

Mona Skar Baglo  
Caroline Berntsen Markeng

# Mulighet for energieffektivisering og bærekraftig drift av bygningsinstallasjoner gjennom kosteffektive tiltak

Masteroppgave i Energi og Miljø  
Veileder: Natasa Nord  
Juni 2022



Mona Skar Baglo  
Caroline Berntsen Markeng

# **Mulighet for energieffektivisering og bærekraftig drift av bygningsinstallasjoner gjennom kosteffektive tiltak**

Masteroppgave i Energi og Miljø  
Veileder: Natasa Nord  
Juni 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for energi- og prosessteknikk



Kunnskap for en bedre verden



## MASTEROPPGAVE

for

Mona Skar Baglo og Caroline Berntsen Markeng

Vår 2022

### **Mulighet for energieffektivisering og bærekraftig drift av bygningsinstallasjoner gjennom kosteffektive tiltak**

*Possibilities for energy efficiency and sustainable building operation through cost-effective measures*

#### **Bakgrunn**

En stor del av den fremtidige bygningsmassen eksisterer allerede. Krav til energieffektivisering og bærekraftig energiforsyning i bygninger har økt betydelig de siste årene. En god del av eksisterende kontor- og utdanningsbygninger er bygget på 70- og 80-tallet og tilfredsstiller ikke dagens krav. Dette gjelder for flere av byggene på NTNU og universitetet har som mål å redusere sitt energiforbruk med 50 % per årsverk innen 2030. NTNU har også som mål å redusere sitt klimafotavtrykk. En kombinasjon av mindre renovering og bedre styring kan bidra til å redusere energiforbruket og klimafotavtrykket på campus. Relevante tiltak kan være bedre styring mellom ventilasjon og radiatorsystem eller andre styringsstrategier av ventilasjonssystemet. Bygningssimuleringsverktøy kan brukes til å predikere energiforbruket til et bygg og derfor identifisere potensial for energibesparelse. Renovering eller tiltak kan testes i simuleringsverktøy og verifisere potensialet. Et referansebygg som representerer bygg bygget mellom 1971 og 1999 på NTNU Gløshaugen er utviklet i en tidligere masteroppgave. Referansebygget er modellert i IDA ICE og skal benyttes videre for å identifisere aktuelle ENØK-tiltak på NTNU.

#### **Mål**

Hovedmålet med oppgaven er å simulere og definere relevante effekt- og energieffektiviseringstiltak for typiske universitetsbygninger. Ved å evaluere tiltakene med hensyn til energi, effekt, inneklimate, lønnsomhet og klimafotavtrykk, skal en tiltakspakke anbefales for bygningskohorten.

#### **Opgaven bearbejdes ut fra følgende punkter:**

1. Teoretisk bakgrunn og litteraturstudie av energibruk og energieffektivisering i eksisterende kontor- og utdanningsbygninger, samt ventilasjonskonsepter, styring av energi- og ventilasjonssystem.
2. Forbedre eksisterende modell i IDA-ICE.

3. Definere relevante effekt- og energieffektiviseringstiltak.
4. Simulere de definerte effekt- og energieffektiviseringstiltakene i IDA-ICE.
5. Utføre en detaljert analyse av resultatene fra punkt 4.
6. Utvikle reelle modeller for energipris og vurdere lønnsomhet av de definerte tiltakene.
7. Evaluere tiltakenes klimafotavtrykk sammenliknet med nåværende drift.
8. Sammenlikne energibesparelse, effektbesparelse, inneklime, lønnsomhet og klimafotavtrykk for de definerte tiltakene som grunnlag for å anbefale en tiltakspakke.
9. Evaluere den anbefalte tiltakspakken.

Belastningen på oppgaven utgjør 30 studiepoeng.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med innholdsfortegnelse, sammendrag, konklusjon, litteraturliste, etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesing av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, og at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte og diskuteres utførlig.

Det forutsettes at kandidaten på eget initiativ etablerer et tilfredsstillende kontaktforhold med faglærer og eventuelle veileder(e).

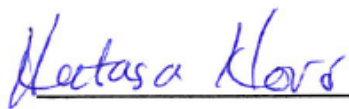
Risikovurdering av kandidatens arbeid skal gjennomføres i henhold til instituttets prosedyrer. Risikovurderingen skal dokumenteres og inngå som del av besvarelsen. Hendelser relatert til kandidatens arbeid med uheldig innvirkning på helse, miljø eller sikkerhet, skal dokumenteres og inngå som en del av besvarelsen. Hvis dokumentasjonen på risikovurderingen utgjør veldig mange sider, leveres den fulle versjonen elektronisk til veileder og et utdrag inkluderes i besvarelsen.

I henhold til "Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet" ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.

Leveringsfrist: 11. Juni 2022

- Arbeid i laboratorium (vannkraftlaboratoriet, strømningsmeknikk, varmeteknikk)
- Feltarbeid

Institutt for energi- og prosesseteknikk, januar 2022



Natasa Nord  
Faglærer/veileder

## Forord

Denne masteroppgaven er det avsluttende arbeidet på sivilingeniørprogrammet Energi og Miljø ved NTNU. Oppgaven er skrevet ved institutt for energi- og prosessteknikk, og krediteres med 30 studiepoeng. Hovedmålet med oppgaven er å identifisere og anbefale ENØK-tiltak til bygg på Gløshaugen ved bruk av bygningssimuleringsprogrammet IDA ICE. Arbeidet tar utgangspunkt i og er en videreføring av prosjektoppgaven skrevet høsten 2021 om samme tema.

