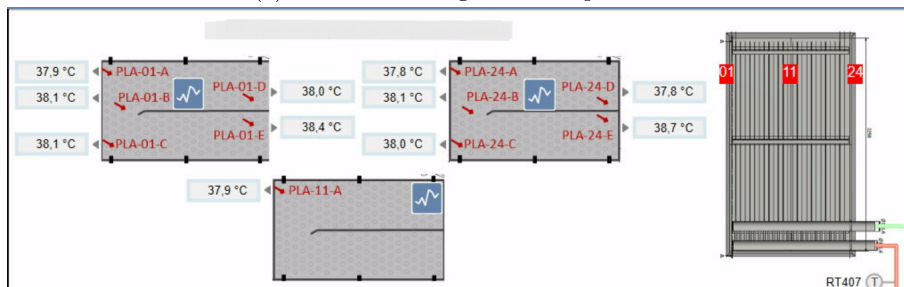
3.3 Energilageret

Oppvarmingssystemet har implementert et fase endrende material for energilagring. Hensikten med energilageret er å glatte effekttoppene på oppvarmingen. Dette er spesielt viktig når oppvarmingen baserer seg på varmpumpene. Energilageret kan lagre opp til 196 kWh. Det latente energilageret er en isolert tank med størrelsen 4,725 m³, med dimensjoner på 1,5, 1,4 og 2,25 m som er høyde, bredde og lengde henholdsvis. Det er 24 metall plater i biovoksen. Vannet er mediet som blir sendt gjennom disse platene. Vannet har en spesifikk varmekapasitet på 4,184 J/(kg · K) og benyttes til å lede varme inn og ut av energilageret. Det fase endrene materialet i energilageret er en organisk biovoks, se Tabell 1 for relevante egenskaper. Med (Helseth 2024; Nocente et al. 2021; Sintef 2024a)

Figur 6 viser innsiden av energilageret. Det er to rør, et som leder turvannet og det andre som leder returvannet. Det er 24 plater i energilageret som går vertikalt i energilageret, dette er illustrert i Figur 6a. I tillegg er det stålstenger som krysser horisontalt gjennom platene som er illustrert i Figur 6b som sirkler. I Figur 6b er ruten til vannet gjennom platen illustrert. Turvannet starter inn i en plate på bunnen gjennom punkt E, for så å passere gjennom C, B og A. Den forlater platen ut punkt D og blir da målt som returvann.



(a) Termiske målinger mellom platene.



(b) Termiske målingene på platene.

Figure 6: Figurene viser innsiden av energilageret med temperaturmålinger på platene og mellom platene.

Punktene 1, 2, 3, 4 og 5 i Figur 6a viser temperatur målerne mellom de forskjellige platene. Punkt 2 tilsvarer målinger mellom plate 1 og 2 også illustrert som PCM-02 punktene 1, 4 og 5 er mellom plate 11 og 12. Punkt 5 er ved inngangen og utgangen av vannet som strømmer inn for å veksle varme med biovoksen. Punkt 5 tilsvarer PCM-05. Punkt 1 er midt i strømmingen mellom platene 11 og 12, punkt 4 er lengst inn i energilageret mellom plate 11 og 12. Punkt 3 måler temperaturen mellom platene 23 og 24.

Figur 6b illustrerer temperaturmålinger på plate 1, 11 og 24. Det er fem temperaturmålere på plate 1 og 24 der inngangstemperaturen er PLA-01-E for plate en og utgangstemperaturen PLA-01-D for plate 1. PLA-24 representerer plate 24 der E er inngangs- og D er utgangsmålinger. Plate 11 har et målingspunkt PLA-11-A som er plassert der vannet først returner til utgangsrøret. Figur 6 ble levert fra eksternt veileder Thomas Elvrum Lassen.

3.4 Biovoksen

ZEB-laboratoriet latente energilager er en organisk PCM. Det er en biovoks med navnet CT37. Den ble valgt grunnet CT37s passende smeltepunkt for oppvarming av kontorbygg. Tabell 1 er en oppsummering av alle relevante egenskaper CT37 biovoksen har i forhold til oppgaven. (Sevault, Böhmer et al. 2019)

Table 1: Testet for verdier av CrodaTherm 37 som er biovoksen i energilageret på ZEB-laboratoriet (Sevault and Næss 2020).

Egenskap	Verdi	Enhet
Smeltepunkt	35-39	°C
Størknepunkt	32,5-35,5	°C
Nedbrytningstemperatur	>50	°C
Faseovergangs energi	198,6	kJ/kg
Termisk konduktivitet	0,24	W/(m · K)
Spesifikk varmekapasitet	2,3 (solid), 1,4 (liquid)	kJ/(kg · K)

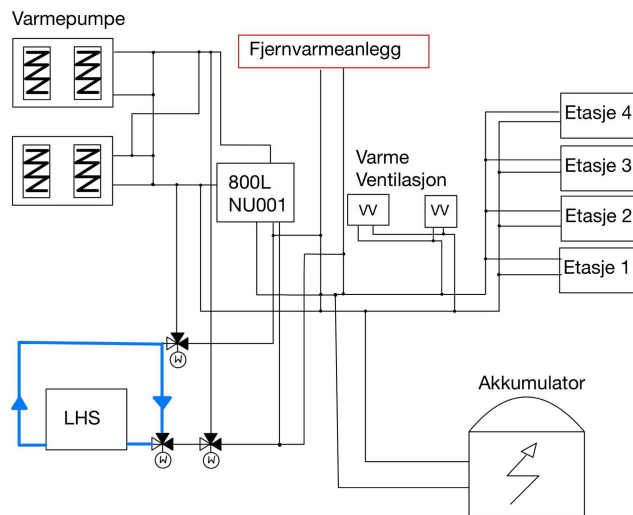
3.5 Modus

Energilageret har blitt designet med flere moduser til å samhandle med oppvarmingssystemet og behovet til bygningen. Den kan bytte mellom fem forskjellige moduser. Modus en er *normal mode*, modus to er *oppladning med varmpumpe*, modus tre er *Oppladning fra fjernvarme*, modus fire er *Utladning til bygget* og modus fem er *Støtteapparat til varmpumpen*. Figur 7 og 8 er uthevinger av Figur 5 for å vise vannløpet til tur- og returvannet for alle modusene. Ventilene vil bare illustreres i relevante knutepunkter i Figur 7 og 8 for å gjøre de oversiktlige. Ventilene har komponentkoden "SB" som betyr at de regulerer vannløpet (Statsbygg 2011). Dersom ventilen er mørk er den stengt og dersom den er blank vil den kunne la vannet passere. Ventilen er illustrert i Vedlegg D.2 for tydeligere oppklaring.

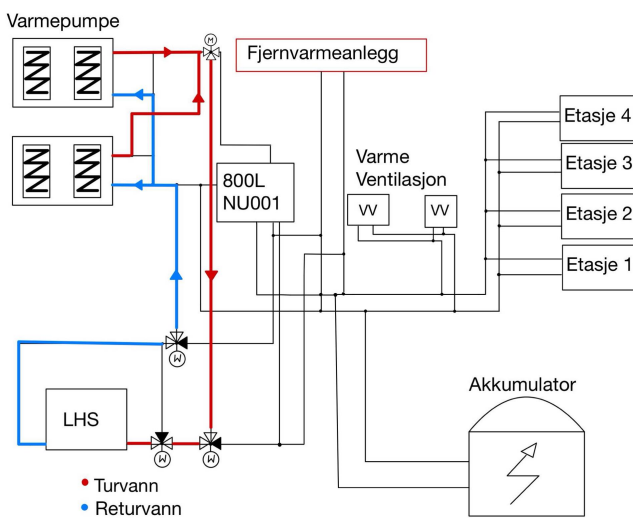
Normal modus er en innstilling systemet har dersom energilageret skal kobles av og at den ikke er involvert i oppvarmingen, som illustrert i Figur 7a. Dette skjer gjennom å stenge ventilene ut av energilagerets egne rør og vannet ender opp med å gå i rundgang. Normal modus brukes i situasjoner som omstart og bruk av forskningsceller.

Modus to er oppladning av energilageret gjennom varmpumper. Figur 7b er en illustrasjon av oppladning av energilageret der vannløpet starter ved lageret og går til varmpumpen. Den røde linjen er turvannet og den blå er returvann. En ventil ved varmpumpen åpner slik at noe av varmtvannet fra varmpumpen går til energilageret i stedet for direkte til oppvarming av etasjene og ventilasjonsanlegget. Det avkjølte vannet som forlater energilageret drar til varmpumpen for videre oppvarming.

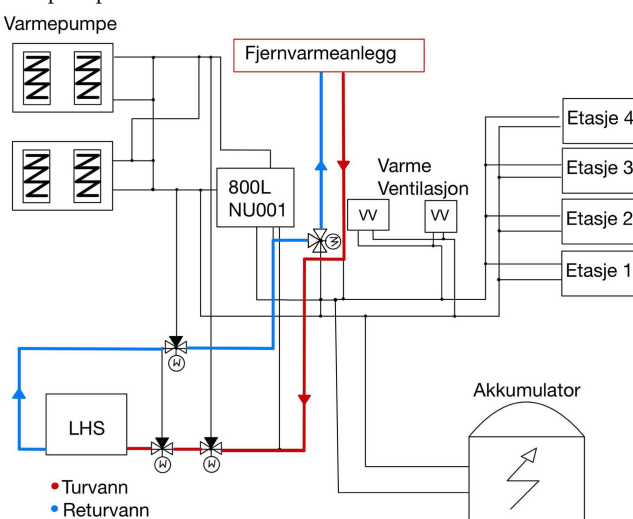
Modus tre er oppladning av energilageret ved bruk av fjernvarme. I scenarioer der ZEB-laboratoriet ikke kan være selvforsynende eller at det ikke er lønnsomt på grunn av høye strømpriser kan de signalisere til NTNU campus for tilgang på fjernvarme. Figur 7c illustrerer oppladning av lageret. Varmeoverføringen i modus tre skjer med en varmeveksler. Energilageret sender returvannet bort til varmeveksleren slik at den blir oppvarmet av varmtvannet fra fjernvarmen. Turvannet kommer tilbake til lageret og avgir varme til biovoksen.



(a) Energilageret operer i modus en, Normal modus. Her benyttes den ikke til å utlade eller opplade.



(b) Energilageret operer i modus to, oppladning fra varmpumpe.

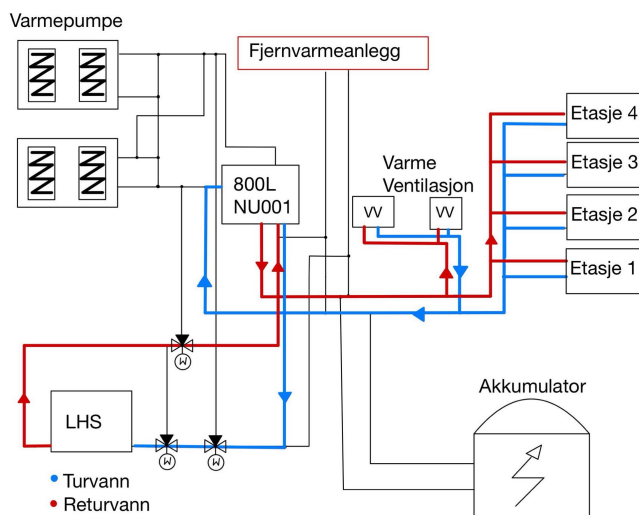


(c) Energilageret operer i modus tre, oppladning fra fjernvarme.

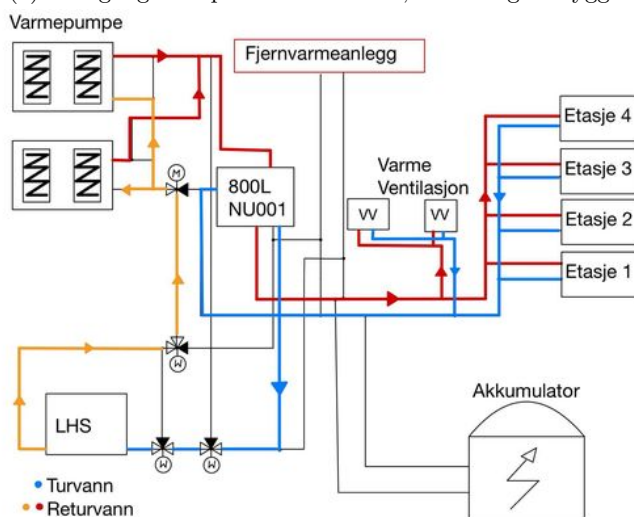
Figure 7: Forenklet skisser av oppvarmingssystemet som viser oppladnings modusene til energilageret og dens ikke aktive modus.

Modus fire er en av to moduser for utladning fra energilageret. Figur 8a er en illustrasjon som viser vannløpet der lageret direkte varmer opp bygget gjennom dets radiatorer og ventilasjonsanlegget. Ventiler åpnes slik at vannet som har avgitt varme til bygget blir sendt til energilageret for oppvarming og blir returnert til bygget igjen for å avgi varme.

Modus fem er andre innstillingen for utladningen til oppvarmingssystemet. I modus fem operer energilageret som et støtteapparat for varmepumpen istedenfor direkte oppvarming. Oppvarmet vann fra lageret går direkte til varmepumpen for å bli oppvarmet igjen slik at varmepumpen kan bruke mindre elektrisitet til å varme opp vannet til ønsket temperatur. Modus fem er relevant i scenarier der det er aktuelt å redusere det elektriske forbruket til varmepumpen som for eksempel kalde dager på vinteren. Figur 8b er en illustrasjon av modus fem. Den uthevede oransje linjen er oppvarmet vann fra energilageret som skal varmes opp igjen i varmepumpen.



(a) Energilageret operer i modus fire, utladning til bygget.



(b) Energilageret er i modus fem og er et støtteapparat til varmepumpen.

Figure 8: Forenklet skisser av oppvarmingssystemet som viser utladnings modusene til energilageret og dens ikke aktive modus.

3.6 Solcellepaneler

Solcellepanelene på ZEB-laboratoriet blir fordelt inn i seks grupper. Disse gruppene er tak, nordlige fasade, østlige fasade, sørlig fasade, vestlig fasade og pergola. For å optimaliser strømproduksjonen er taket vinklet 30° mot sør. Den sørlige fasaden har en rute mønsteret panel der halve er opak og den andre er semi-transparent. Semi-transparent er to solpaneler satt sammen rygg til rygg, dermed kan solcellene fange det reflektert lyset. Totalt er det 701 paneler på bygget, taket utgjør $456 m^2$, mens paragolaen og façadene utgjør $507 m^2$. Dermed er det $963,4 m^2$ brukt til strømproduksjon. Typen solcelle er fotovoltaisk mono-SI. Teoretiske maks effekt topp er på $181 kWp$ imens høyeste målte effekttopp er på $120 kW$. Det er installert tre DC/AC - omformere til å føre strømmen til strømnettet og bygget. Solcellepanelene har en levetid på 30 år og må dermed erstattes før prosjektet er over. (Sintef 2024a)

Table 2: Tabellen presenter solcellepanelene sin posisjon type nominell effekt og areal (Sintef 2024a).

Plassering	Nominell effekt [kWp]	Areal m^2
Roof(30°)	98	456,3
Northern façade	11,25	53
Eastern façade	24,47	156,2
Southern façade	22,36	144,2
Western façade	12,365	79,6
Pergola	7,875 + 4,83	37,1 + 37

3.7 scenarioene

Det skal testes for fem relevante scenarier på energilagingsbruk og hvordan dette påvirker systemet. Tidsperioden for historiske data er 01.01.2023 til 31.03.2024. Det første scenarioet er basert på den historiske dataen til SINTEF på ZEB-laboratoriet. Dette innebærer all deres elektrisk energibehov inkludert oppvarmingsbehov, solproduksjon og bruken av energilageret. Mer spesifikt har den i store deler av denne perioden ikke hatt noen spesielle rammer. Fra eksterne veiledere har det kommet fram at den heller operer på en av/på basis. Et unntak til dette er mars i 2023 og andre tider utover den bestemte tidsperioden. Der har den blitt brukt ved å opplading sol overskudd og utlade når solproduksjonen ikke er tilstrekkelig lenger. Energilagret har derimot fortsatt ikke konkrete rammer.

Det andre scenarioet er at energilageret kun skal drives på solenergi. All oppladet energi er fra solcellens overskuddsenergi. Det neste scenarioet er fullt bestående av nattlading. I dette scenarioet vil all opplading være uavhengig av solproduksjon og heller kun avhengig av energinivå og tid på døgnet.

Det fjerde scenarioet er en kombinasjon av nattlading og lagring av overskuddsenergi fra sol. I dette scenarioet vil opplading av solenergi alltid være prioritert ovenfor andre mulige valg. Det siste scenarioet baseres kun på effekt topper og å flate ut effekt topper. Det femte scenarioet er dermed et peak shaving løsning.

4 Metode

I denne delen av rapporten vil metodene brukt til utregninger bli forklart og presentert. Metode delen vil bli delt inn i fem deler. Alt fra antagelser brukt gjennom prosessen, litteratur analyse og hvordan tallene ble beregnet. Det vil være en del som beskriver beregninger gjort på ZEB-laboratoriets behov og ressurser. Videre beskrives hvordan rammeverket for energilageret ble fastsatt og til slutt et sammensatt system del for simulering av de forskjellige scenarioene.

Python var hovedverktøy for beregningene gjennomført på den historiske dataen. For innhenting av data og diverse beregner ble pandas importert og datasettene ble bearbeidet som et "DataFrame". For simulasjoner av energilageret gjennom tidsperioden ble "dictionary" i Python brukt. Python ble også brukt til visualisering av resultater ved hjelp av grafer. I grafene vil et desimaltall bli vist med punktum som desimalskille siden dette er innebygd i programmet. Begrensninger satt for den historiske dataen var at tidsperioden skulle være fra 01.01.2023 til 31.03.2024. I tillegg til denne begrensningen ble det også bestemt at time for time data skulle bli brukt på generell basis, unntak blir nevnt etter hvert som de er relevante. Time for time verdiene ble internt beregnet i databasen som gjennomsnittlige verdier. Alle målingene er hentet fra SINTEF's influx database. Grunnen til at time for time data ble valgt er grunnet manglende data i minutt for minutt målinger.

4.1 Litteratur analyse

I teoridelen og systembeskrivelsesdelen ble artikler, fagbøker og kompendier brukt for å danne det teoretiske grunnlaget. Teoridelen av oppgaven basere seg på fagboken "Heat and Mass Transfer – Fundamentals and Applications" som er pensumbok på NTNU og skrevet av to professorer i ingeniørfaget Yunus Çengel og Afshin J. Ghajar. Videre har teorien rundt energilagring brukt fagboken "ENGINEERING ENERGY STORAGE" av Odne Stokke Burheim som er Professor på NTNU. Klassisk lastprofiler baserer seg på kompendiet "Kompendium Elektriske energisystemdelen i emnet FENG2001 Elektriske energisystem og fjernvarme" skrevet av Førsteamanuensis Ian Nordheim. For å bygge den matematiske og statistiske grunnlaget for teorien ble boka "Statstikk FOR UNIVERISTETER OG HØGSKOLER 4.UTAGVE" som er pensumbok brukt på NTNU. Den siste fagboken brukt for teorien var "Moran's PRINCIPLES OF ENGINEERING THERMODYNAMICS SI VERSION" av Michael J. Moran.

Vitenskapelige artikler skrevet om ZEB-laboratoriet ble også brukt for teorien. Store deler av disse har blitt skrevet av Alexis Sevault. Alexis Sevault er forsker, CTO av Cartesian og sentral i begynnelsen av ZEB-lab prosjektet. I tillegg har energilagringdelen av teorien basert seg på artikler fra Jorge Salgado Beceiro som er ansatt på SINTEF og forskningsleder for energilagringens faglaget. Disse er begge to eksterne veiledere for bacheloroppgaven.

I tillegg har nettartikler som store norske leksikon og "Grid x" blitt brukt. Store norske leksikon har blitt brukt i sammenhenger der det var behov for kort og presise forklaringer. For "Grid x" var en kort og konsis forklaring av peak shaving nødvendig.

I systembeskrivelse og resultatet har ressurser sendt fra Thomas Elvrum Lassen som er forskningsingeniør på SINTEF og aktiv del av ZEB-laboratoriet forskningen. Ressurser fått fra Thomas er InfluxDB og Grafana som lagret data fra oppvarmingssystemet. I tillegg ble ZEB-laboratoriets wiki side benyttet til å beskrive utstyrets egenskaper, antall og form.

For litteratur analysen i den metodiske delen ble beregninger og valg avgjort basert på relevant informasjon. Nettsider som NVE ble brukt for å sjekke når på døgnet strømpriser var gunstig og at en varmpumpe er et energieffektivt verktøy. Norsk strømmiks sitt utslipp ble hentet fra Ecoinvent v.3.5, mens utslippet fra Fjernvarme ble Statkrafts nettside, det samme gjelder prisene for fjernvarme. Entse-o "transparency plattform" ble brukt til Trondheims strømpriser.

4.2 Antagelser

For å kunne utføre beregningene på det levende laboratoriet ble det utført en rekke med antagelser. Antagelser som går overlappende med alle delene av utregningene er manglende datapunkter fra den historiske dataen. Det antas at denne ikke vil ramme helhets inntrykket som de forskjellige scenarioene gir bassert på sine månedlige og totale resultater.

Manglende datapunkter i tidsrammen kommer av to forskjellige årsaker. Den ene årsaken er at databasen mangler målinger for noen tidsperioder. Disse overlapper ikke alltid med hverandre og kan derfor lede til at en rekke med punkter mangler. Årsak to til at det er manglende datapunkter i settet er på grunn av noe som antas til å være feilmålinger. Disse vil gi utslag som ekstra høye verdier. Alle radene som er fjernet grunnet deres utslag på feilmålinger er presentert i Tabell 3. Resterende mangler vil bli presentert i resultat delen.