Først ønsker vi å rette en takk til vår veileder Natasa Nord, som har gitt oss muligheten til å utforme oppgaven selv. Vi setter stor pris på alle faglige diskusjoner og nyttige råd på veien. Videre ønsker vi å takke Eirik Andre Nesgård og Minh Huy Ngo som i sin masteroppgave utviklet IDA ICE-modellen brukt i denne oppgaven. Det har lagt grunnlaget for vårt arbeid. I tillegg vil vi takke Øystein Engan fra NTNU drift for raske svar på våre spørsmål knyttet til drift og styring av ventilasjon på NTNU. Takk til David Brodawski fra Systemair for prisoverslag.

Avslutningsvis, vil vi takke medstudenter for en fantastisk mastertid, både med tanke på faglig utveksling, og ikke minst mye hygge på lesesal. En siste takk til familie, venner og partnere for støtte og oppmuntring gjennom hele studietiden.

Mona Skar Baglo  
Caroline Berntsen Markeng  
juni 2022





## Sammendrag

NTNU har et mål om å redusere sitt energiforbruk og klimafotavtrykk med 50 % innen 2030 (NTNU, 2020). Dette skal gjøres ved å implementere ENØK-tiltak med tilbakebetalingstid lavere enn 5 år. For å undersøke energisparepotensialet for bygningsmassen på NTNU Gløshaugen brukes et referansebygg i IDA ICE. Referansebygget representerer en bygningskohort med bygg bygget mellom 1971 og 1999. Etter kalibrering av referansebygget avviker energiforbruket 0,09 % fra det faktiske energiforbruket.

Fem energieffektiviseringstiltak, utarbeidet ved analyse av referansebygget er implementert og simulert i IDA ICE. Tiltakene inkluderer utskiftning av ventilasjonsaggregat, nattsinking, kontroll av avtrekkstemperatur, VAV og delvis oppvarming via ventilasjon. Utskiftning av ventilasjonsaggregat og VAV reduserer fjernvarmeforbruket med henholdsvis 49 % og 60 %, men tiltakene har høy investeringskostnad. Nattsinking reduserer fjernvarmeforbruket, men effektuttaket øker og termisk komfort reduseres. Kontroll av avtrekkstemperatur forbedrer hovedsakelig termisk komfort. Delvis oppvarming via ventilasjon øker energiforbruket.

Basert på evaluering av energi, effekt, inneklime, klimafotavtrykk og lønnsomhet for hvert tiltak, anbefales utskiftning av ventilasjonsaggregat, kontroll av avtrekkstemperatur og VAV-styring for bygningskohorten. Den totale energibesparelsen til den anbefalte tiltakspakken er 27 %, hvor fjernvarmeforbruket er redusert med 70 % og elektrisitetsforbruket med 10 %. Maksimum effekt for elektrisitet og fjernvarme er betraktelig redusert med henholdsvis 9 % og 60 %. Tilbakebetalingstiden for den anbefalte tiltakspakken er omtrent 4 år, som er lavere enn NTNU sitt krav. De årlige utslippsbesparelsene er mellom 30 tonn CO<sub>2</sub>-ekv og 50 tonn CO<sub>2</sub>-ekv, avhengig av elektrisitetsmikse. Disse resultatene er kun gyldige for referansebygget, og gjelder ikke nødvendigvis for alle byggene i kohorten.

Det er høyt energisparingspotensial ved å implementere ENØK-tiltak i bygningskohorten. Likevel vil det være utfordrende å redusere energibruket med 50 %, grunnet det høye elektrisitetsforbruket i laboratorier. Det anbefales at NTNU undersøker muligheten for implementering av anbefalt tiltakspakke i hvert bygg i bygningskohorten, ved å lage IDA ICE modeller for byggene. Dette vil resultere i plausible resultater for energi, effekt, inneklime, klimafotavtrykk og lønnsomhet.



## Abstract

NTNU aims to reduce its energy use and carbon footprint by 50 % by 2030 (NTNU, 2020). This is to be achieved by implementing profitable energy efficiency measures with pay-back time less than 5 years. To investigate the energy savings potential of the building stock at NTNU Gløshaugen a reference building, representing a group of buildings built between 1971-1999, modeled in IDA ICE is used. After calibration, the energy use of the reference model deviates 0.09 % from the actual energy use.

Five energy efficiency measures, created based on analysis of the reference building, are implemented and simulated in IDA ICE. The measures include, replacing the air handling unit, night set-back, return air control, VAV and heating by ventilation. Replacing the air handling unit and VAV reduces the district heating demand by 49 % and 60 %, respectively. However, these measures entail high investment cost. Night set-back reduces the district heating demand but increases the peak power and reduces the thermal comfort. Control of return air improved thermal comfort. Heating by ventilation was not successful as the energy demand increased.