Table 3: Denne tabellen presenterer rader som ble fjernet fra datasettet grunnet deres feilmålinger.

Dato og tid	Energibalanse [kWh]
2023.01.23 09:00:00	-455
2023.02.08 16:00:00	-368
2023.02.15 19:00:00	-2220
2023.02.21 09:00:00	-683
2023.02.21 10:00:00	-1800
2023.03.13 05:00:00	-353
2023.03.13 06:00:00	-733
2023.03.13 08:00:00	-159
2023.05.08 04:00:00	-1820
2024.01.19 06:00:00	-128

Antagelser brukt for den dynamiske delen av oppgaven er at det er tilnærmet null varmetap fra energilageret og rørene. Det antas at all varmeveksling foregår internt i systemet og at det er stabil flyt. Spesifikt ble kun verdier der volumstrømmen var større en 4500 l/h benyttet. Dette er på grunn av at volumstrømmen til energilageret ligger i området av 4500 til 5000 l/h i de fleste tilfeller. I tillegg til dette ble alle verdier når effekten inn og ut av energi lageret var tilnærmet 0 fjernet da disse muligens hadde sin egen sammenheng og ble dømt ikke relevant.

Gjennomsnittstemperaturen i energilageret antas å være tilnærmet konstant, dette er på grunn av de smale områdene som er separert av platene og at biovoksen generelt skal operere i tofaseområdet. Vannet kan avgi og hente konstant mengde med effekt fra energilageret til tross for tilstanden på voksen.

For simuleringen på scenarioene ble det antatt å være null varmetap gjennom veggene. Gjennomsnittstemperaturen på energilageret ble antatt å være representativ til den totale temperaturen. Virkningsgraden i opplading og utlading ble også antatt til å være 100 %. Ved oppladingen med varmpumpen ble COP faktor antatt til å ha en konstant verdi på 2,5 før den ble byttet ut og deretter 2,9 etter den ble byttet ut. Grunnet mangler i influxdatabasen antas det at kjøleanleggets COP faktor er lik varmpumpens COP faktor. COP faktoren for 2,9 gjelder kun fra 12.02.2024. Verdiene ble bestemt ved å finne medianen av COP faktoren fra historisk data mens den var i bruk, altså at den er større en 0. Verdien av medianen var nokså lik gjennomsnittene på 2,57 og 2,87. Disse verdiene ble beregnet med minutt for minutt verdier grunnet unøyaktigheter i verdier fra influxdatabasen i time for time verdiene. På varmpumpene antas det at de kan levere konstant effekt på 16 kW . Dette gjelder da begge to og summert er varmeeffekten på 32 kW .

4.3 ZEB-laboratoriet

For beregninger på systemet var hovedfokuset på solproduksjon og totalt energibehov som ble splittet inn i oppvarmingsbehov og det elektriske behovet utelukket oppvarming. Disse ble valgt ut grunnet deres relevans til å dekke energibehovet i bygget og slik at de nye løsningene fortsette å kunne opprettholde dette kravet.

Oppvarmingssystemet til ZEB-laboratoriet er skissert i Figur 5. Det er to input verdier for oppvarming til bygget. Disse er fjernvarmeanlegget og varmepumpene, alle de andre komponentene blir regulert av dem. Energilageret deltar i oppvarming. Med dette vil oppvarmingsbehovet til bygget være summen av fjernvarmen, varmepumpens termiske effekt i tillegg til varmen inn og ut av energilageret. Det er på grunn av at energilageret kan bare bli oppladet av disse komponentene. All varme som kommer inn i energilageret vil enten bli registeret som effekt ut av fjernvarmeanlegget eller varmepumpen. Dette tas hensyn til med å snu fortegn på effektflyten på energilageret da positiv verdier er definert som opplading og negativ verdi er definert som utlading.

For å finne det elektriske energibehovet utelukket oppvarming ble det totale energiforbruket fratrukket varmepumpenes arbeid. Videre har bygningen også et kjølebehov som ble ansett som et generelt elektrisk behov grunnet at energilageret ikke kan bidra til oppvarming.

Det siste som ble beregnet i denne delen var en generell energibalanse. Denne beregningen baseres på Figur 4. Det ble utført beregninger på det elektriske forbruket og produksjonen til ZEB-laboratoriet. Den generelle energibalansen til bygget ble beregnet ved differansen av energi produsert og energien brukt. Energibalansen ble derfor solproduksjon fratrukket totalt elektrisk forbruk utelukket oppvarming i tillegg til oppvarmingsbehovet som beregnet tidligere. Denne energibalansen representerer overskudd med solproduksjon når den er positiv og energibehov når den er negativ. Litt mer spesifikt er det fortsatt mulighet for soloverskudd når energibalansen er negativ da oppvarmingen kan bli tatt i stor del av varmepumpen som vil være mer energieffektiv. Dette vil bli forklart mer detaljert når det er relevant. Grunnet hvor sentral energibalansen blir til alle beregningene er det den som brukes for å fjerne uteliggere i Tabell 3.

4.4 PCM dynamikk

Ved beregninger på den dynamiske delen i energilageret ble den delt inn i to forskjellige deler. Den første delen var å lage en modell som kan hente ut verdier basert på effekten til energilageret. Den andre delen var å finne et konkret rammeverk som beskriver begrensningene på de historiske dataene, basert på modellen.

For å teste antagelsen om at temperaturen er jevnt fordelt i energilageret vil Biot-tallet bli beregnet. Denne blir beregnet med bruk av Ligning 3, der varmeovergangstallet blir beregnet med Ligning 1 og 2. Denne beregningen baseres også på noen av antagelsene som ble presentert tidligere. Dette vil kreve at platene holder samme temperatur som biovoksen og at all varmeoverføring skjer innad i systemet. Det blir tatt hensyn til at det er 24 plater og dermed ses det på et av disse områdene. Avstanden mellom platene ble antatt å være bredden på boksen delt på antall plater. Fra dette er resterende areal og volum beregnet med dimensjonene til energilageret.

For å finne modellen ble gjennomsnittstemperaturen på energilageret sammenlignet med energinivå. Med energinivået til energilageret menes den termisk lagrede energien i energilageret. Fra denne sammenligningen ble de forskjellige fasene inndelt basert på temperatur og energinivået. Det ble først tatt en antagelse på hvor de forskjellige fasene krysset hverandre for å dermed bruke regresjons analyse og konvergering. Endringen i krysningspunkt for energinivå og gjennomsnittstemperatur ble satt til $0,3 \text{ kWh}$ og slik ble vendepunktene bestemt. Disse regresjonsmodellene ble beregnet med funksjonen `LinearRegression()` fra biblioteket `sklearn.linear_model`. Fra dette kan energinivå beregnes, da denne ikke var tilstrekkelig for hele perioden. Det finnes en måler på InfluxDB som kan hente energinivået på energilageret, men denne ble dømt til å ha for få datapunkter til å lage en modell. Derfor ble regresjons analysne benyttet og det ble basert på temperatur.

Videre fra samtale med ekstern veileder Alexis Sevoult kom ideene frem å fremstille sammenhengen mellom effekten inn og ut av energilageret med energinivået og turtemperatur som en 3D-modell. For å lage disse modellene ble det brukt regresjonsanalyse og minste kvadratiske metode. Kubisk interpolering ble det andre alternative for å estimere en 3D-modell. Disse metodene ble valgt grunnet de har forskjellige framgangsmåter. Deretter sammenlignes R^2 for de to 3D-modellene.

For å analysere 3D-modellene ble funksjoner fra bibliotekene *numpy* og *scipy.interpolation* importert, funksjonene er henholdsvis *meshgrid* og *griddata*. *meshgrid* ble brukt til å lage 3D-feltet og *griddata* ble brukt til å interpolere. Videre ble vektorfelt presenter ved bruk av datapunkter fra minste kvadratiske metode. Til slutt ble metodenes R^2 verdier sammenlignet for videre diskutere deres presisjon av estimering.

Det spesifikke rammeverket ble funnet ved å vurdere modellene kritisk for hvor stor effekt den kunne avgi. Rammeverket ble funnet ved å teste verdier forskjellige effekter og deres temperatur differanse fra gjennomsnittstemperaturen. Med denne temperaturdifferansen vil det da kunne beregnes en oppladet eller utladet effekt. Dersom absoluttverdiene er større enn den teoretiske nødvendighet kunne den være tilstrekkelig. Videre ble analytiske ligninger utledet for minste kvadratiske metode og kubisk interpolasjon ved hjelp av Python. De analytiske ligningene ble et verktøy for å visualisere rammeverket og vurdere presisjonen til minste kvadratiske metode og kubisk interpolasjon.

4.5 Simulering av scenarioene

En simulasjon i Python for hele tidsperioden ble satt som utregningsmetode for de nye scenarioene. Denne simulasjonen hadde flere deler og begrensninger. Simulasjonen skal bruke energibalansen, energinivået og tiden på døgnet til å kunne bestemme om den skal bli oppladet eller støtte oppvarmingsbehovet. Alle scenarioene som ble beskrevet tidligere vil få sin metode forklart her. Energinivåene til alle de nye scenarioene ble beregnet med bruk av energiflyten, altså oppladingen og utladingen, mens energinivået i den originale ble beregnet slik som beskrevet i dynamikk delen.

Felles for de fire nye scenarioene er når energilageret blir oppladet benyttes modus to, se Figur 7b. Grunnen til at opplading gjennom varmpumpen ble valgt er på grunn av et det er en mer energieffektiv løsning enn fjernvarme. For utlading gjelder modus fire, se Figur 8a. Grunnen til at utladingen direkte til radiatorer og ventilasjonen ble brukt er at energilageret skal kunne operere uavhengig av varmpumpen. Ellers har også alle de nye scenarioene til felles at de bruker rammeverket for opplading og utlading som blir funnet i dynamikkdelen.

Videre har tre av de nye scenarioene felles rekkefølge for energibruk. Dette er utelukket peak shaving og den originale. Rekkefølgen er overskuddsenergi fra solcellene til varmpumpene, deretter brukes energilageret, etter det benyttes varmpumpene med elektrisitet kjøpt fra strømmnettverket og til slutt dekker fjernvarme resterende oppvarmingsbehov. For alle tilfellene skal ikke energilageret falle utenfor sin teoretiske kapasitet 196 kWh.

Kombinasjon og solscenarioet hadde opplading av overskuddsenergien fra solcellene som prioritet under simulasjonen. Grunnen til dette var at det ikke vil medføre noen nye utslipp (Ghadikolaie 2021; Kalogirou 2014). For at den skal opplade overskuddsenergi måtte energibalansen være større enn null. Dette betyr i praksis at all elektrisk energi til oppvarming og annet allerede er dekket. Dersom det var mulig ble opplading satt til det maksimale som rammeverket fra dynamikkdelen tillater. Dersom overskuddet fra solenergien var mindre en den maksimale oppladingen ville oppladingen være lik overskuddsenergien fra solcellene.

Nattlading er relevant for både scenarioet som kun baserer seg på nattlading og for kombinasjonsscenarioet. Begrensningene for nattlading er at den kunne lade mellom klokken 18:00 og 06:00. Dersom klokken gikk forbi 04:00 uten at den hadde begynt en oppladings syklus ville den ikke lade den siste timen før klokken 06:00. Grunnen til at nattlading ble testet baseres på at strømprisen generelt er lavere om natten (Mjønerud 2024). I tillegg til dette vil ikke bygget ha et like stort energibehov om kvelden, se Figur 3. Under arbeidstid sikter ZEB-laboratoriet på en høyere innetemperatur enn på kvelden.

Videre ble andre krav satt for å hindre biovoksen i å gå utenfor tofaseområdet. Grunnen til at den skulle være størst mulig grad i tofase området er for å best mulig benytte den latente varmen som kan lagres der. Fordelen kommer av deres isoterme egenskap og at den gir en større energidensitet enn følbare varmelagring (Sharma and Sagara 2005). Dersom energinivået på energilageret gikk under grenser fra rammeverket i løpet av natten vil lageret bli oppladet den resterende perioden, ellers ville den fortsatt med utladingen. Dersom energinivået stiger forbi tofase området i løpet av natten vil den gå ut av modus to og inn i modus fire.

Videre blir metoden for er en generell utlading i simulasjonen beskrevet. Denne gjelder sol, natt og kombinasjonsscenarioet. Energilageret ville kun utlade dersom energinivået er mellom 5 kWh og 196 kWh . Det var ikke ønsket at den skulle lade helt ut grunnet for å unngå følbare varme i fast tilstand. Dersom biovoksen nærmer seg fast form vil en ny maksimal utlading bli fastsatt frem til den er oppladet forbi denne. Dette var på grunn av at det var ønskelig at energilageret skulle være i tofase område grunnet at temperaturen skal beholdes stabil og isotherm.

Det siste og minst prioriterte steget i simulasjonen som gjelder sol, natt og kombinasjonsscenarioet var utelukkende energilageret. Den ene måten dette kan skje på var dersom energinivået var på 196 kWh og energibalansen var større enn 0 kWh . Den andre var dersom energinivået var under 4 kWh mens klokken var mellom 06:00 og 18:00 på dagen og energibalansen var mindre enn 0 kWh . Dersom alle disse kriteriene er møtt vil energilageret gå inn i modus en, se Figur 7a. Fra her vil soloverskuddet være tilstrekkelig til å dekke alt energibehovet.

Peak shaving ble kalkulert separat fra de andre grunnet at den hadde unike rammer for simulasjonen, men ikke for dynamikken. For simulasjonen her ble forskjellige mål satt for når den skulle lade og ikke. Målet var at energilageret skulle flate ut oppvarmingskurven i den grad det var mulig. Den følger samme krav for maks utlading og opplading som de andre nye scenarioene.

For hver dag ble medianen for energibehov hentet fra datasettet. Medianen ble brukt til å glatte ut effekttoppene på resterende timer av dagen. Dersom oppvarmingsbehovet er større enn medianen vil energilageret utlades og flate kurven ved å redusere lasten. Dersom oppvarmingsbehovet var under medianen, vil energilageret bruke energioverskudd til å flate kurven og øke lasten. Ideelt vil lastprofilen se ut som en impulsfunksjon. Et eksempel på dette er at dersom medianen måles til 14 kWh og oppvarmingsbehovet er 12 kWh vil energilageret bli oppladet med 2 kWh slik at det totale termiske energibruket til ZEB-laboratoriet er 14 kWh . Der dette scenarioet skilles mest fra de andre nye scenarioene er ved rekkefølgen i energibruk. I dette scenarioet vil energilageret dekke oppvarmingsbehovet først, deretter soloverskudd, den neste er strømmnettverket og til slutt fjernvarme.

For beregning av energinivået energilageret har til en hvert tid i simulasjonen ble opplading og utlading verdiene i varme benyttet. I tillegg til dette måtte også energilagerets energinivå forrige time bli plussert sammen med denne for å kunne ha en kumulativ effekt.

4.6 Økonomi og miljø

For å beregne den økonomiske påvirkningen av scenarioene må alle de forskjellige komponentene bli tatt i betraktning. Strømpriser for NO3 ble hentet fra entso-e “Transparency Platform”. For referanse er de fullstendige strømprisene lagt inn i Vedlegg A.1 (plattform 2024). Alle fjernvarme prisene ble hentet fra Statkraft og baseres på spottprisene for sine henholdsvis måneder. For referanse er prisene på fjernvarme lagt til i Vedlegg A.2 (Statkraft 2024).

De forskjellige delene som ble tatt hensyn til for økonomisk påvirkning var salg av overskuddsolenergi, det elektriske behovet utelukket oppvarming, kjøp av strøm til oppvarming med varmepumpe, fjernvarme og bruk av energilageret. Overskuddsolenergi er resterende mengde solenergi som ikke blir brukt til verken oppvarming med solceller eller til elektrisitet til bygget. Den totale varmen levert av varmepumpen ble funnet ved å ta de positive verdiene fra differansen mellom oppvarmingen og den maksimalt mulige oppvarmingen som varmepumpen kan levere. Den maksimalt mulig oppvarming som varmepumpe kan levere er 30 kWh minus oppladingen beregnet i simulasjonen. For effekten som varmepumpen trekker ble denne verdien beregnet med å dele alle verdiene på COP verdien.

Det som strømmnettverket må dekke er de resterende positive verdiene etter differansen mellom varmepumpens leverte energi og solproduksjonen etter annen elektrisk forbruk. Resterende mengde av oppvarmingen ble dekket av fjernvarme. Disse vil multipliseres med et datasett som inkluderer alle strømprisene. Unntaket er fjernvarme som vil ganges med sin egen prisliste. Den originale bruken av energilageret blir splittet opp slik at fjernvarmekostnadene inkluderes i energilagerets kostnader når den er regnet på separat fra de andre verdiene.

For utslipp ble de parameterne som var relevant for økonomisk påvirkningen brukt. Forskjellen ligger i at istedenfor at strømpris og fjernvarmepris ble utslipps faktorene per *kWh* benyttet. Verdiene som ble brukt er presentert i Tabell 4. (*Fjernvarmeanlegget i Trondheim — Statkraft Varme 2024*)

Table 4: Tabellen presenterer utslippet til de forskjellige energikildene koblet til ZEB-laboratoriet.

Ressurs	Utslipp [kg]	Kilde
Norskstrøm miks	0,016	“Impacts of electricity, high voltage/electricity, high voltage, production mix/NO/kWh” (v.3.5 ecoinvent)
Fjernvarme	0,0192	(<i>Fjernvarmeanlegget i Trondheim — Statkraft Varme 2024</i>)

5 Resultat

Denne delen vil bli splittet opp i fire deler. Den første delen er helhetlig informasjon relatert til ZEB-laboratoriets andre relevante komponenter og ytre påvirkninger. Videre er det presentasjon av funn til dynamikken til energilageret som vil lede til et fastsatt rammeverk. Deretter en sammensatt versjon av systemet og dynamikken. Til slutt vil økonomiske og miljømessige beregninger bli presentert sammen med andre diverse resultater.

5.1 Behov og ressurser

I denne delen vil de forskjellige behovene som ble funnet bli presentert. Først vil ZEB-laboratoriets originale energilager bruk bli presentert, se Figur 9. Figuren har seks forskjellige plot som representerer hver sin uke fra mandag til og med søndag i løpet av hele perioden fra 01.01.2023 til 31.03.2024. De er spredt med cirka tre måneder. De ble valgt grunnet deres få mangler på datapunkter og vil bli brukt som eksempel uker videre. Figurene i hele dette delkapittelet vil ha samme struktur som denne. Dette betyr at alle x-aksene er døgn og alle y-aksene energiflyten gitt med enhet kWh . Med energiflyt menes den målte energien inn og ut av energilageret.

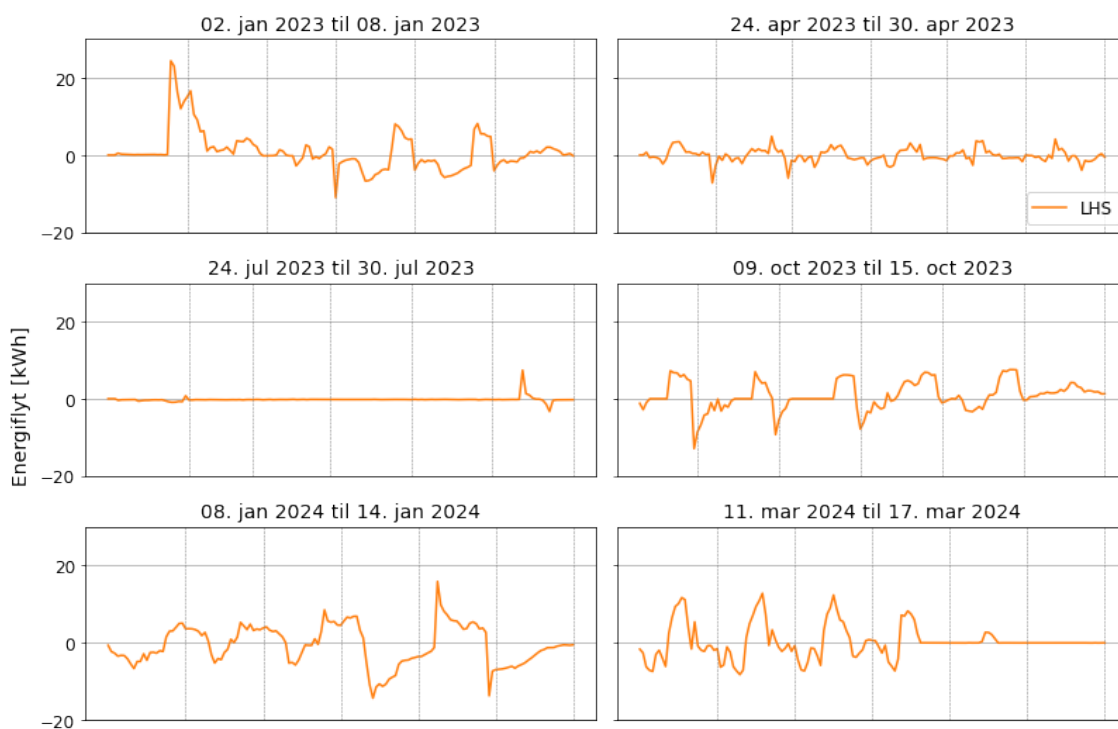


Figure 9: Den originale bruken av energilageret til ZEB-laboratoriet gjennom seks uker med cirka tre måneder skille.

Videre vil produksjonen av solenergi på ZEB-laboratoriet bli presentert, se Figur 10. Solcellene kan gi ZEB-laboratoriet et energioverskudd dersom det er større en energibehovet.

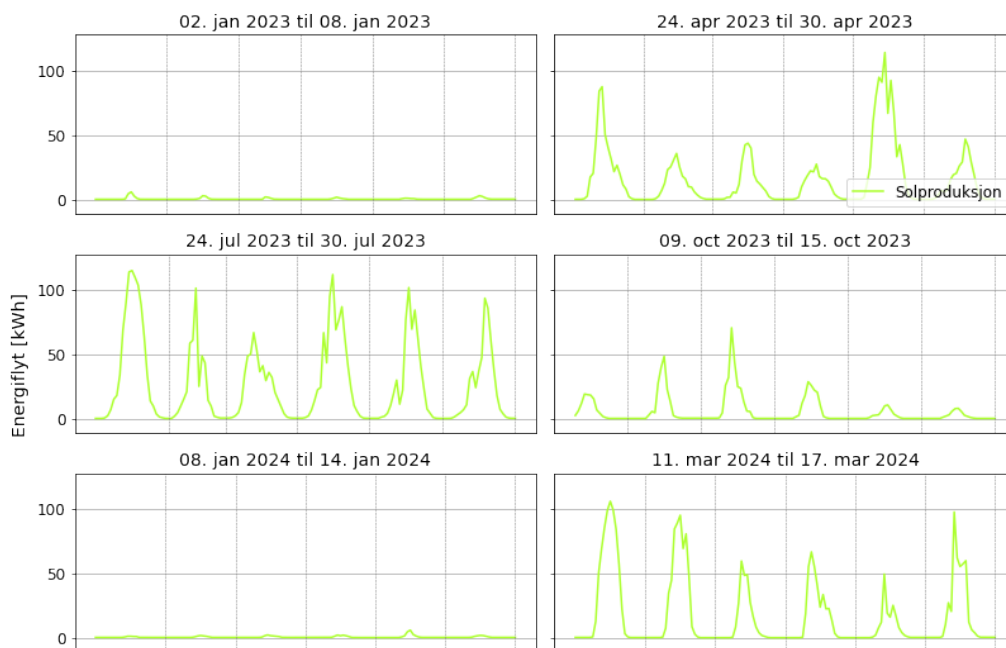


Figure 10: Solproduksjonen fra ZEB-laboratoriet gjennom seks uker med cirka tre måneder skille.

I Figur 11 er energiforbruket for oppvarming og annen elektrisk forbruk presentert. Oppvarmingen og det elektriske forbruket er de som ble beskrevet i metodedelen. Sammen utgjør disse den totale lastprofilen til bygget.

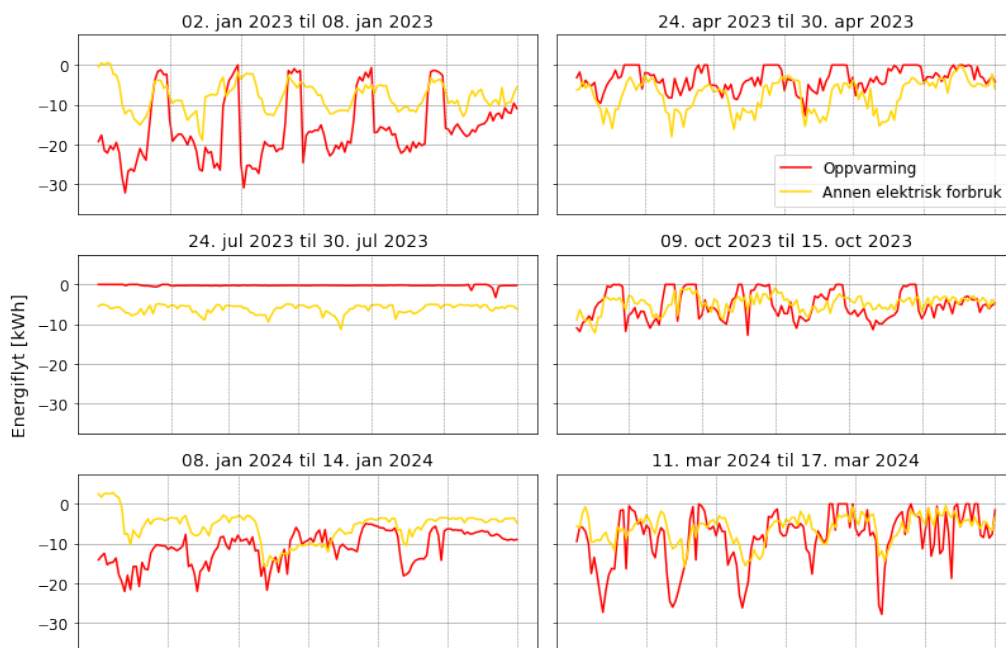


Figure 11: Lastprofilen for oppvarming og annen elektrisk energibehov til ZEB-laboratoriet gjennom seks uker med cirka tre måneder skille.

Den siste relevante figuren fra denne delen av rapporten er kombinasjonen av Figur 9, 11 og 10. Denne kombinasjonen utgjør den totale energibalansen til bygget. Figur 12 presenterer energibalansen til ZEB-laboratoriet

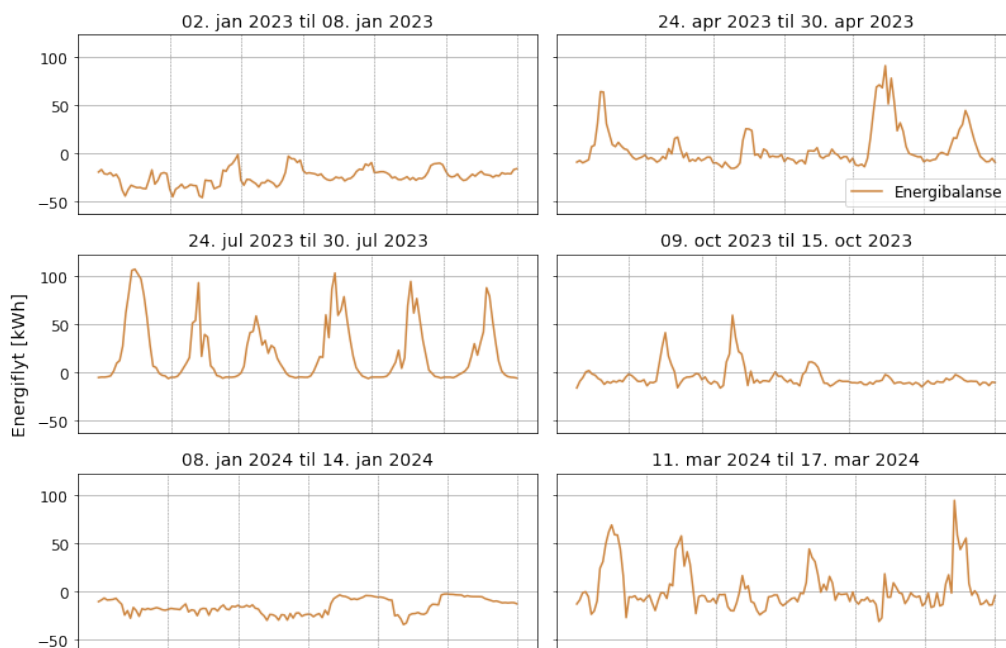


Figure 12: Energibalanse til ZEB-laboratoriet gjennom seks uker med cirka tre måneder skille.

5.2 PCM dynamikk

I denne delen av resultatkapittelet vil resultater fra PCM dynamikken bli presentert. Dette innebærer sammenhengene mellom opptreden og egenskapene PCM har knyttet til effekt, energi, lagringsevne, turtemperatur og gjennomsnittstemperaturen til energilageret.

I Figur 13 vises sammenhengen mellom energinivået til energilageret mot gjennomsnittstemperaturen til energilageret. Basert på informasjonen fra Tabell 1 og teoridelen ble Figur 13 til for å vise den latente varmelagringen i energilageret. I figurene står x-aksen for gjennomsnittstemperaturen i $^{\circ}\text{C}$ og y-aksen er energinivået til energilageret i enheten kWh . Imellom $32,8$ og $37,3$ $^{\circ}\text{C}$ befinner energilageret seg i strøken form, $37,3$ til $38,4$ $^{\circ}\text{C}$ er den i overgangstilstand mellom fast og flytende, mens mellom $38,4$ og $42,7$ $^{\circ}\text{C}$ er den i flytende form.

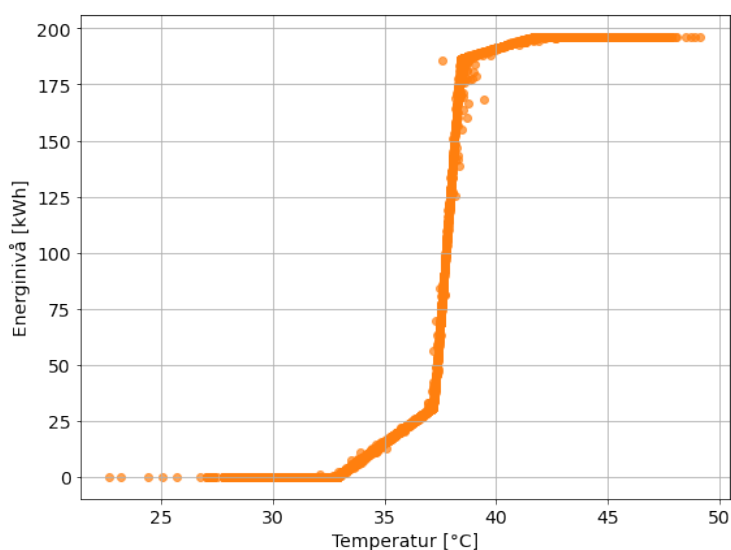


Figure 13: Spredningsplott av energilagerets energinivå plottet mot deres gjennomsnittlige temperatur.

Tabell 5 presenterer regresjonsligninger for energinivået (y) og gjennomsnittstemperatur (x). Det ble gjort tre regresjonsanalyser for hver fase presentert i Figur 13. Ligningene skal brukes til å estimere energilagerets energinivå.

Table 5: Regresjonsligningene for de forskjellige fasene i Figur 13

Segment	Regresjonsligninger
Fast	$y = 7,21x - 237$
Tofase	$y = 123x - 4560$
Flytende	$y = 3,35x + 56,7$

Figur 14 presenterer effektforbruket til den historiske dataen basert på hvilken modus som ble brukt. De er sortert fra modus en til fem langs y-aksen og x-aksen beskriver den oppladet eller utladet energien som har skjedd for alle minutt for minutt i hele tidsperioden. En positiv verdi betyr den opplader og en negativ verdi betyr den utlader

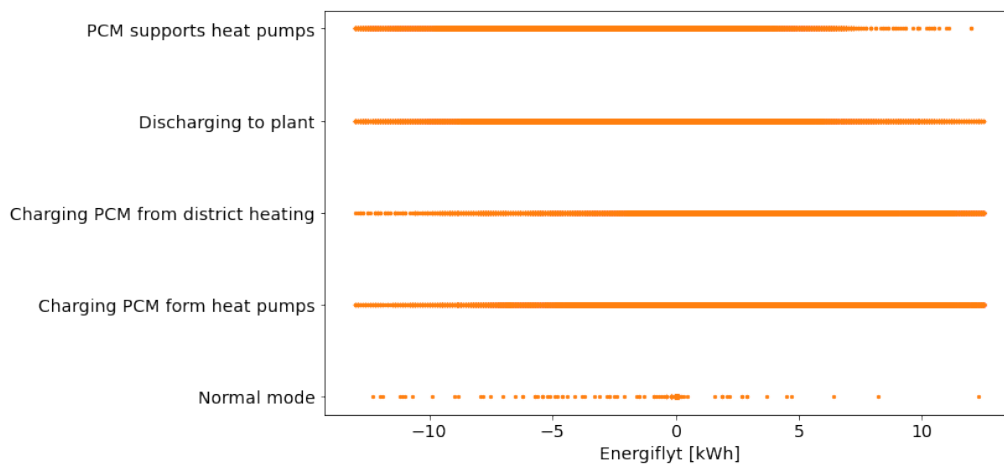


Figure 14: De forskjellige effektene gitt ut minutt for minutt gjennom hele tidsperioden.

Figur 15 er en utvidelse av Figur 13 basert på tre variabler. Disse er energinivå, turtemperatur og varmeeffekt. Varmeeffekten er gitt i kW og skal representere den ønskede effekten som skal komme inn og ut av energilageret. Effekten ble regnet ut ved bruk av Ligning 2. Negativ effekt betyr at energilageret lader ut imens positiv effekt betyr den lader opp. Energinivået er målt i kWh og turtemperaturen har enheten $^{\circ}C$. Det oransje området representerer størkneområdet til faseendrende materialet. I det mørkoransje området er overgangsperioden der det faseendrende materialet er en blanding av flytende og solid tilstand. I det gylden området er voksen flytende. For å se flere vinkler se Vedlegg B.1 .

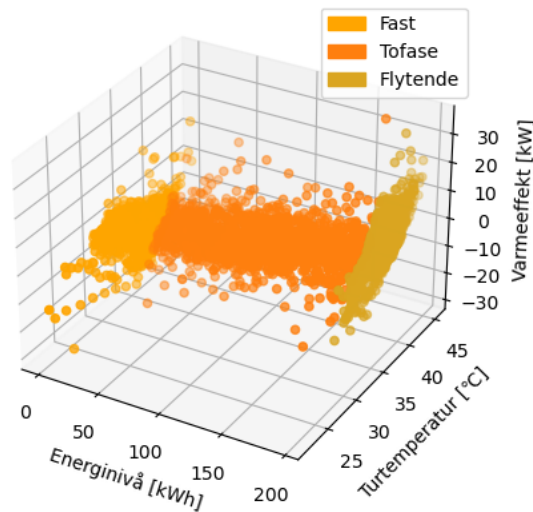
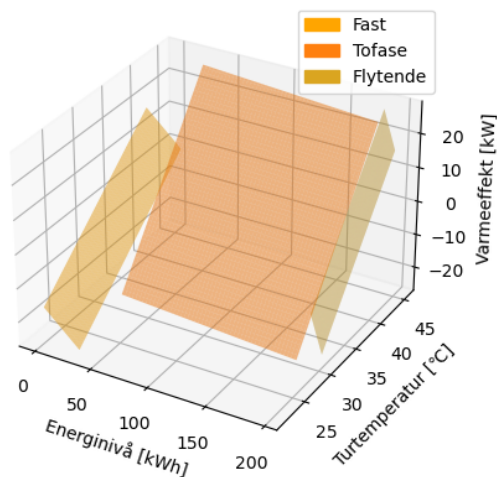
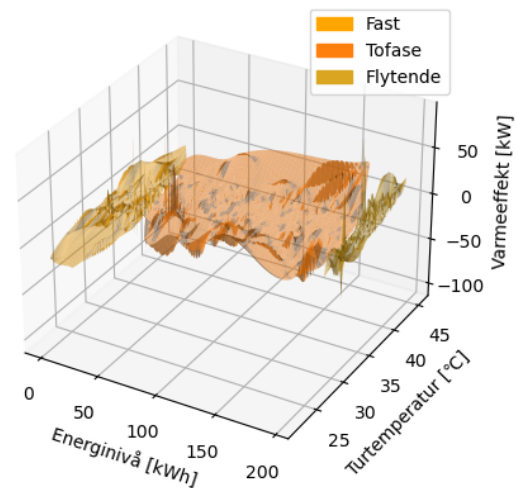


Figure 15: Spredings plott av varmeeffekt mot energivå og turtemperatur til energilageret.

Figur 16 viser resultatene fra å bruke minste kvadratiske metode og kubisk-interpolering for å simulere ønskede scenarioer for utladning og oppladning. Figur 16a viser resultatet av minste kvadratiske metoden med tre flate vektorplan. Oransje er den solideplanet, mørkeoransje er overgangsfasen og den gylden er flytende planet. Figur 16b viser tre plan simulert utifra kubisk interpolering. For å se flere vinkler av figurene se Vedlegg B.2 og B.3.



(a) Plott av minste kvadratiske metode som vektor plan.



(b) Plott av kubisk interpolasjon.

Figure 16: To forskjellige metoder brukt for å simulere forholdet mellom varmeeffekten, energivået og turtemperaturen til energilageret.

Tabell 6 viser rammeveket til energilageret. Utifra visuelle observasjoner fra Figur 15 ble det bestemt den maksimale oppladnings- og utladningseffekten. Se Vedlegg B.1 for flere vinkler. ΔT er den teoretiske temperaturdifferansen for å nå effektene i Tabell 6. ΔT ble regnet med Ligning 2 med en konstant volumstrøm på 4600 l/h.

Table 6: Rammene for maksimal opplading og utlading for de forskjellige scenarioene.

Lading	Effekt [kW]	ΔT
Opplading	10	1,87
Utlading	-8	-1,50
Utlading med lav energinivå	-3	-0,56

I Tabell 7 viser de analytiske ligningene og R^2 for minste kvadratiske metode for fast fase, tofase og flytende planene. z er effekt i kW , x er i Energinivået med enhet kWh og y er turtemperatur i $^{\circ}C$. I Vedlegg B.4 befinner plottet for ligningene som representer funksjonene i Tabell 7.

Table 7: Tabellen presenterer minste kvadratiske metoder sine R-verdi og ligninger.

Fase	Minste kvadratiske metode	R^2
Fast	$z = -0,306x + 1,87y - 56,9$	0,626
tofase	$z = -0,0229x + 3,19y - 112$	0,740
Flyende	$z = -1,07x + 2,96y + 91,0$	0,837

I Tabell 8 viser de analytiske ligningene og R^2 for kubisk interpolasjon for fast fase, tofase og flytende planene. z er effekt i kW , x er i Energinivået med enhet kWh og y er turtemperatur i $^{\circ}C$. I Vedlegg B.5 befinner plottet for ligningene som representer funksjonene i Tabell 8. I Vedlegget er de endret med hensyn på temperatur istedet for effekt. I tillegg er effekten konstant for hver verdi nevnt i rammeverket. Dette er en test for å vise spektrumet til rammeverket. Dette gjelder også Vedlegg B.4.

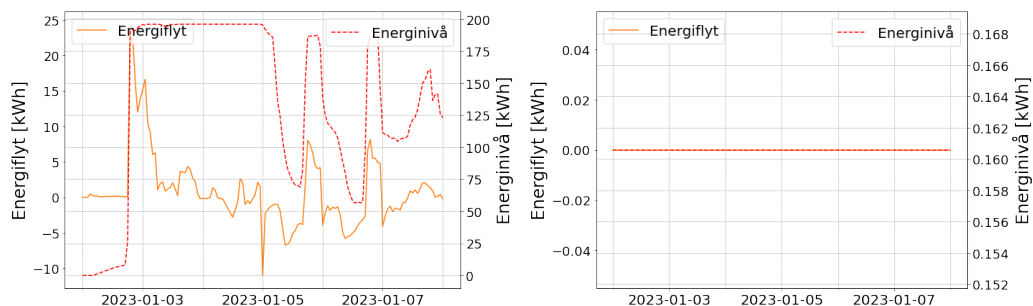
Table 8: Tabellen presenterer kubisk interpolering sine R-verdi og ligninger.

Fase	Kubisk interpolasjon	R^2
Fast	$z = -0,67 - 1,36x - 1,03y + 0,04xy + 0,03y^2$	0,998
tofase	$z = 234,85 + 0,15x - 16,97y - 0,01xy + 0,29y^2$	0,992
Flytende	$z = 789 + 13,4x + 27,7y + 0,05x^2 - 0,19xy + 0,15y^2$	0,999

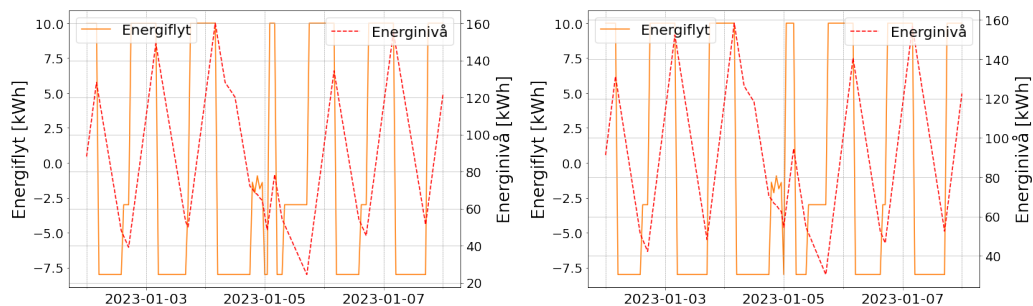
Fra beregningene gjort på Biot-tallet falt det på et spekter fra 0 til 0,36 der de fleste verdien var mellom 0,34 og 0,36. Biot-tallet ble testet for med kritisk lengde beregnet med volum og areal i tillegg til kritisk lengde beregnet som halv plan lengde. Begge metodene ga tilnærmet like svar.

5.3 Simulering av scenarioene

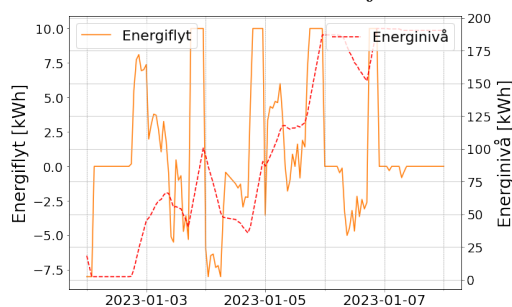
For den scenarioer simuleringens delen av resultatene skal det presenteres hvordan energilageret har blitt brukt til å være med å dekke de termiske energibehovene. Energilager-bruken er basert på funn og antagelser presentert tidligere. I Figur 17 presenteres hvordan energilageret kan brukes med nattlading, mens det er lite energi produsert fra solcellene. Behovene og produksjonen de hadde i samme uke er presentert som grafene øverste til venstre i Figur 10, 11 og 12. Generelt for alle figurene i dette delkapittelet, også Figur 17, vil energilagerets energiflyt følge venstre y-aksen og energinivået vil følge den høyre y-aksen. Begge disse vil bli plottet for de spesifikke datoene og timene det skjedde. Alle plottene vil beholde samme rekkefølge på scenarioene. Den første er den originale basert på historiske data, den andre overskuddsolenergi lading, den tredje er nattlading, den fjerde er kombinasjon scenarioet og den siste er peak shaving.