Based on evaluation of energy, peak power, indoor climate, climate footprint and profitability of each energy efficiency measure, replacing the air handling unit, return air control and VAV were evaluated and recommended for the group of buildings. The total energy saving potential is 27 %, this includes 70 % and 10 % reduction in the district heating and electricity demand, respectively. The peak power of electricity and district heating reduced significantly by 9 % and 60 %, respectively. The pay-back time of the set of measures is approximately 4 years, which is below NTNU's requirement. The yearly reduction in CO<sub>2</sub> emissions is between 30 ton CO<sub>2</sub>-eq and 50 ton CO<sub>2</sub>-eq, depending on the electricity mix. However, these results are only valid for the reference building and does not necessarily apply to all buildings in the group.

There are large energy savings potentials by implementing energy efficiency measures in the building group. However, it is challenging to reduce the energy demand by 50 %, because of large electricity demand in laboratories. NTNU should investigate the possibility of implementing the recommended measures in each building, by creating individual IDA ICE models. This will result in reliable results for energy, peak power, indoor climate, climate footprint and profitability.

# Innholdsfortegnelse

<b>Forord</b> .....	<b>I</b>
<b>Sammendrag</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>V</b>
<b>Figurliste</b> .....	<b>X</b>
<b>Tabelliste</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1 Introduksjon</b> .....	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn og motivasjon .....	1
1.2 Problemstilling .....	3
1.3 Begrensninger.....	3
1.4 Rapportstruktur.....	3
<b>2 Teoretisk bakgrunn</b> .....	<b>5</b>
2.1 Energibruk og effektbehov i bygninger .....	5
2.1.1 Energibruk .....	5
2.1.2 Effektbehov.....	6
2.1.3 Energikrav i bygninger .....	7
2.2 Inneklima i bygninger .....	7
2.2.1 Termisk miljø.....	7
2.2.2 Atmosfærisk miljø .....	9
2.3 Varmebalanse i bygg .....	9
2.4 Fjernvarme .....	11
2.5 Ventilasjon .....	11
2.5.1 Ventilasjonstyper .....	12
2.5.2 Ventilasjonsaggregatet.....	12
2.5.3 Styring og regulering av ventilasjon .....	14
2.6 Kontrollsystemer og regulatorer .....	15
2.7 Økonomi.....	16
2.7.1 Lønnsomhetsberegning .....	17

2.7.2	Total Concept.....	17
2.7.3	Kostnader ved energibruk .....	18
2.8	Tiltak for energieffektivisering.....	20
2.9	Klimafotavtrykk fra bygningsinstallasjoner .....	22
2.10	Bygningssimulering.....	23
<b>3</b>	<b>Metode.....</b>	<b>25</b>
3.1	Overordnet metode.....	25
3.2	Metode for kalibrering og verifisering av referansebygg .....	27
3.3	Metode for utarbeidelse og presentasjon av ENØK-tiltak.....	28
3.4	Klimafotavtrykk .....	33
3.5	Lønnsomhetsanalyse .....	34
3.6	Anbefalt tiltakspakke.....	35
<b>4</b>	<b>Referansebygget .....</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>Resultater og analyse av referansebygg .....</b>	<b>41</b>
5.1	Kalibrering av energiforbruk .....	41
5.1.1	Kalibrering av elektrisitetsforbruk.....	41
5.1.2	Kalibrering av fjernvarmeforbruk.....	44
5.2	Verifisering av energiforbruk .....	48
5.2.1	Verifisering av elektrisitetsforbruk .....	49
5.2.2	Verifisering av fjernvarmeforbruk.....	52
5.3	Resultater og analyse av referansebygg.....	57
5.3.1	Energi og effekt - referansebygg.....	57
5.3.2	Inneklima - referansebygg .....	60
5.3.3	Klimafotavtrykk - referansebygg.....	63
5.3.4	Lønnsomhetsgrunnlag – referansebygg .....	64
5.4	Analyse av varmebalanse i referansebygget.....	64
<b>6</b>	<b>Resultater og analyse for tiltak 1-5.....</b>	<b>68</b>
6.1	Resultater og analyse tiltak 1 – ventilasjonsaggregat .....	68
6.1.1	Resultater for energi og effekt – tiltak 1 .....	68
6.1.2	Inneklima – tiltak 1 .....	71