(a) Eksempel på latent energilager bruk med lav solinnstråling og høyt oppvarmingsbehov for det originale scenarioet. (b) Eksempel på latent energilager bruk med lav solinnstråling og høyt oppvarmingsbehov for lading ved overskudd av solenergi scenarioet.



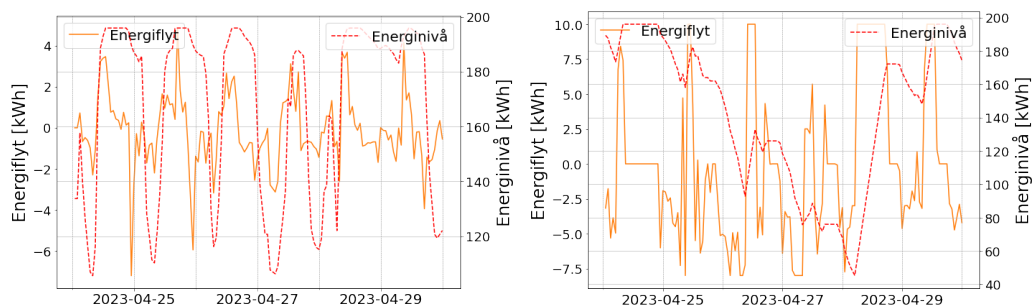
(c) Eksempel på latent energilager bruk med lav solinnstråling og høyt oppvarmingsbehov for nattladingsscenarioet. (d) Eksempel på latent energilager bruk med lav solinnstråling og høyt oppvarmingsbehov for kombinasjons scenarioet



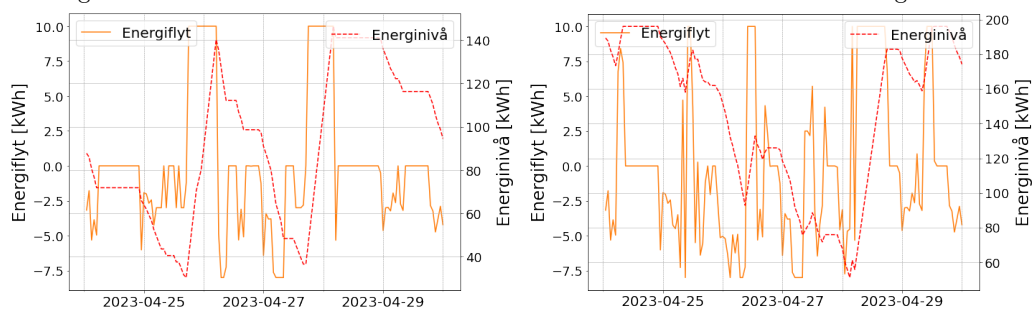
(e) Eksempel på latent energilager bruk med lav solinnstråling og høyt oppvarmingsbehov for peak shaving scenarioet

Figure 17: Eksempler fra de forskjellige scenarioene på hvordan latent energilager kan bli brukt med lav solinnstråling og høyt oppvarmingsbehov. I figurene er punktum et desimalskille.

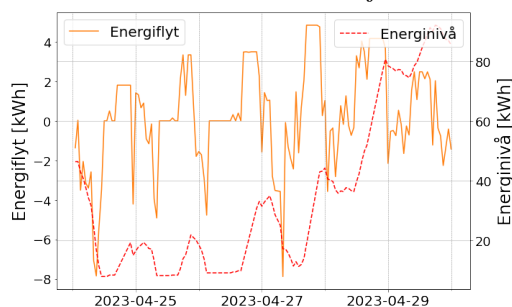
I Figur 18 presenteres energiflyten til energilageret når det er et moderat overskudd av solenergi og et moderat oppvarmingsbehovet. Behovene og produksjonen ZEB-laboratoriet hadde i samme uke er presentert som grafene øverste til høyre i Figur 10, 11 og 12.



(a) Eksempel på latent energilager bruk med moderat solinnstråling og oppvarmingsbehov for det originale scenarioet. (b) Eksempel på latent energilager bruk med høy solinnstråling og lavt oppvarmingsbehov for scenarioet med soloverskuddslading.



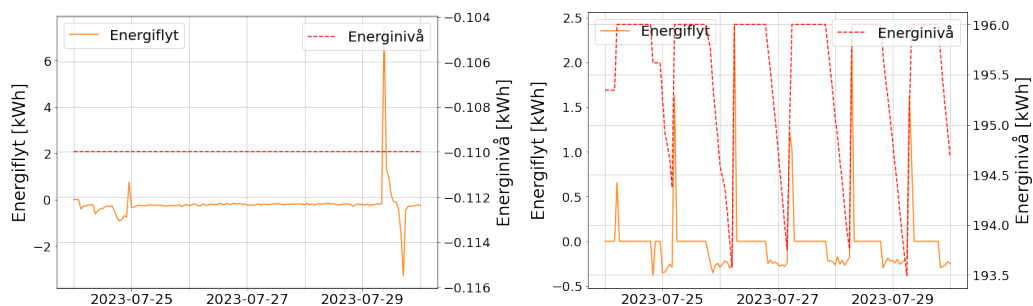
(c) Eksempel på latent energilager bruk med høy solinnstråling og lavt oppvarmingsbehov for nattladingsscenarioet. (d) Eksempel på latent energilager bruk med høy solinnstråling og lavt oppvarmingsbehov for kombinasjonsscenarioet.



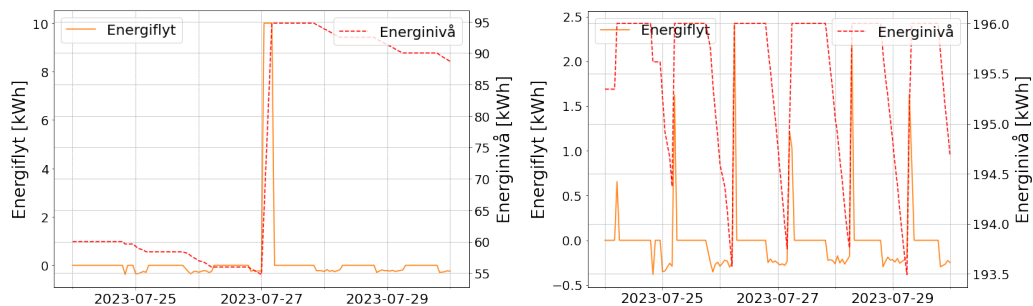
(e) Eksempel på latent energilager bruk med høy solinnstråling og lavt oppvarmingsbehov for peak shaving scenarioet.

Figure 18: Eksempler fra de forskjellige scenarioene på hvordan latent energilager kan bli brukt med moderat solinnstråling og oppvarmingsbehov. I figurene er punktum et desimalskille.

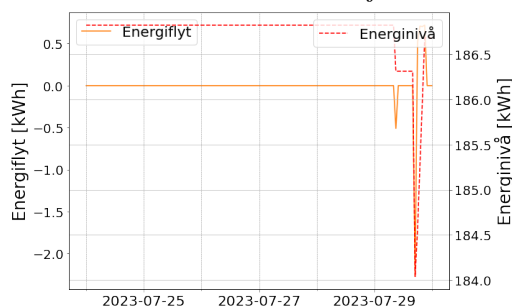
Figur 19 presenterer bruken av energilageret for de forskjellige scenarioene når det er mye overskuddsolenergi og lite oppvarmingsbehov. Behovene og produksjonen de hadde i samme uke er presentert som grafene i midten til venstre i Figur 10, 11 og 12.



(a) Eksempel på latent energilager bruk med høy solinnstråling og lavt oppvarmingsbehov for det originale scenarioet. (b) Eksempel på latent energilager bruk med høy solinnstråling og lavt oppvarmingsbehov for soloverskuddslading scenarioet.



(c) Eksempel på latent energilager bruk med høy solinnstråling og lavt oppvarmingsbehov for nattladingsscenarioet. (d) Eksempel på latent energilager bruk med høy solinnstråling og lavt oppvarmingsbehov for kombinasjonsscenarioet.



(e) Eksempel på latent energilager bruk med høy solinnstråling og lavt oppvarmingsbehov for peak shaving scenarioet.

Figure 19: Eksempler fra de forskjellige scenarioene på hvordan latent energilager kan bli brukt med høy solinnstråling og lavt oppvarmingsbehov. I figurene er punktum et desimalskille.

5.4 Økonomi, miljø, datamangler og kumulativ energi

Her presenteres de økonomiske og miljømessige forskjellene mellom de alle scenarioene. Først vil et varmekart som presenterer manglende data bli presentert. Figur 20 viser hele tidsperioden og alle punktene som måtte fjernes grunnet feilmålinger og mangler på målinger. Alle punktene i datasettene er i time for time og dermed blir det meste antall punkter som kan mangle fra en dag er 24. Alle punktene som mangler i figuren har blitt fjernet for alle verdiene fra det komplette datasettet som ble bearbeidet. Dager som representeres med hvite blanke områder er dager som ikke eksisterer som for eksempel 29.februar 2023.

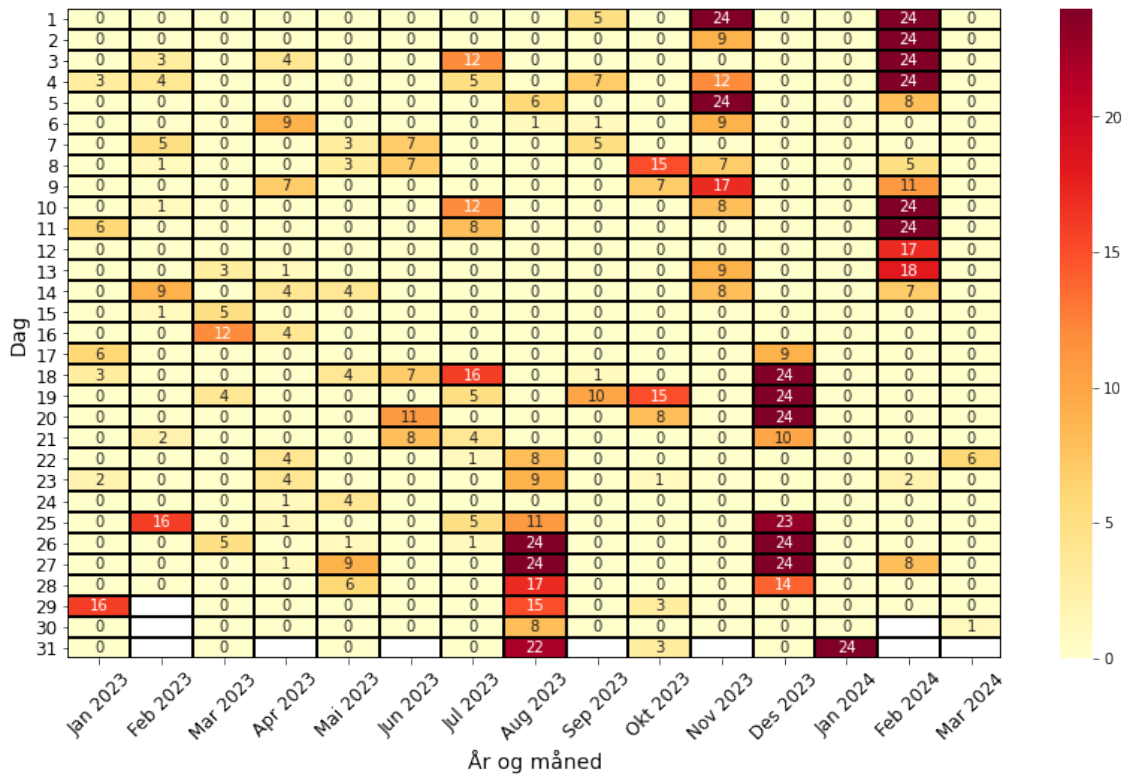


Figure 20: Varmekart over manglende data time for time over hele tidsperioden.

Figur 21 presenterer den totalt oppladet energien til alle scenarioene gjennom hele tidsperiode. scenarioene er listet langs x-aksen og den samlede oppladde energien er langs y-aksen med enheten *kWh*.

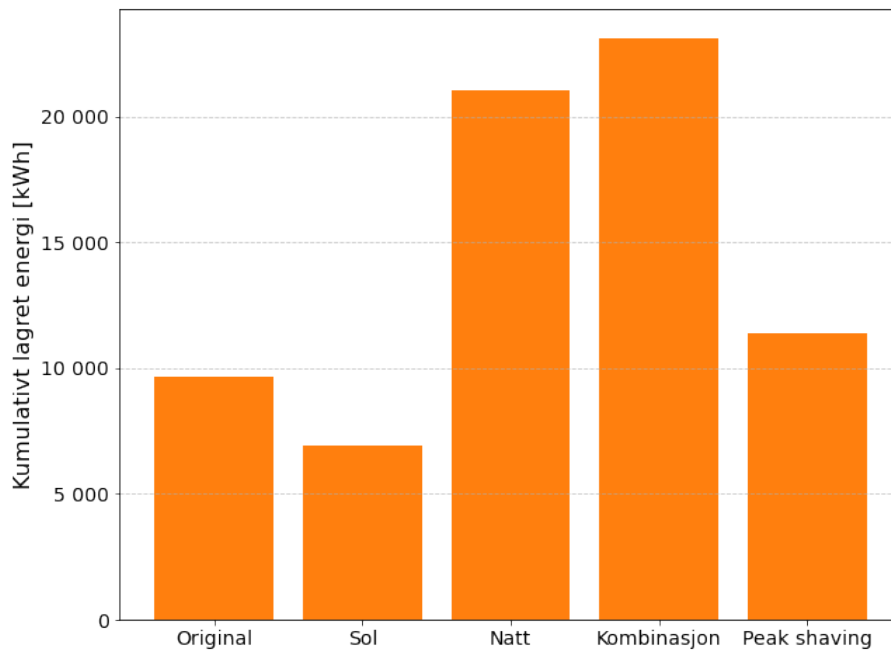


Figure 21: Kumulativt lagret energi i energilageret for de forskjellige scenarioene.

Videre er det totale økonomiske påvirkningen av energilageret presentert for alle scenarioene. Figur 22 presenterer månedlige verdier for inntjeninger kun basert på energilagerets opplading, utlading og moduser. Den summerte økonomiske påvirkningen er verdien langs y-aksen i *kr* og hver enkelt måned langs hele tidsperioden er langs x-aksen. For den økonomiske delen betyr positivt at det tjenes penger, mens negativt betyr at det tapes penger.

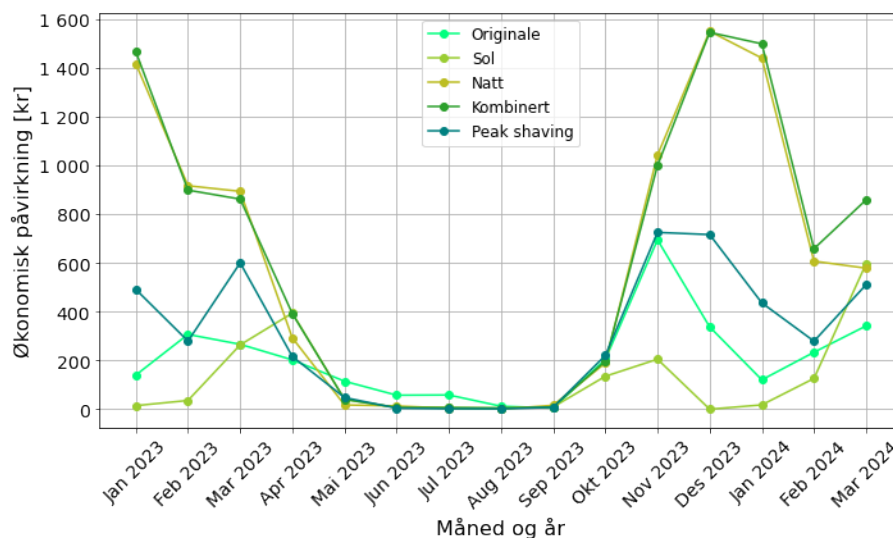


Figure 22: Månedlig økonomisk oversikt for alle scenarioene kun sett for energilageret.

Figur 23 presenterer de månedlige forskjellene i kostnader og inntjeninger mellom de forskjellige scenarioene. Merk at fem grafer skal være plottet, men kun fire er synlige, dette er grunnet at nattladingsscenarioet overlapper med kombinasjonsscenarioet.

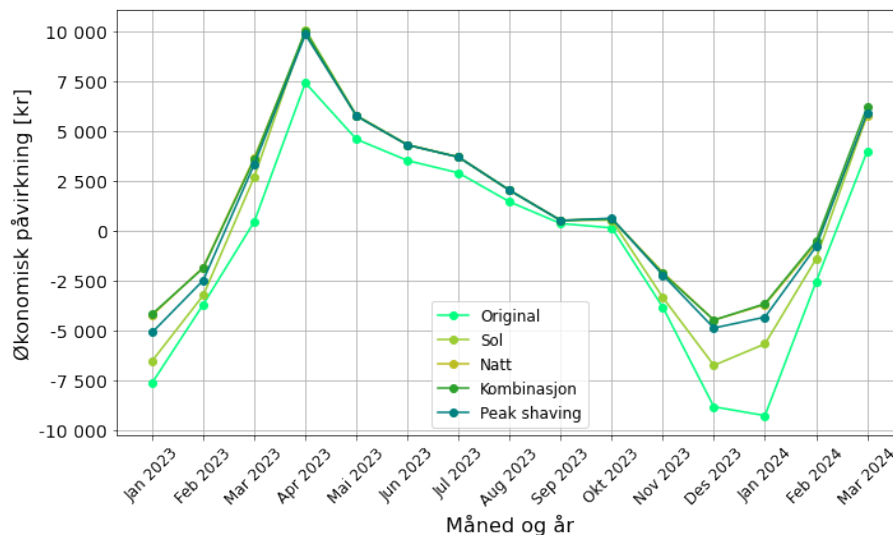


Figure 23: Økonomisk oversikt for alle scenarioene for samlet system måned for måned.

Figur 24 og 25 presenterer den totale forskjellen i økonomisk påvirkning for alle scenarioene. Figur 24 presenterer inntektene og besparelsene, mens Figur 25 presenterer kostnaddene gjennom tidsperioden. Inntektene er splittet inn i overskudds solenergi og energilagring-bruk.

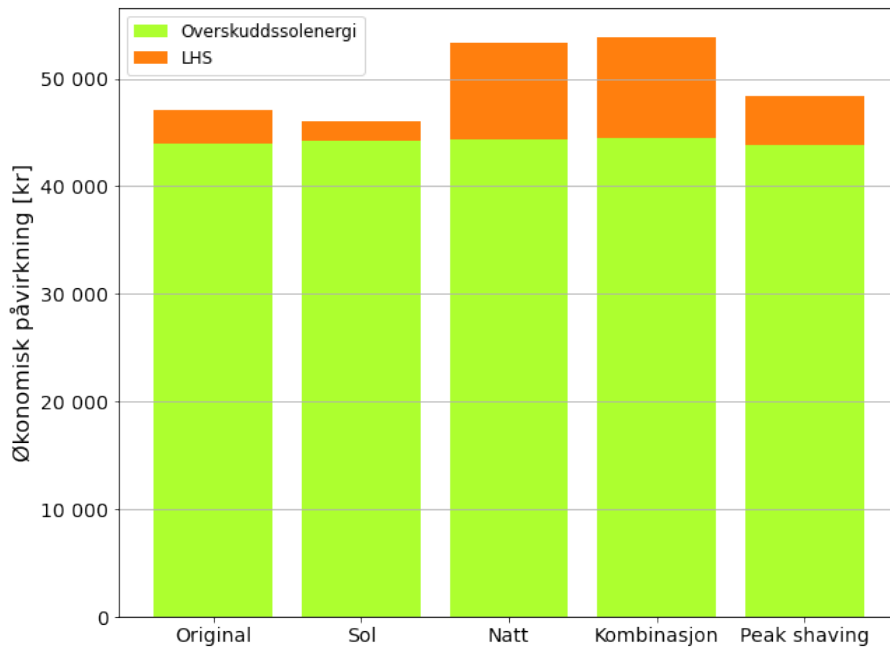


Figure 24: Totale inntekter for de forskjellige scenarioene.

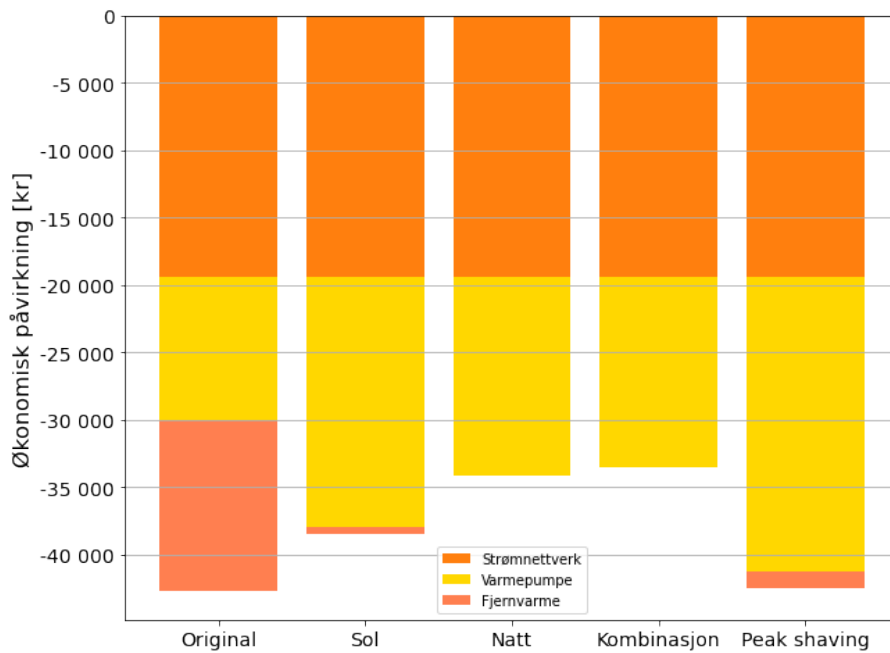


Figure 25: Totale kostnader for de forskjellige scenarioene.

Figur 26 er den siste figuren og presenterer det totale utslippet til de forskjellige scenarioene har hatt gjennom hele tidsperioden. For miljødelen betyr et positivt utslipp at den slipper ut CO₂, mens et negativt utslipp betyr at den kompenserer for tidligere utslipp.

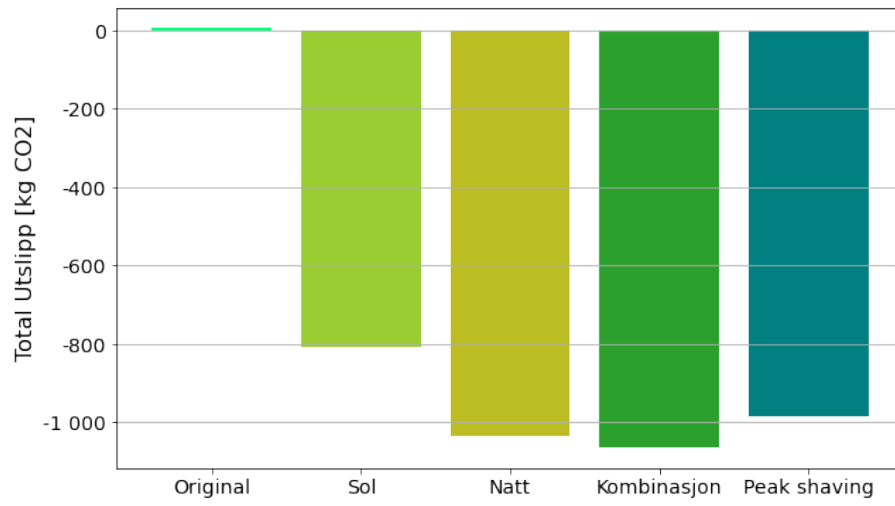


Figure 26: Totale miljøpåvirkninger for alle scenarioene i utslipp kg CO₂ for energiforbruk og produksjon.

6 Diskusjon

I denne delen av rapporten vil resultatene bli analysert og diskutert. Hensikten med diskusjonen og kalkulasjonene var å finne en utbedret metode å benytte energilageret på ZEB-laboratoriet. Dette kan skje mellom økonomiske gevinster, peak shaving og miljømessige besparelser. Diskusjonen vil deles opp i behov og ressurser, energilagerets dynamikk, tilpasning av energilageret, gevinst og tap i tillegg til feilkilder.

Det er et viktig perspektiv som mye av diskusjonen baserer seg på. Dette er å redusere mest mulig bruk av fjernvarme og strømmnett. Dette baserer seg på at både strømmettet og fjernvarme har et utslipp knyttet opp mot bruk. Dersom varme fra eksterne midler skal bli brukt var det viktig at dette var til varmpumpen først da denne er mer energieffektiv og har lavere utslipp. Ved å redusere bruken av fjernvarme og strømmettet vil det bidra til byggets mål om nullutslipp gjennom livsløpet. Dette vil mest sannsynlig ikke gi en perfekt sammenligning fra det originale scenarioet til de nye scenarioene, men de nye scenarioene vil sikte mot å være mer fremtidsrettet opp mot byggets fremtidige drift.

6.1 ZEB-laboratoriets behov og ressurser

ZEB-laboratoriet har et stort energibehov, men de har også tilgang på flere midler for å dekke dette behovet. Behovene deres består av elektrisk energi til å dekke lys, heis og annet. Bygget har også et oppvarmingsbehov som kan dekkes av varmpumper og/eller fjernvarme.

Behovene er avhengig av tid på døgnet og tid på året. I vinterperioden 2023 i Figur 11 når bygget et oppvarmingsbehov på 30 *kWh*. Dette er da en gjennomsnittlig effekt som på 30 *kW* over en time. I teorien skal byggets maksimale behov være 26 *kW* på en kald vinter dag. Videre observeres det at i vinteren 2024 har oppvarmingsbehovet sunket fra fjoråret, dette kan være på grunn av høyere utetemperaturer eller bedre styrings system. En annen grunn til dette kan vær at ZEB-laboratoriet har et større oppvarmingsbehov om kveldene enn fjoråret. Dette kan da lede til at innetemperaturene er vedlikeholdt bedre gjennom kvelden slik at effekttoppene reduseres gjennom kvelden. En grunn til at varmen brukt i bygget er større enn det teoretiske oppvarmingsbehovet kan være at når arbeidstiden begynner er bygget kaldt og de prøver å varme det opp.

Det observeres også at energibehovet mot oppvarming er lavere i januar 2024 enn det er i mars 2024. Dette kan være på grunn av at ZEB-laboratoriet tester ut nye oppvarmingsmuligheter med den utbyttede varmpumpen. Dette kan være alt fra å kjøre den nye varmpumpen på høyere effekter eller til å benytte den sammen med energilageret. Dersom det var kaldere utetemperatur i mars, kan dette også begrunne de høyere oppvarmingsbehovene. Dette kan være nyttig opp mot energilagingsbruk grunnet at tid på året og muligens en utetemperatur ikke er det eneste som påvirker oppvarmingsbehovet.

En annen observasjon er at i Figur 11 er det et tydelig positivt elektrisk forbruk i januar 2024. Elektrisk forbruk inkludere ikke solproduksjon, men alt fra lys til kjøling. En positiv verdi på denne grafen tyder på at bruk av energi vil produsere strøm til bygget. Dette er mest sannsynlig ikke korrekt og kan begrunnes med feilmålinger. En annen observasjon er at det elektriske forbruket er relativt jevnt gjennom året og har heller endringer fra dag til natt. Dette kan begrunnes med den generelle lastprofilen til et kontor og at ytre påvirkninger som sesong påvirker det elektriske forbruket i mindre grad enn oppvarmingen.

I Figur 11 observeres det tilnærmet null oppvarmingsbehov i juli. Grunnet til det kan være at utetemperaturen er så høy at det sammenfaller med byggets eget innetemperatur og dermed er det lav oppvarmingsbehov. Sommeren har også et lavere elektrisk forbruk som kan begrunnes gjennom at det er et redusert personal på jobb.

Lastene i Figur 11 er ikke like glatte sammenlignet med de teoretiske lastprofilene i Figur 3. Istedet er lastprofilene støyete med energitopper. På den andre siden er oppvarmingsbehovet høyest om dagen som er likt med teorien. Det observeres et mønster i Figur 11 der det elektriske forbruket og oppvarmingsbehovet er lavere om helgen. Dette samsvarer også med teorien.

De interne midlene de har tilgang på for å kunne håndtere behovene er solceller, varmepumpe og et energilagringssystem. På Figur 9 er den originale bruken av energilageret presentert. Det observeres for januar 2023 at energilageret oppladet en stor mengde energi over en lengre periode. Dette kan være på grunn av at vinteren har store energibehov knyttet til oppvarming. Det observeres også at energiflyten til energilageret har generelt store toppe på utladingen. En grunn til dette kan være at oppvarmingen om natten er relativt lav. Dermed benyttes energilageret som en start på oppvarmingen av bygget på morgenen for å få det opp til en behagelig temperatur.

I tillegg til dette kan det fra juli 2023 observeres at bruken av energilageret er minimal. Dette kan begrunnes med det tidligere diskuterte lave oppvarmingsbehovet om sommeren og at et termisk energilager benyttes til å støtte bygget i dets oppvarmingsbehov. Andre observasjoner er at det er få sammenhenger ellers i bruken av energilageret. Dette inkluderer unike oppladings- og utladingstidspunkter og kurver i tillegg til støy mengde.

I Figur 10 observeres det høyest solcelleproduksjon om sommeren og minst om vinteren. Ved å kombinere Figur 10 med 11 vil energiproduksjon fra solceller være tilstrekkelig til å holde ZEB-laboratoriet tilnærmet selvfornyende om sommeren og deler av våren og høsten. Imens det er en utfordring om vinteren grunnet tilnærmet null solenergiproduksjon der bygget må dekke sitt energibehov gjennom ekstern infrastruktur som fjernvarme og strømmnettverket. På våren og høsten er solcelleproduksjon lavere enn om sommeren og høyere om vinter. Dette tyder på at det er nødvendig med en kombinasjon mellom interne midler og ekstern infrastruktur.

De eksterne midlene til ZEB-laboratoriet har som kan bidra er tilgang elektrisitet fra strømmnettverket og oppvarming fra fjernvarme. Ved bruk av dette vil kostnader og utslipp øke, det er derfor et viktig poeng at ZEB-laboratoriet bør i størst mulig grad bli drevet selvstendig.

I Figur 12 er en kombinasjon av Figure 10, 11 og 9. Om vinteren merkes det store energibehov og lite tilgang på overskuddsenergi fra solen. For våren og høsten er det et moderat med overskudd der noen dager har et stort overskudd, mens andre dager her litt mindre overskudd, men det er også et behov for energi. For sommeren er overskuddet stort og energibehovet er lite. Om sommeren vil det manglende behovet om kvelden mest sannsynlig være elektrisk energi. Dette er noe som det termiske energilageret ikke har evne til å håndtere.

En annen trend som kommer tydelig frem er at overskuddsenergien alltid er på dagen, da dette er når solcellene har evne til å produsere strøm. Dette kan da knyttes opp mot den generelle lastprofilen som ble utviklet i Figur 11. Behovet er i de aller fleste tidspunkter større om dagen enn det er om natten som tidligere begrunnet. Et samarbeid mellom overskuddet til solen og behovene som må dekkes leder til at bygget har størst energibehov om kvelden på dager hvor det er et overskudd av solenergi. Om vinteren og andre perioder når overskuddet av solenergi ikke er tilstrekkelig er energibehovet størst om dagen.

Målet er å kunne finne hvilke innstillinger på energilageret som kan tilpasse bygget. Scenarioene som ble valgt ut er tilpasset etter disse behovene. Et scenario som tilpasser nattlading kan funke bra i vinterperioder når energibehovet er stort om dagen og mindre om nettene. Dette vil også naturlig lede til peak shaving. Videre vil et scenario som baseres på å opplade overskudd med solenergi og utlade ved behov, passe for våren og høsten. Dette leder også til at en kombinasjon av disse kan tilpasse alt fra høsten til våren.

Videre er et peak shaving scenarioet relevant grunnet de store variasjonen som ZEB-laboratoriet trekker fra strømmnettverket oppimot oppvarming. En flatere kurve vil være mer gunstig for strømmnettverket da kontorbygg generelt trekker store mengder strøm på samme tid og dersom et bygg klarer å minimere behovene deres vil dette være en gunstig løsning for begge parter. En grense som ble satt for peak shaving var at den skulle glatte ut dagens behov. Dette ble basert på hvordan oppvarmingen varierer fra dag til dag. Alt dette vil bli diskutert videre i den dynamiske delen som fastsetter rammeverkene i energilageret og den sammenslåtte delen som tar hensyn til rammeverkene for å beregne et bedre bruk.

6.2 PCM Dynamikk

Fra Figur 13 vises det en tilnærmet lineær proporsjonalitet mellom energinivået mot gjennomsnittstemperaturen av energilageret. Temperaturområdet er mellom 25 og 50 °C, men etter 42 °C og før 34 °C er det ingen endring i energinivå til energilageret. Dette tyder på at tidligere bruk av energilageret har ladet forbi de teoretiske maksimale og minimale grensene for energilageret. Dette presenterer mest sannsynlig at bruken ikke har faste rammer for energinivå. Målingene stopper etter 50 °C, dette kommer av at 50 °C er nedbrytningstemperaturen til biovoksen ifølge tabell1. 50 °C og over vil føre til permanente endringer og skader på voksen.

Dette henger også sammen med bruken av energilageret i Figur 14. Energilageret sin opplading og utlading virker å være uavhengige av hvilken modus den benytter. Ved tidligere bruk av energilageret kan den være i en av opplading modusene samtidig som den utlader og motsatt. Dette går imot forventinger, for eksempel i oppladingsmodus to, se Figur 7b, registreres det både positiv og negativ energi. I oppladingsmoduser forventes det bare positiv energiflyt. I tillegg til dette kan den være i normal modus med en energiflyt som ikke er null. Dette kan komme av at turvannet som blir sent gjennom energilageret for opplading er kaldere enn energilageret. Dette kan lede til ugunstig benyttelse av energi. Totalt sett markerte dette at en mulig utbedring av energilageret kan være å tilpasse et rammeverk slik at den opererer innen sitt energinivå område og energiflyt område.

Ved å sammenligne Figur 13 med den teoretiske latente varme i Figuren 1, observeres det felles trekk. Fasongene for alle figurene ligner med en karakteristisk roterert Z. Samtidig skiller resultat figurene fra den teoretisk ved at den er ikke isotherm i tofase området. Dette kan indikere at biovoksen smelter og størkner forskjellig geografisk i biovoksen. For at tofase området skal være isotherm må temperaturen i energilageret være homogent. For at temperaturen skal være homogent må Biot-tallet være mindre eller lik 0,1. Fra beregningene ble biot-tallet kalkulert til mellom 0,34 og 0,36 for de relevante volumstrømmene. Dette vil diskuteres videre i feilkildedelen.

På den andre siden samsvarer ikke temperaturområdet fullstendig i Figur 13 med de teoretiske verdiene i Tabell 1. Figurene har sine solide nivå mellom 32,8 til 37,3 °C, tofase er imellom 37,3 til 38,4 °C og flytende 38,4 til 42,7 °C. Disse områdene er basert på regresjons ligningene i Tabell 5. Imens det teoretiske området for solid, overgangsperiode og flytende, er 32,5-35,5, 35-39 og 39 og oppover. Smeltepunktet fra Figur 13 er merkverdig høyere.

Fra Figur 13 kommer det frem at energilageret benytter følbar varme og latent varme til å lagre energi. I Tabell 5 presenteres de forskjellige tilnærmende regresjonsanalyserte ligningene til de forskjellige segmentene i det gjeldende temperaturområdet. Energinivået til energilageret i det originale scenarioet ble beregnet med disse funksjonene. Følbar varmeoverføring er proporsjonalt med temperatur. Dermed vil funksjonene i tabellen for solid og flytende kunne være tilnærmet korrekt. Dette er grunnet at energinivået lagret i følbar varme er beregnet med Ligning 4 som er proporsjonalt med temperaturen. I tillegg til dette kan det bli observert et større stigningstall i en solid fase enn flytende fase. Dette kommer mest sannsynlig av at den spesifikke varmekapasiteten til biovoksen som flytende fase er lavere enn for solid, se Tabell 1 for varmekapasitetene.

Det blir derimot utfordringer rundt det latente varmelagringsområdet. Teoretisk skal det latente lagringen kun være avhengig av faseovergangs energi representeres med Ligning 5. En mer tilnærmet energinivå kunne blitt beregnet fra målingene i Figur 6a da disse indikerer tydeligere hvilke områder som er smeltet eller størknet. Det ble bestemt å bruke gjennomsnitt temperaturen til energilageret for å forenkle kalkulasjonene.

Gjennomsnittstemperaturen gir derimot ikke en fullstendig måling på energinivået. Dette er grunnet at entalpi blir ikke tatt i betraktning i beregningene. Temperaturområdet i Figur 13 tar med at det er en konkret overgang mellom fasene. Gjennomsnitt temperaturen vil bli trukket opp av den allerede smeltende biovoksen og ned når den har størknet. Noe som kan begrunnes med et høyt Biot-tall. InfluxDB hadde ikke energinivå målere ved hele tidsperioden som var relevant. Som nevnt i metode ble den derfor beregnet grunnet en kort tidsperiode.

En mer komplett graf av sammenhengen til energilageret er plottet i Figur 15. En observasjon funnet med figuren er at ved å vinkle den med energinivået mot turtemperaturen, har figuren lik fasong og form som Figur 13. Se Vedlegg B.1 for mer informasjon. Dette tyder på plottet har en sammenheng med teorien rundt latent varmelagring og temperatur. En annen observasjon fra sprednings plottet er at den det danner tydelige flater i rommet.

Et av målene for oppgaven er å lage matematiske modeller med evnen til å estimere varmeeffekten ved kjennskap til turtemperaturen og energinivået til energilageret. Modellen kan da bli brukt til å velge turtemperatur basert på ønsket effekt og målt energinivå. Figur 16a og 16b er grafiske representasjoner av metodene brukt. Metodene brukt er minste kvadratiske metode og kubisk interpolering. I Tabell 7 og 8 vises R-verdiene og ligningsettene for hver fase og metode. Det observeres at kubisk interpolasjon har høyere R^2 enn minste kvadratiske metode. Teorien for R^2 nevner at verdier nær en tyder på at modellen er mer presis i forklaring av variansen mellom datapunkter. Dette kan bety den kubisk interpolasjon er mer presis. På den andre siden kan den merkbart høye R^2 tyde på at den kubiske interpolasjonen er overtilpasset.

I Tabell 6 presenteres de forskjellige rammeverkene til energilageret. Disse ble i hovedsak funnet fra visuelle observasjoner av Figur 15 og i Vedlegg B.1. Det ble observert store datamengder innenfor området 10 til -8 kW . En overgang til tofaseområdet ble observert på cirka 30 kWh . Dette betyr at dersom energinivået er under denne vil den benytte følbare varme. En kunstig grense på 55 kWh og -3 kW ble satt slik at energinivået på energilageret ikke skulle synke for lavt og for fort.

Forskjellige kombinasjoner av turtemperatur, energinivå og varmeeffekt ble testet for kubisk interpolering, presentert i Figur 16b, basert på rammene i Tabell 6. Resultatene fra testingen overlappet ikke med forventede verdier. Forventede verdier baserte seg på verdier fra teoretiske Ligning 2 og regresjonsligningene fra Tabell 5. Et problem for den kubiske interpolasjonen var at turtemperaturen var i noen scenarier lavere enn gjennomsnittstemperaturen til energilageret under opplading. Dette kan komme av at smeltepunktet for gjennomsnittstemperaturen for Figur 13 er høyere enn den teoretiske. I tillegg var kubisk interpoleringsmetoden upresis og samsvarte ikke med teoretiske beregninger. Dette kan komme av antagelser som null varmetap og virkningsgrad på 100 %. I tillegg kan feil smeltepunkt og ikke presis volumstrøm påvirke.

Minste kvadratiske metodes modell, presentert som Figur 31, ble også testet for forskjellige verdier av varmeeffekt, turtemperatur og energinivå. Testene baserte seg på ligningene for solid, tofase og flytende i Tabell 7 med verdiene fra og med hensyn til rammeverket. Resultatene fra testingen var ikke som forventet. De samme utfordringene dukket opp for turtemperaturen som ved kubisk interpolasjon. Den var lavere enn gjennomsnitt i energilageret i oppladningsscenarioer og estimert verdi varierte merkbart fra teoretisk verdi. Se Vedlegg B.4 for en grafisk presentasjon av testen. Resultatene kan komme av antagelsene brukt i dynamikkdelen, smeltepunkt, volumstrøm og at modellen ikke har høy R^2 .

Utfordringen rundt at biovokstemperaturen ikke var for lav ved utlading oppsto ikke for både i kubisk interpolering og minste kvadratiske metode. Det var heller et lignende problem at turtemperaturen var for lav. En annen observasjon er notert i Vedlegg C der det observeres at gjennomsnittstemperaturen til energilageret er større en tur- og returvannet i de fleste punkter. Selv når den opplader. Dette virker ikke helt korrekt da det å varme opp energilageret vil kreve at vannet er varmere enn biovoksen. Dette kan komme av at biovoksen ikke er det eneste faktoren som påvirker målingen av gjennomsnittstemperaturen. Andre ting som kan påvirke dette er platenes og veggens temperaturer. Med antagelsen om at temperaturfordelingen i biovoksen og platene er lik er det kanskje en annen måling som kan påvirke å dra opp gjennomsnittstemperaturen. Dette kan bety at testene diskutert tidligere som viste at turtemperaturen var for lav muligens fortsatt er korrekt og at målingen av gjennomsnittstemperatur er for høy sammenlignet med biovoksen og platene.

Et tredje forsøk på lage en presis modell for energilageret baserer seg på en analytisk løsning av kubisk interpolering se Tabell 8. Samme ønskede effekten ble brukt som i analytisk modell for minste kvadratiske metode. Den mest bemerkelsesverdige observasjonen med Vedlegg B.5 var at turtemperaturen var for høy i flytende tilstand. Denne modellen har de samme utfordringene med lavere temperatur enn biovoksen ved oppladning og upresise estimerte verdier. Det skal nevnes at R-verdien ble ikke baserte på denne analytiske modellen, men de numeriske plottet fra Figur 16b.

Mangel på presise estimater kan bety det er flere faktorer involvert i effektflyten av energilageret. I Ligning 2 vises det at varmeoverføring er avhengig av volumstrømmen, tettheten, endring av temperatur og spesifikk varmekapasiteten. Figur 16a og 16b viser sammenhengen mellom tur-temperaturen og energinivå. Selv om bergingene av varmeoverføring var kalkulert med hensyn på målte volumstrømmer med Ligning 2, klarer ikke figurene å se forskjellen mellom to like høye effekter som har forskjellige verdier. For eksempel lav temperatur differanse og høy volumstrøm og høy temperatur differanse og lav volumstrøm. Denne variabelen ble forsøkt å fjernes med å kun beholde volumstrømmer over 4500 l/h, men den hadde fortsatt variasjoner.