6.1.3	Klimafotavtrykk – tiltak 1.....	72
6.1.4	Lønnsomhet – tiltak 1 .....	73
6.2	Resultater og analyse tiltak 2 - Nattsinking .....	75
6.2.1	Resultater for energi og effekt – tiltak 2 .....	75
6.2.2	Inneklima – tiltak 2.....	78
6.2.3	Klimafotavtrykk – tiltak 2.....	80
6.2.4	Lønnsomhet – tiltak 2 .....	81
6.3	Resultater og analyse tiltak 3 – Kontroll av avtrekkstemperatur.....	82
6.3.1	Energi og effekt – tiltak 3 .....	83
6.3.2	Inneklima – tiltak 3 .....	88
6.3.3	Klimafotavtrykk – tiltak 3.....	89
6.3.4	Lønnsomhet – tiltak 3 .....	91
6.4	Resultater og analyse tiltak 4 – VAV .....	92
6.4.1	Energi og effekt – tiltak 4 .....	92
6.4.2	Inneklima – tiltak 4.....	96
6.4.3	Klimafotavtrykk – tiltak 4.....	101
6.4.4	Lønnsomhet – tiltak 4 .....	102
6.5	Resultater tiltak 5 – Delvis oppvarming via ventilasjon.....	103
6.6	Oppsummering .....	107
6.6.1	Energi og effekt – oppsummering.....	107
6.6.2	Inneklima – oppsummering .....	110
6.6.3	Klimafotavtrykk – oppsummering .....	111
6.6.4	Lønnsomhet – oppsummering.....	113
<b>7</b>	<b>Resultater og analyse av anbefalt tiltakspakke .....</b>	<b>115</b>
7.1	Energi og effekt – anbefalt tiltakspakke.....	115
7.2	Inneklima – anbefalt tiltakspakke.....	121
7.3	Klimafotavtrykk – anbefalt tiltakspakke .....	124
7.4	Lønnsomhet – anbefalt tiltakspakke .....	126
<b>8</b>	<b>Diskusjon .....</b>	<b>128</b>
8.1	Bruk av referansebygg som vurderingsgrunnlag.....	128
8.2	Anbefalt tiltakspakke.....	130
8.3	Lønnsomhet.....	131

8.4	Klimafotavtrykk og bærekraftig drift av bygningsinstallasjoner.....	133
<b>9</b>	<b>Konklusjon.....</b>	<b>134</b>
<b>10</b>	<b>Videre arbeid.....</b>	<b>137</b>
	<b>Referanser .....</b>	<b>138</b>
	<b>Vedlegg A.1 Kode for beregning av effektpris .....</b>	<b>144</b>
	<b>Vedlegg A.2 Mailutveksling systemair .....</b>	<b>145</b>
	<b>Vedlegg A.3 Brukermønsterprofil.....</b>	<b>146</b>
	<b>Vedlegg A.4 Lønnsomhetsberegning.....</b>	<b>148</b>

## Figurliste

Figur 2.1: Illustrasjon av en typisk varighetskurve.....	6
Figur 2.2: Adaptiv termisk komfortmodell (Standard Norge, 2014). ....	8
Figur 2.3: Illustrasjon av varmebalanse i et rom.....	10
Figur 2.4: Forenklet systemtegning av et standard ventilasjonsaggregat.....	12
Figur 2.5: Illustrasjon av potensiale for varmegjenvinning for ventilasjon (Cao, 2021). ....	13
Figur 2.6: Systemgrenser i en LCA (VentiStål AS, 2022).....	22
Figur 3.1: Illustrasjon av overordnet metode.....	25
Figur 3.2: Ventilasjonsaggregat med "return air temperature control" fra IDA ICE. ....	30
Figur 3.3: Egendefinert regulator i IDA ICE. ....	32
Figur 4.1: Referansebygget i IDA ICE. ....	37
Figur 4.2: Planløsning i hver etasje i referansebygget. ....	37
Figur 5.1: Resultat for målt EL og simulering med internlaster fra tidligere masteroppgave.....	42
Figur 5.2: Resultat for endelig kalibrering EL.....	43
Figur 5.3 Spredningsdiagram for simulert og målt spesifikt effektforbruk EL. ....	44
Figur 5.4: Målt spesifikt effektforbruk FV i 2016. ....	45
Figur 5.5: Målt og simulert spesifikt effektforbruk FV i 2016. ....	45
Figur 5.6: Målt og simulert spesifikt effektforbruk FV etter kalibrering i prosjektoppgave. ....	46
Figur 5.7: Målt og simulert spesifikt effektforbruk FV etter fullført kalibrering.....	47
Figur 5.8: Spredningsdiagram for målt og simulert FV.....	48
Figur 5.9: Varighetskurve for levert spesifikk effekt EL, før og etter kalibrering, samt målte verdier. ....	50
Figur 5.10: Målt og simulert spesifikt effektforbruk EL for en gjennomsnittlig hverdag og helgedag i februar, september og november. ....	51
Figur 5.11: Varighetskurve for levert spesifikk effekt FV, før kalibrering, etter kalibrering og for målte verdier.....	53
Figur 5.12: Målt og simulert spesifikt effektforbruk FV for en gjennomsnittlig hverdag og helgedag i februar, juli og november.....	54
Figur 5.13: Spesifikt effektforbruk FV i Elektro E+F og simulert referansebygg, 10 dager i februar.....	56
Figur 5.14: Spesifikt effektforbruk FV i Elektro E+F og simulert referansebygg, 10 dager i juli. ....	56
Figur 5.15: Spesifikt effektforbruk FV i Elektro E+F og simulert referansebygg, 10 dager i november. ....	56
Figur 5.16: Varighetskurve EL referansebygg.....	58
Figur 5.17: Varighetskurve FV referansebygg. ....	58
Figur 5.18: Fordeling av årlig elektrisitetsforbruk i referansebygget. ....	59
Figur 5.19: Fordeling av årlig fjernvarmeforbruk i referansebygg. ....	59
Figur 5.20: Adaptiv komfortmodell for referansebygg.....	60