6.3 scenarioene

Videre i denne diskusjonen vil de forskjellige scenarioene bli diskutert opp mot hverandre og deres nytte. De forskjellige mulighetene energilageret har blir sammenlignet opp mot er med høyt oppvarmingsbehov og lav produksjon, moderat oppvarmingsbehov og moderat produksjon i tillegg til lavt oppvarmingsbehov og høy produksjon. Generelt burde det også unngås fullstendig å benytte fjernvarme grunnet deres høyere utslipp som er presentert i Tabell 4. Ved undersøkelse av effektivitet til de forskjellige scenarioene vil det at energilageret er mye i normal modus, altså dersom energiflyten er null, være et viktig moment. Dette betyr at den ikke brukes, se Figur 7a.

Alle scenarioene vil følge resultatene fra rammeverket presentert i forrige del. Det er et unntak som gjelder kun en av scenarioene i et av tilfellene. Peak shaving er satt opp til å kunne i best mulig grad flate ut kurven. Derfor er det slik at hvis energinivået blir lavere en 55 kWh vil den fortsatt utlade med sin maksimale begrensing. Den delen av rammeverket var med for å hindre at energilageret gikk tom, men for å kunne flate ut kurvene er det ofte store variasjoner fra medianen til oppvarming kurven.

Det første tilfellet med høyt energibehov og lav produksjon vil bli diskutert først. Figur 17 er energilagringens bruken gjennom perioden januar 2023 på Figur 11, 10 og 12. Fra figurene observeres det at nattladings- og kombinasjonsscenarioet, representert i Figur 17c og 17d henholdsvis, er tilnærmet identiske. Dette kan komme av at energibalansen som representerer dette tidspunktet ikke har noen positive verdier og dermed vil den ikke opplade noe overskudd med solenergi. Dette kan også tolkes indirekte fra Figur 17b da energilageret i dette scenarioet kun kan bli oppladet av sol og den ikke lader noe som helst.

Videre observeres det originale scenarioet i Figur 17a at den har en stor opplading der Energinivået hopper fra 0 til 196 kWh på en time og den fortsetter å lade i flere dager. Dette kommer mest sannsynlig av at energinivået feilaktig hopper opp grunnet at den er basert på gjennomsnittstemperaturen. Videre observeres også at den har effekter som er større enn de som ble satt til rammeverket. Ellers bemerkes det også at plottet har en god del støy og variasjon i energiflyt. Dette kan være problematisk med tanke på energieffektiviteten grunnet at fra Figur 11 i januar 2023 er energibehovet også støyete. Dette kan skape unødvendige høye topper som leder til at bygget blir for varmt.

Videre blir observasjoner til peak shaving i Figur 17e diskutert. Det merkes at peak shaving har delvis like trender som natt og kombinasjonsscenarioet. Toppene havner på cirka samme plasser, men de strekker seg ikke over like lange perioder. En grunn til dette er at behovet om nettene generelt er lavere og på grunn av at peak shaving vil flate ut kurven vil den naturlig også lade om kvelden. Fra Figur 11 kan det begrunnes hvorfor oppladingene i peak shaving strekker seg over kortere tidsperioder enn natt og kombinasjonsscenarioet. I peak shaving er oppvarmingsbehovet lavt i bare noen få timer, mens for de andre blir den oppladet nesten hele natten. I januar 2023 er det korte perioder hvor oppvarmingsbehovet synker og dermed vil simulasjonen til peak shaving forsøke å flate den ut så langt den lar seg. Videre observeres det at den er i normal modus. Dette er grunnet at energilageret har et energinivå på 196 kWh og ikke kan bidra til å glatte ut kurven med en videre opplading. I tillegg til motsatt for et energinivå på 0 kWh.

Basert på sammenligning av alle scenarioene i dette tilfellet har natt og kombinasjonsscenarioet fordeler med at de sjeldent benytter normal modus. Dette kan lede til at energilageret har en bedre evne til å unntytte dekke de større energibehovene om dagen under arbeidstider.

Videre vil scenarioene bli sammenlignet med hverandre når det er et moderat oppvarmingsbehov og moderat solproduksjon. I Figur 18 presenteres alle energiflyt og energinivå kurvene for alle scenarioene for april 2023 i Figur 11, 10 og 12. I det originale scenarioet presentert i Figur 18a observeres det at energilageret fortsetter å lade selv om energilageret er fulladet. Dette kan komme av at energilageret ikke har like klare rammer som ble diskutert opp mot Figur 13.

Det neste som merkes er at for solscenarioet i Figur 18b at den har begynt å lade. Dette kommer da av at energien produsert fra solcellene har begynt å gi nok energi til å dekke energibehovet til bygget og fortsatt ha overskudd til opplading av energilageret. Fra grafen observeres det også at den har tider der energiflyten er null. Dette kan komme av at den er fulladet, at det ikke er et behov eller overskudd eller het tom uten noe overskudd av sol. Eventuelt kan det også bli av manglende data som vil bli diskutert senere. Totalt sett viser dette at solscenarioet har et mer lovende rammeverk for denne perioden enn tidligere.

For denne tidsperioden på året observeres det at natt og kombinasjon scenarioet ikke lenger er like, se Figur 18c og 18d henholdsvis. Forskjellene her kommer mest sannsynlig av at prioriteten i kombinasjonsscenarioet var opplade av overskuddsolenergi. Fra denne metodikken burde den minne mer om solscenarioet i dette tilfellet. Kombinasjonsscenarioet har flere likeheter til solscenarioet som allerede er analysert.

For nattladingsscenarioet i Figur 18c presenterer grafen flere lange strekninger i normal modus. Dette kommer mest sannsynlig av at solenergien er tilstrekkelig til å dekke all energibehovet til bygningen og at dette scenarioet ikke sikter mot å lade dette overskuddet. Dette kan lede til at energinivået er lavt på slutten av sommeren før overgangen til høsten slik at den krever et par ekstra oppladinger om nettene istedenfor. En slik opplading er presentert i Figur 18c.

Fra peak shaving scenarioet i Figur 18e observeres det at energinivået holdes under 40 kWh i store deler av uken. Dette kan komme av at den ikke har samme begrensning som de andre scenarioene når energinivået er under 55 kWh . For de andre scenarioene blir den da begrenset til en maksimal utlading på -3 kWh . For oppladingen avleses det fra grafen at den aldri når høye oppladinger. Dette kommer av at oppvarmingsbehovet er lavt og dermed blir medianen lav som leder til at den ikke kan siktes til en høy nok verdi til å få oppladet. En mulig løsning til dette kunne vært å implementere en opplading strategi inn i peak shaving som tar hensyn til når det er sol overskudd og vil bistå med en ekstra opplading. Slik som simulasjonen for peak shaving brukes under moderat solproduksjon og oppvarmingsbehov har den ikke effektive resultater.

Sammenlignende i tilfellet der både oppvarmingsbehovet og overskuddet av solenergi er moderat leder til at overskuddet som er av solenergi har fordeler da dette kan være med å dekke energibehovet når solen har gått ned. Den originale bruken havnet litt innenfor dette, men den kjører på relativt lave effekter. Ulemper i dette tilfellet er om et energilager ikke benytter overskuddet til å fulle lagrene, spesielt når det fortsatt er et moderat energibehov ellers. De scenarioene som utnytter dette tidspunktet på året best, er de som benytter overskuddet av solenergi til å opplade energilageret. Dette er sol og kombinasjon scenarioet.

Det siste tilfellet som vil bli sammenlignet for alle scenarioene er når det er mye sol og lavt oppvarmingsbehov. Fra Figur 19 er alle scenarioene presentert og de gjelder for uken i juni 2023 i Figur 11, 10 og 12. Her er alle tilfellene nokså like, de bidrar alle til cirka samme grad. I Figur 19a er hoved forskjellen at det konstant avgis en lav effekt, denne kan muligens anses som tap. For nattscenarioet noteres det at energinivå er lavere enn de resterende. Dette kan komme av at all utlading fra den skjer sakte og den vil ikke ta inn noe av overskuddsenergien fra solen, dermed vil den kun lade når den er under 55 kWh i løpet av natten.

Variasjonen i energiflyt og energinivå for Figur 19b, 19d og 19e er små da grafene er skalert ned. De små verdiene kommer mest sannsynlig av et lavt energibehov om natten, da solenergien om dagen vil være tilstrekkelig. Fra alle sesongene i året har det skjedd et skift der, kombinasjonsscenarioet har gjort en overføring fra å være tilnærmet lik nattscenarioet til tilnærmet lik solscenarioet.

For det siste tilfellet blir alle scenarioene benyttet nokså likt, det er små forskjeller som skiller energiflyten for utlading, men de kan nesten neglisjeres grunnet et lavt oppvarmingsbehov. Det som kan være problematisk med alle scenarioene som kjører en full opplading hver gang grunnet det er så mye soloverskudd, kan i realiteten lede til større tap av energi enn nødvendig. I et realistisk scenario som tar hensyn til varmetap i tillegg kan det være gunstig å beholde energinivået nærmere midten.

6.4 Økonomi, miljø, datamangler og kumulativ energi

I denne delen av diskusjonen vil konsekvensene av alle tiltakene og de forskjellige rammene bli diskutert. Innen dette gjelder de økonomiske og miljømessige endringene av forskjellig energilagingsbruk.

Når det gjelder hvilke av scenarioene som er brukt mest kan dette visualiseres i Figur 21. Den kombinerte bruken viser seg til å ha oppladet mest. Dette kan være på grunn av at simulasjonen alltid hadde flest applikasjoner der den oppladet. Det at den har mest opplading kan både være gunstig og dårlig, dette kommer helt an på hvilke andre faktorer som kostnader, behov og metode. Basert på behovene allerede diskutert og at strømpriser generelt er billigere om kvelden. I tillegg til dette vil også strømprisene være billigere om natten enn om dagen. Kombinasjonsscenarioet er allerede tilpasset nattlading, dermed vil dette mest sannsynlig lede til en gunstig løsning. Den som har kumulativ lagret nest mest energi er nattscenarioet. Det at natt og kombinasjonsscenarioet har lagret mest energi peker mot at store deler av nytten fra energilageret kommer om vinteren. Dette kan begrunnes fra den tidligere diskuterte energibalansen.

Basert på energinivået på peak shaving gjennom tidsperioden kom det frem at den fort havnet utenfor tofase området. Dette er enten på solid eller flytende form. I praksis kan dette bety at peak shaving ikke har fått fullt utbytte av den latente varmen. Dette er også synlig i den kumulative grafen med at den ikke har ytet like mye som natt og kombinasjonsscenarioet.

Videre er det den originale bruken. Denne vil være hardest rammet av de manglende datapunktene. Dersom datapunktene fjernet hadde en større forskyvning mot opplading kan det være mulig at den har mistet en vesentlig mengde av den kumulativt lagrede energien. Dette kan muligens bli observert fra Tabell 3 der alle verdiene er negative. Dette kan henge sammen grunnet at dersom en verdi i energibalansen er negativ vil det samsvare med en positiv opplading av energilageret. Dermed kan feilmålinger der den faktisk opplader ha blitt fjernet fra den totale datasett listen.

Den som er brukt minst er den som baserer seg på soloverskuddet. Dette gir mening da soloverskuddet øker i takt med at oppvarmingsbehovet synker. Dermed kan rekkevidden av å totalt basere energilageret på å lade overskuddsenergi fra solen være smalere enn de andre.

Energilageret som system har en egen økonomisk påvirkning. De forskjellige økonomiske påvirkningene for alle scenarioene kan bli observert i Figur 22. Verdiene i denne figuren er kostnader og besparelser relatert til opplading og utlading. I løpet av hele tidsperioden krysser de fleste av grafene hverandre. Dette leder også til at flere av scenarioene viser til å være mest økonomiske til forskjellige tider. Den originale bruken av energilageret er på topp gjennom sommeren, ellers er den blant bunnen på resten av tidsperioden. En grunn til at den er på toppen mens det er sommer kan komme av at den blir brukt i større grad enn de andre om sommeren. Den avgir små mengder energi som et slags varmetap. For et mer helhetlig blick kan dette være feil da dette varmetapet muligens bidrar til at bygget krever kjøling. Ellers kan den være blant bunnen grunnet at den varierende bruk opp mot testing.

Det observeres i fra Figur 22 at solscenarioet når toppene sine mellom mars til april og oktober til november. Toppene kan komme av at det er i disse månedene behovet for oppvarming og produksjonen fra solcellene samsvarer mest.

Fra Figur 22 observeres det også at natt og kombinasjonsscenarioet når de høyeste toppene. Dette kan komme av det store kumulative energibehovet de har lagret i tillegg til de høye strømprisene som ZEB-laboratoriet slipper å kjøpe like stor grad av fra strømmnettverket. Peak shaving faller litt imellom toppene og bunnene. Dette kan komme av at den ikke er helt optimalt innstilt og ikke kan opplade eller utlade fullt dersom oppvarmingskurven ikke har stor nok spredningen fra medianen.

Den siste observasjonen fra de økonomiske påvirkningene av kun energilageret er at alle har en lav gunstighet fra mai til september. Dette kan komme av det tidligere diskutert oppvarmingsbehovet som ikke er stort om sommeren. Energittoppene til ZEB-laboratoriet kommer om dagen når det er et lavt overskudd, mens for resten av året dukker energittoppene opp om kvelden.

Den økonomiske forskjellen mellom alle scenarioene måned for måned gjennom hele perioden er presentert i Figur 23. Fra figuren kan størst forskjeller observeres i periodene om vinteren, våren og høsten. Om sommeren er forskjellene små. Dette henger sammen med den tidligere diskutert minimale bruken av energilageret om sommeren, observert i Figur 19. Ellers kan det at den originale er lavere begrunnes med at den historiske dataen er mest rammet av manglende datapunkter. Dette vil bli diskutert videre i feilkildedelen.

Fra Figur 23 skal det bemerkes at nattscenarioet er bak kombinasjonsscenarioet. En grunn til dette kan være de små variasjonene de har fra hverandre økonomisk. Selv om tiden for opplading og utlading kan variere fra de to scenarioene, kan det at energilageret alltid har lagret energi eller alltid vil lagre energi når energinivået er lavt lede til at den har lettere for å uladet når bygget har et oppvarmingsbehov. I tillegg til dette vil det å benytte strømmen fra nettene gi større besparelser om vinteren enn for resten av året grunnet at de store forskjellene i kostnader mellom dag og natt.

I Figur 23 kan det bemerkes at det punktet ZEB-laboratoriet hadde høyest inntekter for alle scenarioene er for april. Dette kan da skyldes uvanlige gode værforhold og produksjon fra solcellene. Men det kan også komme av andre faktorer som høye strømpriser, se april i Vedlegg A.1, sammen med overskuddsolenergi som kan selges til høye inntekter.

Det observeres generelt store avvik mellom scenarioene i årsskifte fra 2023 til 2024 på Figur 23. Dette kan komme av at det originale scenarioet benyttet store mengder fjernvarme til å opprettholde innnetemperaturen i denne tidsperioden. Dette ga utslag til de nye scenarioene. Solsscenarioet hadde ikke noe energi lagret på dette tidspunktet, dermed vises det at å drifte ZEB-laboratoriet uten energilagring vil være mindre gunstig enn å ha et termisk energilager som benyttes. Solsscenarioet er fortsatt over de historiske dataene, men dette kan være mer på grunn av andre faktorer som utbytte av varmpumpen. Dette ledet til et stort bruk av fjernvarme for å dekke oppvarmingsbehovet. Natt og kombinasjon benyttet minst fjernvarme. Dette kan bety at energibehovene var på en generell basis lavere om natten gjennom hele denne perioden. Når det gjelder peak shaving er den rett under. Dette kan komme av at energinivået på det termiske energilageret ikke alltid var tilstrekkelig til å dekke behovene og det gikk tom og dermed ble fjernvarme benyttet.

Tidsperiode satt for denne oppgaven var satt som 01.01.2023 til 31.03.24. Dette ble valgt grunnet det var et ønske om et stort datasett og relevant informasjon. Dette valget gjør at vintermånedene og måneden mars blir overrepresentert i total kalkulasjonene på resultatet i økonomisk, miljø og diverse. Siden vinterperioden har høyest oppvarmingsbehov vil dette mest sannsynlig øke kostnadene og utslippet. Figur 23 viser denne overrepresentasjon av kostander i vinterperioden der ZEB-laboratoriet vil gå i underskudd.

Den totale økonomiske påvirkningen gjennom hele den relevante perioden er presentert i Figur 24 og 25. Den minst økonomisk gunstige av alle scenarioene er det originale scenarioet. Denne løsningen er i hovedsak økonomisk rammet av deres store fjernvarme kostnader. Bygget har brukt mye fjernvarme i det originale scenarioet. Dette kan være grunnet reklamasjonsproblemer med varmpumpen og at den ble utbyttet. Dette vil ikke være en like energieffektiv løsning som varmpumpen og dermed gi større kostnader. Det kan også tydes at energilageret som egen del av den økonomiske påvirkningen er den som har lavest inntekten av alle de andre utelukkert solscenarioet. Dette kan også bety at bruken av energilageret med tanke på økonomiske besparelser heller ikke var den beste.

Solscenarioet er det som har minst inntekter. Men det har mindre utgifter en peak shaving og den originale bruken. Dette kommer mest sannsynlig av alle periodene der det ikke er noen overskudd av solenergi. I disse tidsperiodene ble energilageret ikke brukt. Dermed ender laboratoriet for det meste å kjøre uten et energilager om vinteren når oppvarmingsbehovet mest sannsynlig er størst.

Peak shaving har høye inntekter, men også store kostnader. Den har også et større bruk av fjernvarme enn de andre nye scenarioene. Dette er kanskje motsatt fra det som er forventet da den vil prøve å flate ut kurvene. I en periode som vinteren ender det fort opp med at behovet til bygningen er stort og dermed vil den kreve store mengder energi til oppvarming slik at energilageret går tomt. Dette er noe som har blitt diskutert tidligere, fra dette virker det som at det er en trend at peak shaving scenarioet arbeider utenfor det latente varme området og heller på følbare varme.

De med lavest totale kostnader som er presentert i Figur 25 er nattlading og den kombinerte løsningen. Forskjellen mellom kombinasjon og nattladingsinntekter kan bli observert i Figur 24. Inntektene til kombinasjonsscenarioet er større og kostnadene er mindre. Dette kommer mest sannsynlig av at den bruker solenergien til å lade når det er overskudd, men det er ikke synlig fra måned til måned grunnet den lange tidsperioden som disse verdiene spres ut over. Et tilleggsmoment som kan bli observert i Vedlegg A.1 er at om vinteren er strømprisene generelt dyrere enn resten av året. Dermed vil svingninger mellom dag og natt lede til en større besparelse enn de andre sesongene.

Neste del av denne diskusjonen vil drøfte utslippene fra de forskjellige scenarioene. Disse er presentert i Figur 26. Disse har ikke direkte noe med bruken av energilageret, men heller med hvordan den generelle dynamikken i ZEB-laboratoriet har blitt endret etter bruken. Det totale energibehovet til ZEB-laboratoriet er uendret og de nye løsningene har brukt mer varmpumpe til opplading og oppvarming generelt for bygget. Endringen i den generelle dynamikken ble gjort for å teste ut mer fremtidsrettede rammer til ZEB-laboratoriet. De besparelsene som eventuelt kommer av energilageret spesifikt, er at den blir oppladet av varmepumpen i stedet for fjernvarme. Dermed blir utslippet relatert til fjernvarme lavere og den blir ikke brukt siden den har høyere utslipp. Dette vil begrunne alle forskjeller i utslipp mellom de forskjellige scenarioene. En viktig observasjon fra Figur 26 er at det kan se ut som at ZEB-laboratoriet ikke når målene sine om null utslipp grunnet at de går i null over denne perioden. Dette er mest sannsynlig grunnet at tidsperioden er over et år og tre måneder. Her blir to av vintermånedene telt to ganger. Dette kan lede til at utslippene fra det alle scenarioene har høyere utslipp enn en vanlig årssyklus.

6.5 Feilkilder

I denne delen av diskusjonen vil antagelser og feilkilder bli tatt opp for diskusjon. Eksempler på antagelser og feilkilder som skal diskuteres er mangel på datapunkter, feilmålinger, konstant COP faktor, konstant flyt i energilageret og energilageret har en antatt virkningsgrad på 100 %

For det første, databasen som oppgaven henter verdiene sine fra mangler en signifikant mengde med datapunkter i spesifikke tidsperioder. Manglene trenger ikke nødvendigvis å overlappe, dermed for at et tidspunkt i tidsperioden skal være gyldig må alle de forskjellige målingene ha registrert et tall. I Figur 20 presenteres et overordnet blikk av antall manglende datapunkter som er i forskjellige dager. Månedene august 2023, desember 2023 og februar 2024 er månedene med færrest datapunkter. I august 2023 kan det komme av at det var en uke der solcellene ikke fungerte og som konsekvens var det ingen data på solproduksjon. Årsaken til manglende datapunkter i februar 2024 kan komme av at en ny varmepumpe ble installert og datamålingene ble ikke lagret som konsekvens. Det er viktig å påpeke at noen ganger kan disse verdiene bli antatt til null, men det ble vurdert til at å anta feil nummer vil ha en verre konsekvens enn å se bort fra dem totalt sett.

Når generelle data skal sammenlignes ble det prøvd å sammenligne data der det er færrest mulig manglende datapunkter som strakk seg over en uke. I første del av diskusjonen der Figur 9, 11, 10 og 12 ble presentert var dette for perioder som kan bli sett på varmekartet i Figur 20. Dette er historiske data og er upåvirket av at datapunkter er fjernet basert på utregninger time for time. Figuren påvirker ikke dynamikkdelen grunnet til at datasettet ble behandlet separat og punkter ble fjernet på flere basiser.

For scenarioene hadde manglene på datapunkter en tydeligere påvirkning. Simulasjonen kjørte alltid som om det var time for time og tok ikke i betraktning at døgn eller noe ble hoppet over for å simplifisere kodingen. Dette betyr at flyten i de nye scenarioene er litt kunstig etter de lange strekningene som mangler mange datapunkter da alt blir ansett til å være urørt i den perioden. Dette påvirker ikke så mye i det første tilfellet i begynnelsen av året når de sammenlignes mot hverandre, der er det bare tre manglende datapunkter i den strekningen. Videre for det neste tilfellet i april 2023 var det også tre punkter som manglet. Den siste sammenligningen i juli 2024 hadde ingen manglende punkter. De manglende punktene kan ikke bli observert i figurene.