Figur 5.21: CO <sub>2</sub> -konsentrasjonen i forelesning 1, 27. januar referansebygg. ....	61
Figur 5.22: CO <sub>2</sub> -konsentrasjonen i forelesning 1, 25. mai referansebygg. ....	61
Figur 5.23: CO <sub>2</sub> -konsentrasjonen i kontor 3, 27. januar referansebygg. ....	61
Figur 5.24: CO <sub>2</sub> -konsentrasjonen i kontor 3, 25. mai referansebygg. ....	61
Figur 5.25: Luftens alder i forelesning 1, 27. januar referansebygg. ....	62
Figur 5.26: Luftens alder i forelesning 1, 25. mai referansebygg. ....	62
Figur 5.27: Luftens alder i kontor 3, 27. januar referansebygg. ....	62
Figur 5.28: Luftens alder i kontor 3, 25. mai referansebygg. ....	62
Figur 5.29: Klimafotavtrykk referansebygg over 25 år. ....	63
Figur 5.30: Varmebalanse i kontor 1, 27. januar referansebygg. ....	65
Figur 5.31: Varmebalanse i kontor 4, 27. januar referansebygg. ....	65
Figur 5.32: Varmebalanse for kontor 1, 25. mai referansebygg. ....	66
Figur 5.33: Varmebalanse for kontor 4, 25. mai referansebygg. ....	66
Figur 6.1: Varighetskurve EL for tiltak 1. ....	69
Figur 6.2: Varighetskurve FV for tiltak 1. ....	69
Figur 6.3: Varmegjenvinning referansebygg og tiltak 1 en uke i januar i ventilasjonsaggregat kontorsone. ....	70
Figur 6.4: Varmegjenvinning referansebygg og tiltak 1 en uke i januar i ventilasjonsaggregat forelesningssone. ....	70
Figur 6.5: Vifteeffekt referansebygg og tiltak 1 en uke i januar i ventilasjonsaggregatet for kontorsonene. ....	70
Figur 6.6: Vifteeffekt referansebygg og tiltak 1 en uke i januar i ventilasjonsaggregatet for forelesningssonene. ....	70
Figur 6.7: Adaptiv komfortmodell for forelesning 1 og kontor 3 - tiltak 1. ....	72
Figur 6.8: Redusert klimafotavtrykk etter implementering av tiltak 1. ....	73
Figur 6.9: Redusert klimafotavtrykk etter implementering av tiltak 1 medberegnet avfallshåndtering og gjenvinning av eksisterende ventilasjonsaggregat. ....	73
Figur 6.10: Netto nåverdi som funksjon av levetid for tiltak 1. ....	74
Figur 6.11: Varighetskurve FV tiltak 2. ....	76
Figur 6.12: Total levert effekt til samtlige radiatorer en uke i januar tiltak 2. ....	77
Figur 6.13: Totalt levert effekt til samtlige radiatorer, 27. januar tiltak 2. ....	77
Figur 6.14: Adaptiv komfortmodell for forelesning 1 og kontor 3 - tiltak 2 (16 °C). ....	78
Figur 6.15: Adaptiv komfortmodell for forelesning 1 og kontor 3 - tiltak 2 (17 °C). ....	78
Figur 6.16: Adaptiv komfortmodell for forelesning 1 og kontor 3 - tiltak 2 (18 °C). ....	78
Figur 6.17: Adaptiv komfortmodell for forelesning 1 og kontor 3 - tiltak 2 (19 °C). ....	78
Figur 6.18: Gjennomsnittlig lufttemperatur i kontor 3 27. januar tiltak 2. ....	79
Figur 6.19: Redusert klimafotavtrykk etter implementering av tiltak 2. ....	81
Figur 6.20: Netto nåverdi som funksjon av levetid for tiltak 2 (18 °C). ....	82
Figur 6.21: Varighetskurve FV for tiltak 3. ....	83
Figur 6.22: Tilluftstemperatur til forelesningssonene i februar tiltak 3. ....	84
Figur 6.23: Avtrekkstemperatur fra forelesningssonene i februar tiltak 3. ....	84

Figur 6.24: Tilluftstemperatur til kontorsonene i februar tiltak 3. ....	85
Figur 6.25: Avtrekkstemperatur fra kontorsonene i februar tiltak 3. ....	85
Figur 6.26: Varme fra radiator og luftstrømmer kontor 1, 27. jan tiltak 3. ....	86
Figur 6.27: Varme fra radiator og luftstrømmer kontor 1, 25. mai tiltak 3. ....	86
Figur 6.28: Varme fra radiator og luftstrømmer forelesning 4, 27. jan tiltak 3. ....	86
Figur 6.29: Varme fra radiator og luftstrømmer forelesning 4, 25. mai tiltak 3. ....	86
Figur 6.30: Økning i levert energi til radiator og reduksjon i levert energi til varmebatteri i ventilasjonsaggregat for alle soner tiltak 3. ....	87
Figur 6.31: Adaptiv komfortmodell for forelesning 1 og kontor 3 - tiltak 3. ....	88
Figur 6.32: Gjennomsnittlig lufttemperatur på kontor 1, 1. feb tiltak 3. ....	89
Figur 6.33: Gjennomsnittlig lufttemperatur i forelesning 1, 1. feb tiltak 3. ....	89
Figur 6.34: Redusert klimafotavtrykk etter implementering av tiltak 3. ....	90
Figur 6.35: Netto nåverdi som funksjon av levetid for tiltak 3. ....	91
Figur 6.36: Varighetskurve EL tiltak 4. ....	93
Figur 6.37: Varighetskurve FV tiltak 4. ....	93
Figur 6.38: Levert luftmengde kontor 4, 27. jan tiltak 4. ....	93
Figur 6.39: Levert luftmengde kontor 4, 25. mai tiltak 4. ....	93
Figur 6.40: Levert effekt til varmebatteri i ventilasjonsaggregat i februar tiltak 4. ....	94
Figur 6.41: Levert luftmengde forelesning 1, 27. jan tiltak 4. ....	94
Figur 6.42: Levert luftmengde forelesning 1, 25. mai tiltak 4. ....	94
Figur 6.43: Varme fra radiator og luftstrømmer i kontor 1, 27. jan tiltak 4. ....	95
Figur 6.44: Varme fra radiator og luftstrømmer i kontor 4, 27. jan tiltak 4. ....	95
Figur 6.45: Adaptiv komfortmodell for forelesning 1 og kontor 3 - tiltak 4. ....	96
Figur 6.46: Luftens alder i forelesning 1, 27. jan tiltak 4. ....	97
Figur 6.47: Luftens alder i kontor 4, 27. jan tiltak 4. ....	97
Figur 6.48: Luftens alder i forelesning 1, begrenset til verdier innenfor driftstid, 27. jan tiltak 4. ....	97
Figur 6.49: Luftens alder i kontor 4, begrenset til verdier innenfor driftstid, 27. jan tiltak 4. ....	97
Figur 6.50: Gjennomsnittlig lufttemperatur og CO <sub>2</sub> -konsentrasjon i kontor 4, 27. jan tiltak 4. ....	98
Figur 6.51: Gjennomsnittlig lufttemperatur og CO <sub>2</sub> -konsentrasjon i kontor 4, 25. mai tiltak 4. ....	98
Figur 6.52: Gjennomsnittlig lufttemperatur og CO <sub>2</sub> -konsentrasjon i forelesning 1, 27. jan tiltak 4. ....	99
Figur 6.53: Gjennomsnittlig lufttemperatur og CO <sub>2</sub> -konsentrasjon i forelesning 1, 25. mai tiltak 4. ....	99
Figur 6.54: Gjennomsnittlig lufttemperatur og CO <sub>2</sub> - konsentrasjon i forelesning 1, 27. jan tiltak 4. ....	100
Figur 6.55: Levert luftmengde forelesning 4, 27. jan tiltak 4. ....	100
Figur 6.56: Redusert klimafotavtrykk etter implementering av tiltak 4. ....	101
Figur 6.57: Netto nåverdi som funksjon av levetid for tiltak 4. ....	102
Figur 6.58: Varmebalanse i kontor 1, 27. jan tiltak 5. ....	104
Figur 6.59: Varmeeffekt fra luftstrømmer i kontor 1, 27. jan tiltak 5. ....	105