Måten de manglende datapunktene påvirker resultatene på er ved energinivå status. Dersom en strekning med høyt energibehov ble hoppet over grunnet mangler fra datasettet ville den brukte energien fra oppvarmingen ikke bli registeret. Det samme gjelder også andre strekninger med lavt eller moderat energibehov. Der det kanskje har størst påvirkning er i beregningene av de månedlige summene. Mangelen på punkter her vil lede til at det blir et mindre presist svar. Dette gjelder også for alle total summene, men til en mindre grad.

For det andre har det blitt observert usikkerheter i noen av målingene på InfluxDb. Vedlegg C er et eksempel der den gjennomsnittlige temperaturen til energilageret er høyere enn turtemperaturen i de fleste oppladningsscenarioene. Det tilsvarer ikke med teorien. Gjennomsnittstemperaturen er konsekvent høyere enn forventet. Dette kan også bli observert i testene på de nye turtemperaturen i Vedlegg B.4. Den teoretiske varmeoverføringen som trengs er presentert i Tabell 6. For en utlading på -3 kW krever den en temperaturrendring på $-0,56 \text{ }^\circ\text{C}$. Fra testene er temperaturredifferansen mellom turvannet og gjennomsnittstemperaturen $-5 \text{ }^\circ\text{C}$. Dette peker mot at det ikke er treg varmeledningen i energilageret som er problemet.

En av årsakene til usikkerheten rundt nøyaktigheten er at gjennomsnittstemperaturen tar i betraktning mange forskjellige komponenter i energilageret. Denne feilkilden kan forklare det høye smeltepunktet til biovoksen. I tillegg kan det forklare hvordan den kubiske interpolasjonen og minste kvadratiske modellene viser for lav turtemperatur mot gjennomsnittstemperaturen ved oppladning.

Majoriteten av datapunkter hentet fra influxDB er timebaserte som fører til unike utfordringer. De historiske dataene oppgaven baserer seg primært på er mellom 01.01.2023 og 31.03.2024. Dataen hentet i den perioden var timebasert, for eksempel volumstrømmen per time og temperaturen i bygningen en time klokka 02.00.00 dato 02.02.23. Disse verdiene var et gjennomsnitt av målinger målt den timen og viser ikke et presist bilde av historien. For å unngå ekstra feilinformasjon har spesifikke data blitt undersøkt i dybden som vil si målinger i minuttet for å ikke miste sammenhengen. På den andre siden hadde det ikke vært gunstig å ta alle punktene i minutt for minutt grunnet at de fleste individuelle rekkene i datasettet hadde mange manglende datapunkter.

Til slutt vil feilkilder angående de forskjellige antagelsene bli diskutert. En antagelse var at hele systemet hadde null varmetap og 100 % virkningsgrad på energilageret. Dette ble bestemt for å forenkle beregninger gjennom oppgaven. En annen antagelse som ble brukt var at temperaturen til biovoksen var homogen. I virkeligheten er det slik at varmeoverføringen innad i biovoksen er påvirket av ledningsevnen, se Tabell 1. Dette betyr at dersom et punkt smelter vil den ikke holde konstant temperatur. Den vil heller fortsette å øke grunnet at den har gjennomgått sin latent varme. Dette gjelder også platene inni energilageret. Disse vil være påvirket av en endrende vanntemperatur gjennom dem. Dette er en antagelse som viste seg å være upresist grunnet beregning av Biot-tallet er imellom 0,34 og 0,36. For at systemet skal antas å lik temperatur må Biot-tallet være lik eller mindre enn 0,1. Dette betyr energilageret er for stort til å anta at temperaturen er likt fordelt over hele systemet.

7 Konklusjon

Konklusjonen til denne oppgaven er at med den tidligere bruken av det termiske energilageret burde og kan det fastsettes en modell og et rammeverk for videre bruk. En maks opplading på 10 kW og en maks utlading på -8 kW ble valgt som grenser for energilageret basert på modelleringene som plottet effekt mot energinivå og turtemperatur. Konklusjonen rundt rammeverket og modelleringene er at de er tilpasset behovene for denne oppgaven, men at det fortsatt er usikkerhet rundt bruken av gjennomsnittstemperaturen for energinivå.

Denne bacheloroppgaven hadde som hensikt å utforske hvordan historisk data kan forbedre bruken av det termiske energilageret på ZEB-laboratoriet som benytter en PCM. Dette skulle besvares med hensyn på energi- og kostnadsbesparelser i tillegg til ZEB-laboratoriets mål om nullutslipp. I den sammenheng ble det testet fem scenarioer, hvor ett av dem var det originale scenarioet som er basert på den historiske dataen og fire av dem er nye. De fire nye scenarioene var å kun lade dersom det var overskuddsenergi fra solcellene, kun opplading om nettene, en kombinasjon av dette og et scenario som siktet etter å glatte oppvarmingsbehovet i størst mulig grad. De forskjellige scenarioene ble testet opp mot kumulativt bruk, kostnadsbesparelser og utslipp.

Avsluttende konkluderes det med at kombinasjonsscenarioet er den mest gunstige løsningen basert på simulasjoner som ble kjørt i oppgaven. Natladingen presterte også bra både økonomisk og miljømessig. Dette viser til viktigheten av å benytte riktig tid på døgnet om vinteren når strømmen ellers er dyr og behovet er høyt. Kombinasjonsscenarioet innebærer å opplade når det er overskudd med solenergi og opplading om natten når energinivået er lavt. Ellers vil den utlade når det er et oppvarmingsbehov. Kombinasjonsscenarioet hadde den mest økonomiske løsningen da den hadde høyest inntekter og lavest kostnader totalt sett gjennom hele året. I tillegg til dette viste denne bruken av energilageret en evne til å tilpasse byggets varierende behov gjennom året. Dette gjorde at bygget kunne i stor grad unngå å benytte fjernvarme ved å fokusere på først benytte varmepumpen til opplading av energilageret og oppvarming av bygget. Dette scenarioet vil bidra til en mer miljøvennlig løsning som hjelper ZEB-laboratoriet mot nullutslipp.

7.1 Fremtidig arbeid

For fremtidig arbeid anbefales det å utforske vider på PCM dynamikken. Dette innebære forskjellige matematiske metoder og andre målinger å undersøke. Minste kvadratiske metode og kubisk interpolasjon klarte ikke å kalkulere presise verdier for energilagerets varmeeffekt basert på turtemperatur og energinivå. Årsaken kan være overtilpassing og upresise temperaturmålinger. Dersom kubisk interpolasjon benyttes anbefales det å bruke andre evalueringmodeller som residualanalyse og kryssvalidering for å undersøke gyldigheten til splinefunksjonen. I tillegg kan det undersøkes andre matematiske metoder.

Den samme matematiske modellen som plottet varmeeffekt mot energinivå og turtemperatur anbefales til videre bruk. Det bør gjøres en stor forandring på hvordan energinivået blir kalkulert. Det anbefales å bruke å biovoksttemperatur i stedet for gjennomsnittstemperatur. Grunnet utfordringer nevnt i diskusjonsdelen om gjennomsnittstemperaturen kan biovoksttemperaturen være et bedre grunnlag for modellene. En ny metode kan vær å benytte de forskjellige målingene de har innvendig i biovoksen for å bestemme når de forskjellige delene av energilageret har gått gjennom tofase området. Dette fastsetter hvilke deler av biovoksen som er solid, flytende og tofase, og vil dermed gi en mer nøyaktig beregning av energinivå med bruk av faseovergang entalpidifferansen. Dette kan benyttes til å kalkulere et mer presist energinivå. Eventuelt kan målinger i InfluxDB bli brukt da de nylig har lagt til egne målinger for dette. Denne løsningen vil muligens bli mer presis over tid da tidsperioden for denne målingen ikke strekkes langt enda.

Til slutt anbefales det at tester blir kjørt på de rammeverkene og kombinasjonsscenarioet som har blitt konkludert mest gunstig. Dersom det fungerer kan det være nyttig å bygge på modellen med å kalkulere energinivået og kjøre flere tester. Testene bør gjerne strekkes over flere dager der den har mulighet til å både opplade overskuddsenergi fra solen i tillegg til perioder der det den får behov for å opplade om natten. Fra fjorårets data vil dette tilsvare en test i løpet av høsten.

Avsluttende for denne bacheloroppgaven vil rammeverket satt her skape en betydelig forbedring av det termiske energilageret. En optimalisering av det termiske energilageret kan bety at ZEB-laboratoriet får energi- og konstandsmessig besparelser samt at de jobber mot sitt mål om nullutslipp.

Bibliography

- Beceiro, Jorge Salgado (Dec. 2022). ‘Thermochemical Energy Storage: The next generation thermal batteries?’ en-GB. In: *#SINTEFblog*. URL: <https://blog.sintef.com/sintefenergy/thermochemical-energy-storage-the-next-generation-thermal-batteries/> (visited on 22nd Apr. 2024).
- Burheim, Odne Stokke (2017). *Engineering energy storage*. Joe Hayton.
- Fjernvarme (2024). URL: <http://www.fjernvarme.no/fakta/fjernvarme> (visited on 29th Apr. 2024).
- Fjernvarme — Statkraft (2024). no. URL: <https://www.statkraft.com/var-virksomhet/fjernvarme/> (visited on 29th Apr. 2024).
- Fjernvarmeanlegget i Trondheim — Statkraft Varme (2024). no. URL: <https://www.statkraftvarme.no/om-statkraftvarme/fjernvarmeanlegg/trondheim/> (visited on 16th May 2024).
- Forskningsrådet (19th May 2022). *Løsninger for energibruk i bygg og bebygde områder*. no. URL: <https://www.forskningsradet.no/portefoljer/energi-transport-og-lavutslipp/portefoljeanalysen-for-energi-transport-og-lavutslipp/analyse-og-vurdering-av-delfortefolje/energi-og-lavutslipp/energibruk-i-bygg-og-industri/> (visited on 15th May 2024).
- Ghadikolaie, Saeed Siah Chehreh (2021). ‘An enviroeconomic review of the solar PV cells cooling technology effect on the CO2 emission reduction’. In: *Solar Energy* 216, pp. 468–492.
- Gridx (2024). *Peak shaving: Everything you need to know – gridX*. URL: <https://www.gridx.ai/knowledge/peak-shaving> (visited on 23rd Apr. 2024).
- Hawkins, Douglas M (2004). ‘The problem of overfitting’. In: *Journal of chemical information and computer sciences* 44.1, pp. 1–12.
- Helseth, Lars Egil (2024). *varmekapasitet*. URL: <https://snl.no/varmekapasitet> (visited on 20th May 2024).
- Hofstad, Knut (Jan. 2024). *varmepumpe*. no. URL: <https://snl.no/varmepumpe> (visited on 1st May 2024).
- Holden, Helge and Øystein B. Dick (June 2023). *spline*. no. URL: <https://snl.no/spline> (visited on 16th May 2024).
- Jeon, Jisoo et al. (Jan. 2013). ‘Application of PCM thermal energy storage system to reduce building energy consumption’. en. In: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 111.1, pp. 279–288. ISSN: 1572-8943. DOI: 10.1007/s10973-012-2291-9. URL: <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2291-9> (visited on 20th Mar. 2024).
- Kalogirou, Soteris A. (2014). *Solar Energy Engineering Processes and Systems Second Edition*. Elsevier.
- Løvås, Gunnat G. (2021). *Statstikk FOR UNIVERISTETER OG HØGSKOLER 4. UTAGVE*. Universitetsforlaget.
- Miljødirektoratet (2024a). *FNs klimapanel med kraftfull rapport om klimaløsninger*. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/aktuelt/nyheter/2022/april-2022/fns-klimapanel-med-kraftfull-rapport-om-klimaløsninger/> (visited on 13th May 2024).
- (2024b). *Hovedfunn i første del i sjette hovedrapport*. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/fns-klimapanel-ipcc/dette-sier-fns-klimapanel/sjette-hovedrapport/hovedfunn-forste-del-sjette-hovedrapport/> (visited on 13th May 2024).
- (2024c). *ZEB-definisjonen*. URL: <http://zeb.no/index.php/no/om-zeb/zeb-definisjoner> (visited on 13th May 2024).
- Mjønerud, Ingunn (2024). *Slik bestemmes dagens strømpris*. URL: <https://xn--strm-ira.no/dagens-str%C3%B8mpri> (visited on 5th May 2024).
- Moran, Michael J. (2021). *Moran’s PRINCIPLES OF ENGINEERING THERMODYNAMICS 8th EDITION*. WILEY.
- Nocente, A et al. (Nov. 2021). ‘The ZEB Laboratory: the development of a research tool for future climate adapted zero emission buildings’. en. In: *Journal of Physics: Conference Series* 2069.1, p. 012109. ISSN: 1742-6588, 1742-6596. DOI: 10.1088/1742-6596/2069/1/012109. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2069/1/012109> (visited on 26th Apr. 2024).
- Norheim, Ian (2022). *Kompendium Elektriske energisystemdelen i emnet FENG2001 Elektriske energisystem og fjernvarme*. NTNU.
- NTNU, Sintef og (n.d.). *Innovasjoner i ZEB-laboratoriet*. Brochure. URL: https://www.sintef.no/globalassets/sintef-byggforsk/zeb_innovasjonsbrosjyre_skjermvisning.pdf.

-
- NVE (2024). *Energibruk i bygg*. URL: <https://www.nve.no/energi/energisystem/energibruk/energibruk-i-bygg/s> (visited on 13th May 2024).
- platform, entso-e transparency (2024). *Day-ahead Prices*. URL: [https://transparency.entsoe.eu/transmission-domain/r2/dayAheadPrices/show?name=&defaultValue=false&viewType=GRAPH&areaType=BZN&atch=false&dateTime.dateTime=17.05.2024+00:00%7CCET%7CDAY&biddingZone.values=CTY%7C10YNO-0-----C!BZN%7C10YNO-3-----J&resolution.values=PT15M&resolution.values=PT30M&resolution.values=PT60M&dateTime.timezone=CET_CEST&dateTime.timezone_input=CET+\(UTC+1\)+/+CEST+\(UTC+2\)](https://transparency.entsoe.eu/transmission-domain/r2/dayAheadPrices/show?name=&defaultValue=false&viewType=GRAPH&areaType=BZN&atch=false&dateTime.dateTime=17.05.2024+00:00%7CCET%7CDAY&biddingZone.values=CTY%7C10YNO-0-----C!BZN%7C10YNO-3-----J&resolution.values=PT15M&resolution.values=PT30M&resolution.values=PT60M&dateTime.timezone=CET_CEST&dateTime.timezone_input=CET+(UTC+1)+/+CEST+(UTC+2)) (visited on 3rd Apr. 2024).
- Rosvold, Knut A. and Knut Hofstad (Jan. 2023). ‘energilagring’. no. In: *Store norske leksikon*. URL: <https://snl.no/energilagring> (visited on 22nd Apr. 2024).
- Sevault, Alexis, Fabian Bøhmer et al. (2019). ‘Latent heat storage for centralized heating system in a ZEB living laboratory: integration and design’. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 352. 1. IOP Publishing, p. 012042.
- Sevault, Alexis, Hanne Kauko et al. (2017). *Phase change materials for thermal energy storage in low- and high-temperature applications: a state-of-the-art*. eng. Accepted: 2018-04-26T09:29:08Z Publication Title: 53. SINTEF Energi AS. ISBN: 978-82-594-3684-9. URL: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/2496080> (visited on 22nd Apr. 2024).
- Sevault, Alexis and Erling Næss (2020). ‘Active latent heat storage using biowax in a central heating system of a ZEB living lab’. In: *Proceedings of the 14th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants*. IIR.
- Shamseddine, I et al. (2022). ‘Supercooling of phase change materials: A review’. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158, p. 112172.
- Sharma, S Dutt and Kazunobu Sagara (2005). ‘Latent heat storage materials and systems: a review’. In: *International journal of green energy* 2.1, pp. 1–56.
- SINTEF (2024). *PRESAV – Prediktive styringsstrategier til aktiv varmelagring i bygninger*. URL: <https://www.sintef.no/prosjekter/2021/presav-prediktive-styringsstrategier-til-aktiv-varmelagring-i-zeb-laboratoriet/> (visited on 15th May 2024).
- Sintef (2024a). *Energy Solutions*. URL: https://zeblab.sintef.no/wiki/Energy_Solutions (visited on 13th May 2024).
- (2024b). *ZEB-laboratoriet*. URL: <https://www.sintef.no/laboratorier/zeb-lab/> (visited on 13th May 2024).
- Statistikk, TMA4240/TMA4245 (2024). *Minste kvadraters metode*. URL: <https://tma4245.math.ntnu.no/enkel-line%C3%A6r-regresjon/minste-kvadraters-metode/> (visited on 15th May 2024).
- Statkraft (2024). *Priser*. URL: <https://www.statkraftvarme.no/kundeservice/priser/> (visited on 20th Apr. 2024).
- Statsbygg (1st July 2011). ‘PROSJEKTERINGSANVISNING PA 0802 TVERRFAGLIG MERKESYSTEM (TFM)’. In: p. 19.
- The increasing importance of demand-side flexibility – gridX* (2024). URL: <https://www.gridx.ai/knowledge/demand-side-flexibility> (visited on 23rd Apr. 2024).
- TMA4240 (2024). *Modellantagelser i enkel lineær regresjon*. URL: <https://tma4245.math.ntnu.no/enkel-line%C3%A6r-regresjon/modellantagelser/> (visited on 15th May 2024).
- Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghajar (2020). *HEAT AND MASS TRANSFER:FUNDAMENTALS & APPLICATIONS SIXTH EDITION IN SI UNITS*. Mc Graw Hill.
- ZEB-laboratoriet* (2024). no. URL: <https://www.sintef.no/laboratorier/zeb-lab/> (visited on 29th Feb. 2024).

Appendix

A Pris

A.1 Strømpris

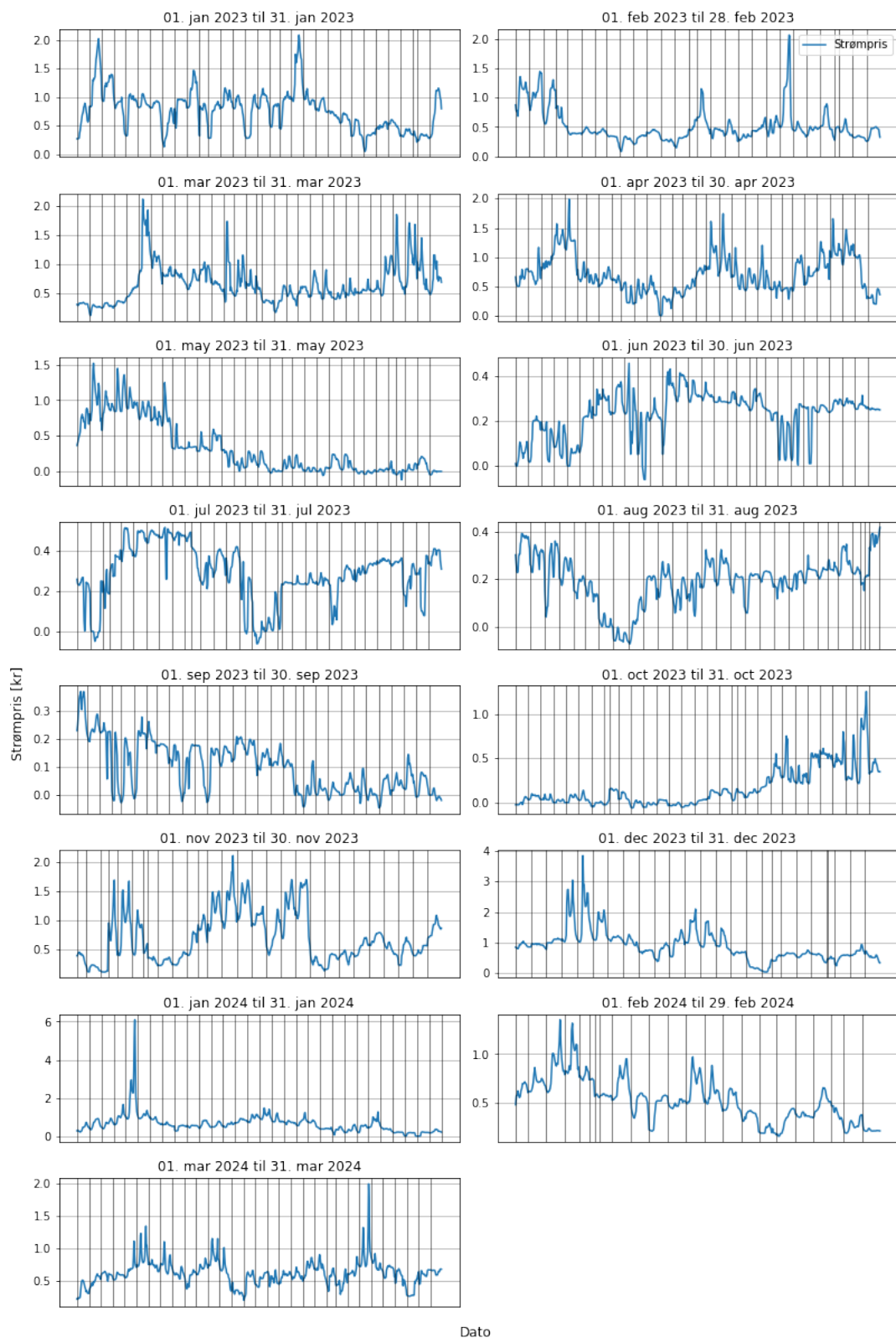


Figure 27: Strømpriser gjennom hele tidsperioden for prosjektet. (platform 2024)

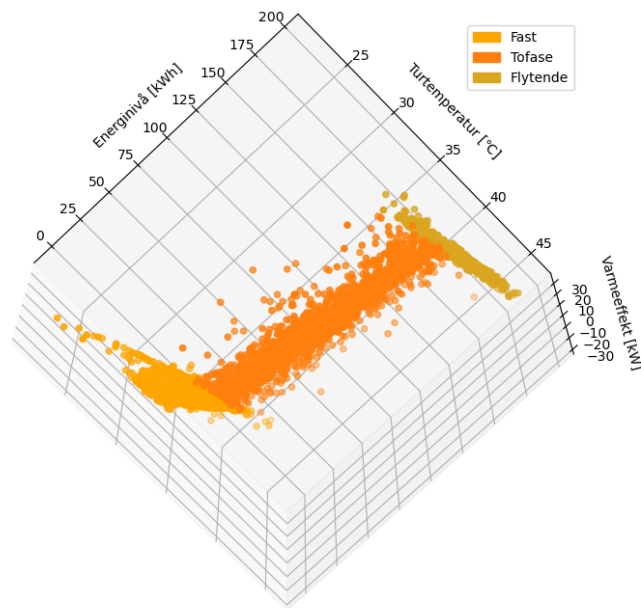
A.2 Fjernvarme pris

Table 9: Tabellen i vedlegget viser fjernvarme prisen i tidsperioden Jan 2023 til Mars 2024.