Figur 6.60: Varmeeffekt fra radiator i kontor 1, 27. jan tiltak 5. ....	105
Figur 6.61: Varme fra luftstrømmer og radiator i kontor 1, 27. jan tiltak 5. ....	105
Figur 6.62: Varme fra luftstrømmer og radiator i kontor 4, 27. jan tiltak 5. ....	105
Figur 6.63: Sammenlikning av årlig fjernvarmeforbruk tiltak og referansebygg. ....	107
Figur 6.64: Sammenlikning av årlig elektrisitetsforbruk til oppvarmingssystem og luftbehandling tiltak og referansebygg. ....	108
Figur 6.65: Sammenlikning av effekttopp for FV tiltak og referansebygg. ....	109
Figur 6.66: Sammenlikning av effekttopp for EL tiltak og referansebygg. ....	109
Figur 6.67: Adaptiv komfortmodell i kontor 3 tiltak og referansebygg. ....	110
Figur 6.68: Adaptiv komfortmodell i forelesning 1 tiltak og referansebygg. ....	111
Figur 6.69: Sammenlikning av redusert klimafotavtrykk for tiltak. ....	112
Figur 6.70: Sammenlikning av gjennomsnittlig netto nåverdi for tiltak. ....	113
Figur 6.71: Sammenlikning av gjennomsnittlig tilbakebetalingstid for tiltak. ....	114
Figur 7.1: Varighetskurve EL anbefalt tiltakspakke. ....	116
Figur 7.2: Varighetskurve FV anbefalt tiltakspakke. ....	116
Figur 7.3: Sammenlikning av elektrisitetsforbruk til oppvarmingssystem og luftbehandling tiltak, anbefalt tiltakspakke og referansebygg. ....	117
Figur 7.4: Sammenlikning av fjernvarmeforbruk tiltak, anbefalt tiltakspakke og referansebygg. ....	117
Figur 7.5: Levert effekt til varmebatteri i ventilasjonsaggregat kontor, 27. jan referansebygg, utvalgte tiltak og anbefalt tiltakspakke. ....	118
Figur 7.6: Levert effekt til vifte i ventilasjonsaggregat kontor, 27. jan referansebygg, utvalgte tiltak og anbefalt tiltakspakke. ....	118
Figur 7.7: Varmebalanse i kontor 1, 27. jan anbefalt tiltakspakke. ....	119
Figur 7.8: Varmebalanse i kontor 1, 25. mai anbefalt tiltakspakke. ....	119
Figur 7.9: Tilluftstemperatur til kontorsonene 27. jan, referansebygg, utvalgte tiltak og anbefalt tiltakspakke. ....	120
Figur 7.10: Avtrekkstemperatur fra kontorsonene 27. jan, referansebygg, aktuelle tiltak og anbefalt tiltakspakke. ....	121
Figur 7.11: Adaptiv komfortmodell for alle soner i 3.etasje for anbefalt tiltakspakke. ....	122
Figur 7.12: Gjennomsnittlig lufttemperatur i alle soner i 3.etasje, 27. jan anbefalt tiltakspakke. ....	122
Figur 7.13: Gjennomsnittlig lufttemperatur i alle soner i 3.etasje, 25. mai anbefalt tiltakspakke. ....	122
Figur 7.14: CO <sub>2</sub> -konsentrasjon i alle soner i 3.etasje, 27. jan anbefalt tiltakspakke. ....	123
Figur 7.15: CO <sub>2</sub> -konsentrasjon i alle soner i 3.etasje, 25. mai anbefalt tiltakspakke. ....	123
Figur 7.16: Luftens alder i alle soner i 3.etasje, 27. jan anbefalt tiltakspakke. ....	124
Figur 7.17: Luftens alder i alle soner i 3.etasje, 25. mai anbefalt tiltakspakke. ....	124
Figur 7.18: Redusert klimafotavtrykk etter implementering av anbefalt tiltakspakke. ....	125
Figur 7.19: Netto nåverdi som funksjon av levetid for anbefalt tiltakspakke. ....	127

## Tabelliste

Tabell 2.1: Effektpris for elektrisitet vinter (nov-april) og sommer (mai-okt) (Tensio, 2022). .....	19
Tabell 2.2: Effektpris for fjernvarme for vinter (nov-april) og sommer (mai-okt) (Statkraft, 2021). .....	19
Tabell 3.1: Beskrivelse av utslippsfaktor 1 og 2. ....	33
Tabell 3.2: Iboende utslipp fra tiltak. ....	33
Tabell 4.1: Bygninger i bygningskohort 3. ....	36
Tabell 4.2: Prosentvis sonefordeling. ....	37
Tabell 4.3: Inndata til referansebygget i IDA ICE. ....	38
Tabell 4.4: Brukerrate i sonene. ....	38
Tabell 4.5: Beskrivelse av ventilasjon i sonene. ....	39
Tabell 4.6: Dimensjonering av vannbårne radiatorer. ....	40
Tabell 5.1: Inndata i IDA ICE for ekstra internlaste i laboratoriet. ....	43
Tabell 5.2: Verdier for internlaste for endelig kalibrering. ....	43
Tabell 5.3: Totalt levert spesifikt energiforbruk for målte verdier og referansebygg. ....	49
Tabell 5.4: Energi og effekt for referansebygget. ....	58
Tabell 5.5: Årlig klimafotavtrykk fra energibruk i referansebygget. ....	63
Tabell 5.6: Årlig energikostnad for referansebygget. ....	64
Tabell 6.1: Energi og effekt for tiltak 1. ....	69
Tabell 6.2: Årlig klimafotavtrykk fra energibruk og iboende utslipp for tiltak 1. ....	72
Tabell 6.3: Lønnsomhetsanalyse for tiltak 1. ....	74
Tabell 6.4: Energi og effekt for tiltak 2. ....	75
Tabell 6.5: Årlig klimafotavtrykk fra energibruk og iboende utslipp for tiltak 2. ....	80
Tabell 6.6: Lønnsomhetsanalyse for tiltak 2 (18 °C). ....	81
Tabell 6.7: Energi og effekt for tiltak 3. ....	83
Tabell 6.8: Årlig klimafotavtrykk fra energibruk og iboende utslipp for tiltak 3. ....	90
Tabell 6.9: Lønnsomhetsanalyse for tiltak 3. ....	91
Tabell 6.10: Energi og effekt for tiltak 4. ....	92
Tabell 6.11: Årlig klimafotavtrykk fra energibruk og iboende utslipp for tiltak 4. ....	101
Tabell 6.12: Lønnsomhetsanalyse for tiltak 4. ....	102
Tabell 6.13: Energi og effekt for tiltak 5. ....	106
Tabell 7.1: Energi og effekt for anbefalt tiltakspakke. ....	115
Tabell 7.2: Årlig klimafotavtrykk fra energibruk og iboende utslipp for anbefalt tiltakspakke. ....	125
Tabell 7.3: Lønnsomhetsanalyse for anbefalt tiltakspakke. ....	126

# 1 Introduksjon

I dette kapitlet skal oppgavens bakgrunn og motivasjon, problemstilling, begrensninger og rapportstruktur presenteres.