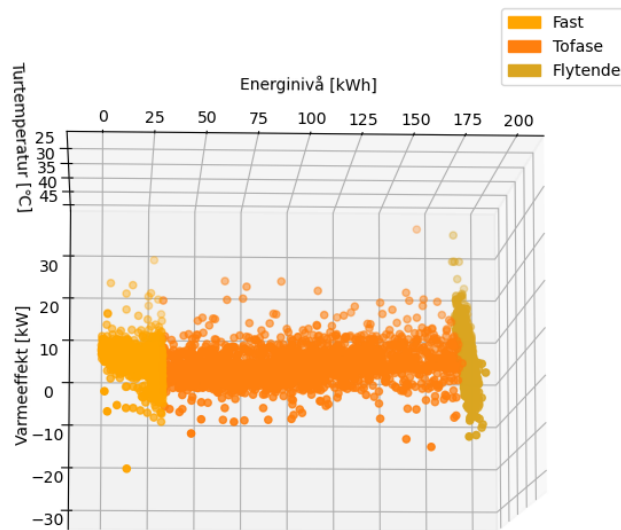
Måned	Fjernvarme pris [kr]
Jan 2023	0.696
Feb 2023	0.487
Mar 2023	0.642
Apr 2023	0.696
May 2023	0.318
Jun 2023	0.235
Jul 2023	0.286
Aug 2023	0.200
Sep 2023	0.099
Oct 2023	0.163
Nov 2023	0.654
Dec 2023	0.792
Jan 2024	0.644
Feb 2024	0.502
Mar 2024	0.612

B Vinkler på 3D figurere

B.1 Vinkler for 3D spenningsplottet



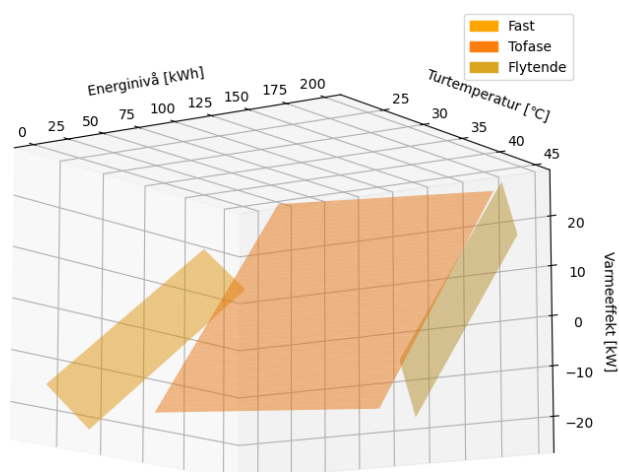
(a) Side vinkel.



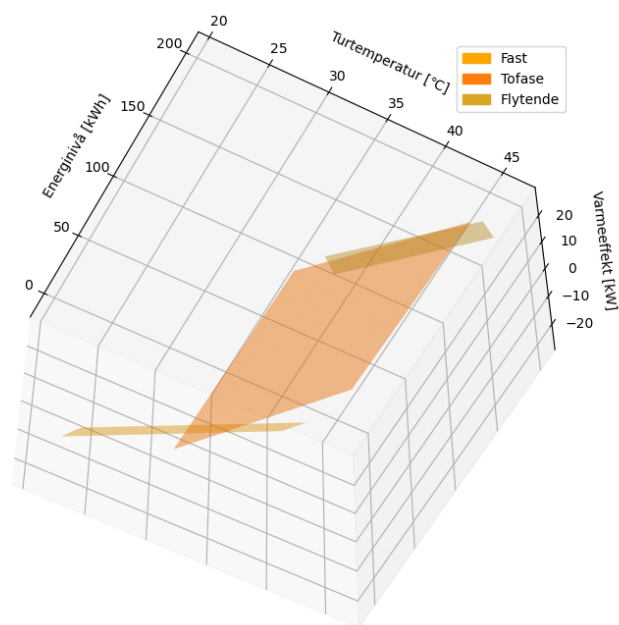
(b) Horisontal vinkel.

Figure 28: Forskjellige vinkler på spredningsplottet for PCM

B.2 Vinkler for minste kvadratiske metode 3D plott



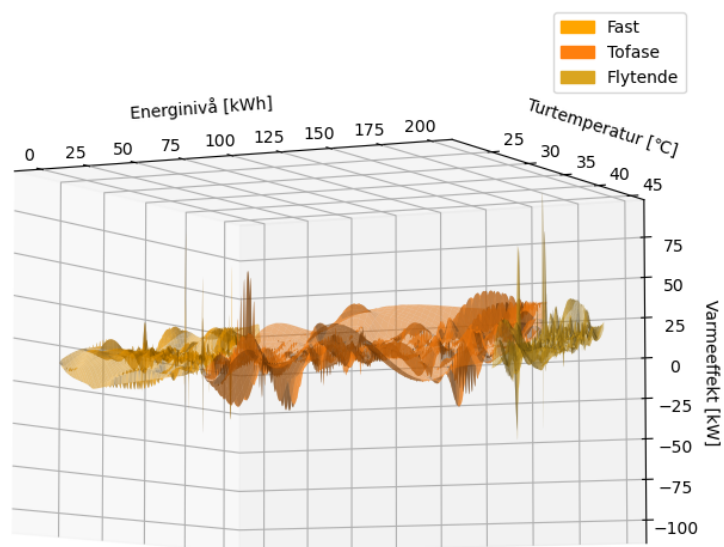
(a) Horizontal vinkel.



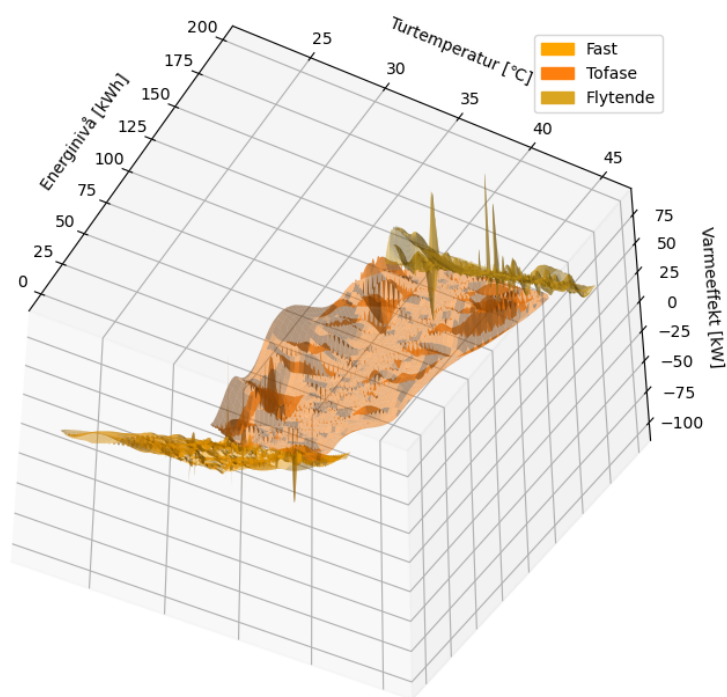
(b) Vinkel nede ifra.

Figure 29: Flere vinkler på minste kvadratiske metode modellen.

B.3 Vinkler for kubisk interpolasjons 3D plott



(a) Horisontal vinkel.



(b) Vinkel nede ifra.

Figure 30: Viser vinkler på kubisk interpolasjon modellenn.

B.4 Visualisering av energilagerets rammeverk med analytiske ligningene til minste kvadratiske metode

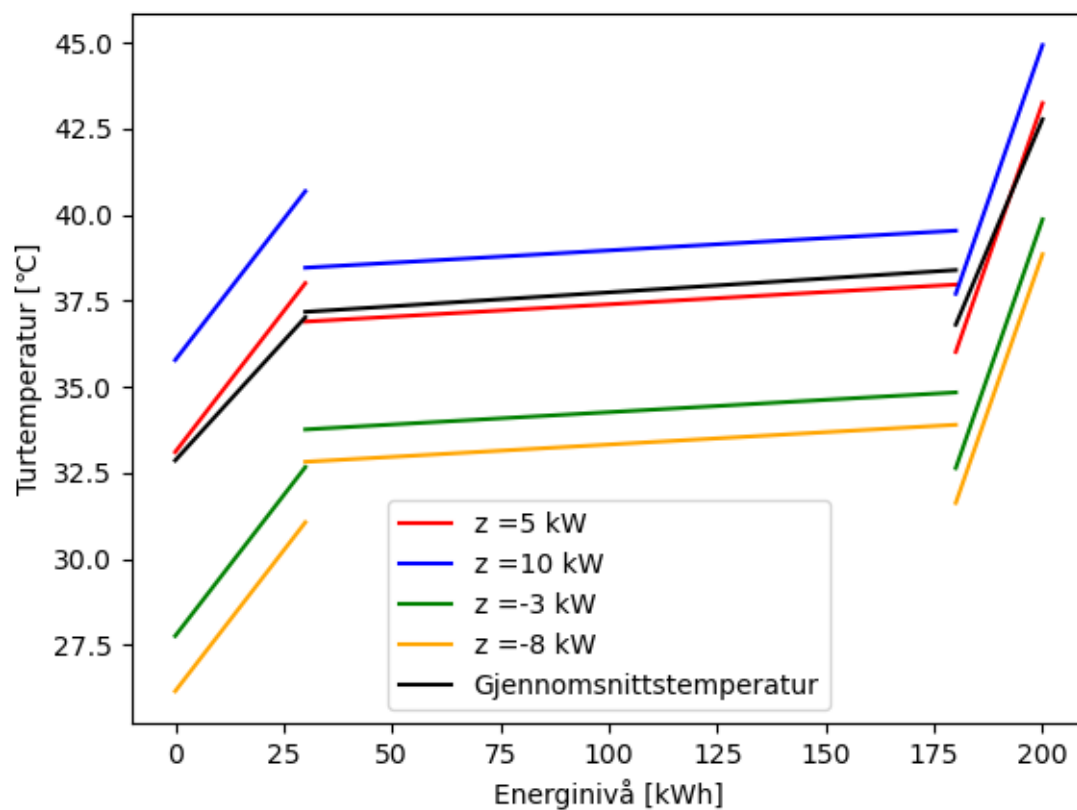


Figure 31: Et plott basert på analytiske ligningene til minste kvadratiske metode.

B.5 Visualisering av energilagerets rammeverk med analytiske ligningene til kubisk interpolasjon

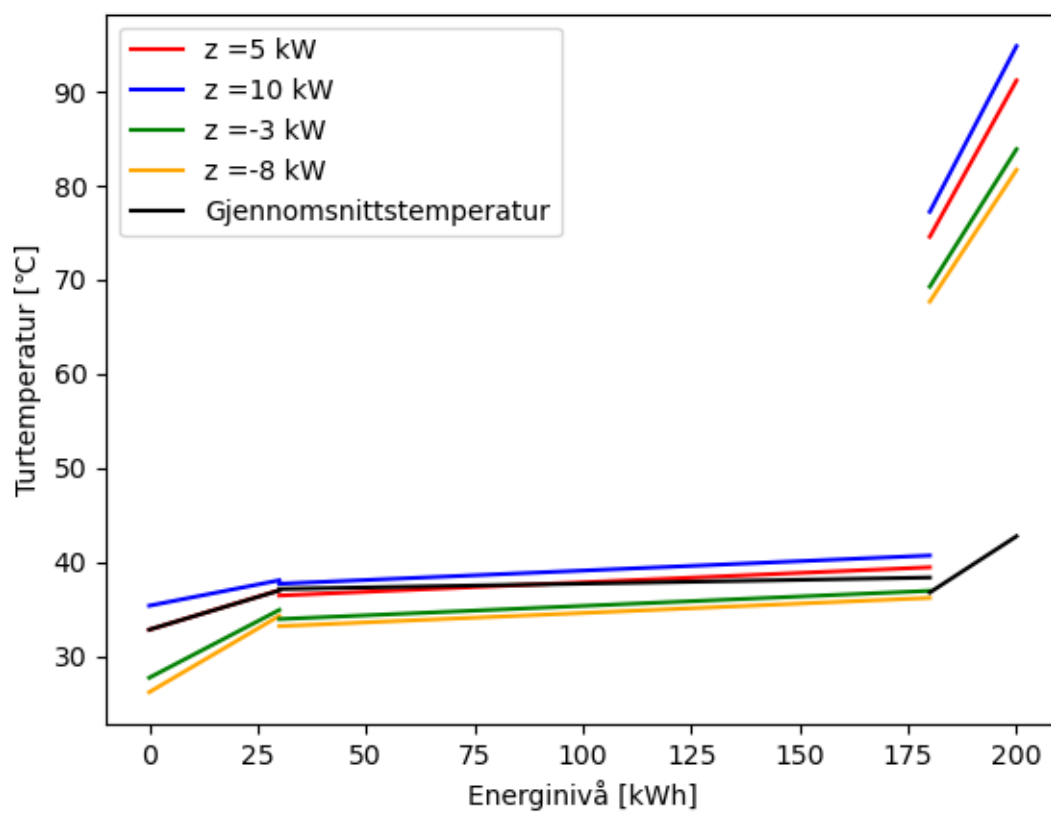


Figure 32: Et plott basert på analytiske ligningene til minste kvadratiske metode.

C Gjennomsnitts-, tur- og returtemperatur til energilageret

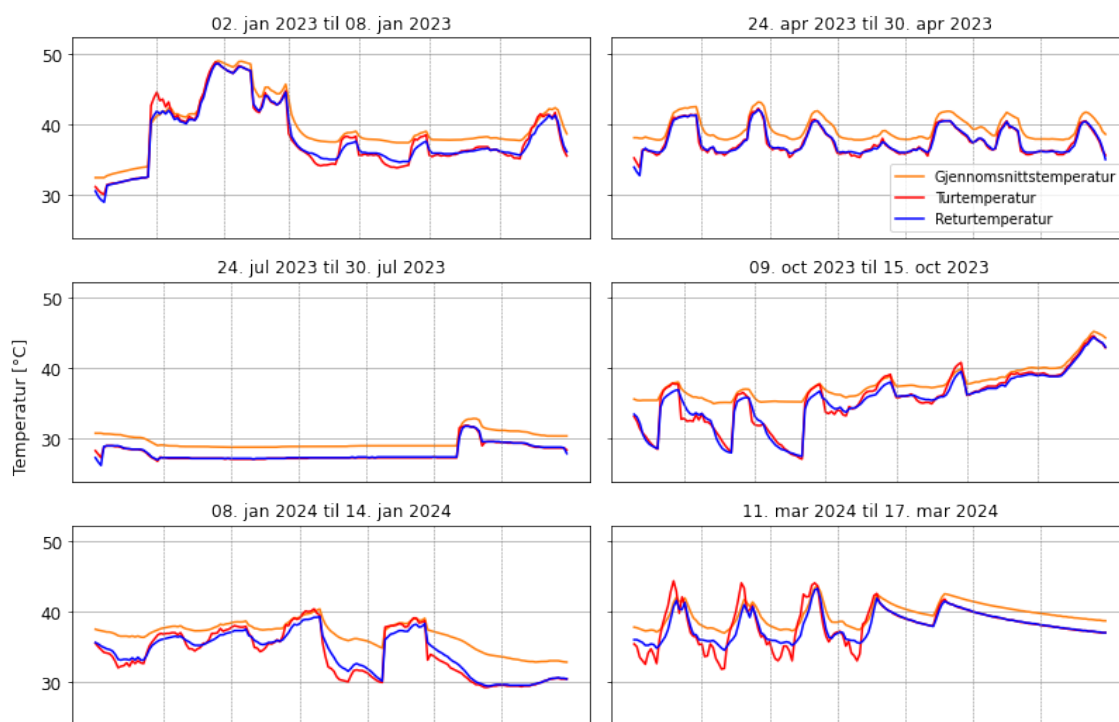


Figure 33: Eksempler på forholdet mellom gjennomsnittstemperaturen til energilageret og tur og returtemperaturen til vannet.

D Systemskjema og ventil

D.1 Systemskjema

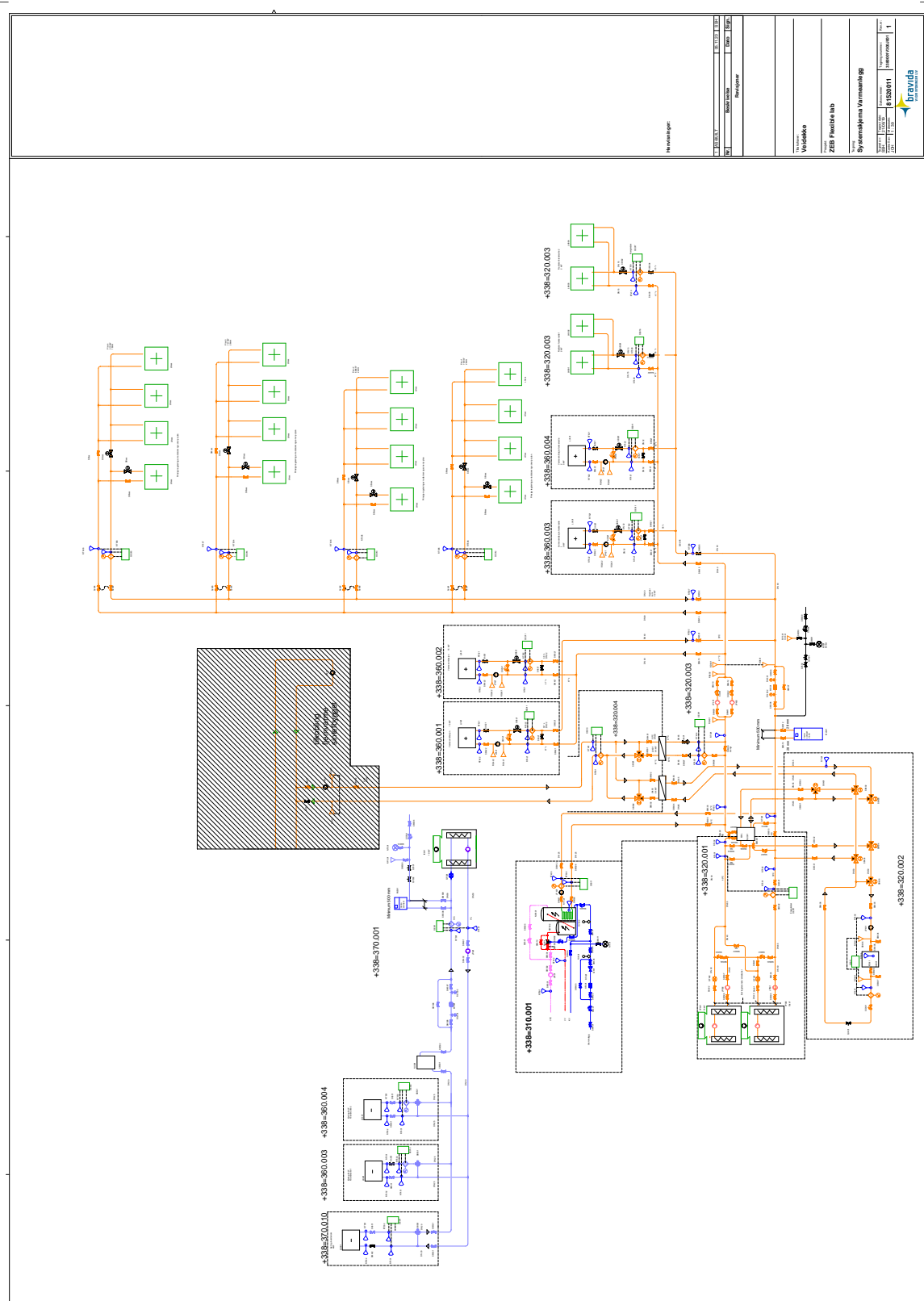


Figure 34: SINTEF's systemskjema varme og sanitær av ZEB-lab

D.2 Ventil

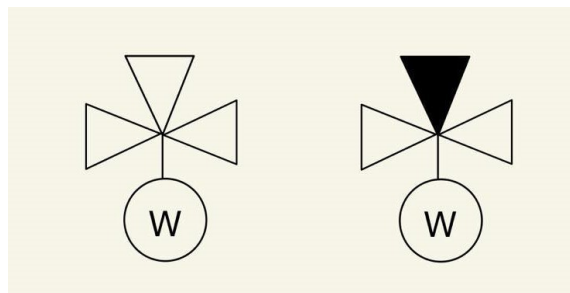


Figure 35: Ventil-skisse