## 1.1 Bakgrunn og motivasjon

Bygninger står for omtrent 40 % av energiforbruket i Europa og ettersom bygningsmassen er økende er det ventet at energiforbruket vil øke (EU, 2010). Dersom Norge skal nå miljømål 5.2 i Parisavtalen, å redusere utslipp av klimagasser med minst 50 % innen 2030 (Miljøstatus, 2021), må energiforbruket i eksisterende bygningsmasse reduseres. Renovering av bygg kan minimere energiforbruket, men medfører ofte høye investeringskostnader. Om energibesparelsene er høye kan likevel tiltakene være lønnsomme. Smale tiltak, som forbedret styring og mindre renovering, kan minimere energibehovet til en lav investeringskostnad og dermed gjøre tiltakene lønnsomme.

Norges tekniske- og naturvitenskapelige universitet (NTNU) sin miljøambisjon har siden 2012 vært at NTNU skal være et foregangsuniversitet som benytter kunnskap fra egen forskning til å sikre miljøforsvarlig virksomhet. Langsiktige mål, definert i NTNU2060, innebærer at NTNU sin bygningsmasse skal samlet være på nullutslippsnivå innen 2060 (NTNU, 2015). I arbeidet mot bærekraftige universitetsbygg ble NTNU i 2014 medlem av både *The International Sustainable Campus Network* og *Nordic Sustainable Campus Network*. Dette er plattformer hvor universiteter kan utveksle kunnskap og jobbe sammen for å bidra til bærekraftig utvikling.

I 2019 utgjorde elektrisitet og fjernvarme 28 % av det totale klimafotavtrykket fra NTNU sin virksomhet (NTNU, 2020). En rapport fra NVE viste at NTNU hadde det høyeste spesifikke energiforbruket til bygninger blant universitetene og høgskolene som var presentert i studien (NVE, 2014). Å redusere energibehov i eksisterende bygninger har dermed et stort potensial for å redusere klimafotavtrykket til NTNU.

Miljøutviklingsplan 2020-2030 omhandler hvordan NTNU som organisasjon kan redusere sin miljøpåvirkning på kort og lang sikt. Planen er sterkt knyttet opp til FN's bærekraftsmål og Parisavtalen, og er et virkemiddel for å oppnå disse. Hovedmålet for energi innebærer at NTNU innen

## KAPITTEL 1: INTRODUKSJON

2030 skal redusere eget energiforbruk med minimum 50 % per årsverk i forhold til 2019. Dette skal gjennomføres gjennom følgende tiltak (NTNU, 2020):

- Gjennomføre spesifikk vurdering av tiltak for redusert energibruk for alle bygg
- Identifiserte energiøkonomiseringstiltak med lavere tilbakebetalingstid enn 5 år skal som hovedregel gjennomføres
- Løsninger for smart styring og lagring av energi skal vurderes
- NTNU skal legge til rette for at campus i størst mulig grad produserer energi

Miljøutviklingsplanen setter også mål for campusutviklingen. Overordnet skal NTNU utvikle fremtidsrettede, samtlende campuser som skal bli modell for fremtidige offentlige utbygginger i Norge. Tiltakene innebærer blant annet at campus skal utvikles for et *Zero Emission Neighbourhood*-område og det skal etterstrebtes høy arealeffektivitet i alle NTNUs bygg. I tillegg skal CO<sub>2</sub>-utslippet reduseres med 50 %. Dette skal hovedsakelig gjøres med mindre reisevirksomhet, men siden 28 % av klimagassutslippet til NTNU kommer fra energi (NTNU, 2020), er det også et potensiale for å redusere klimagassutslipp ved å redusere energiforbruket til bygningene på campus.

Nesgård & Ngo (2018) etablerte i sin masteroppgave 4 referansebyggmodeller i IDA ICE. Hvert referansebygg representerte en kohort av bygg bygget i samme tidsperiode på NTNU Gløshaugen. Energisparepotensialet for en rekke større energieffektiviseringstiltak ble identifisert med simuleringssystemet IDA ICE. Gjerstad (2021) undersøkte effekten av tiltak for et av disse referansebyggene på effekt- og energiforbruk. Denne masteroppgaven er derfor en del av et større arbeid for å identifisere energisparepotensialet på NTNU Gløshaugen.

Motivasjonen for oppgaven er å utarbeide gode og pålitelige løsninger som kan redusere energiforbruket på NTNU Gløshaugen, samtidig som de er lønnsomme. Det ønskes også å belyse det faktum at det ikke trenger å være verken komplisert eller dyrt å redusere energiforbruket til eksisterende bygg, og at dette derfor bør bli undersøkt i flere bygg. Bygningssimulering spiller en stor rolle i å undersøke energibesparende tiltak, og det er et ønske om at flere skal ha den kompetansen som trengs for å beherske verktøy som IDA ICE. Det er også motivasjon for å kunne

## KAPITTEL 1: INTRODUKSJON

teste de kunnskaper som er lært i løpet av studieårene, og tilegne seg mer kunnskap om bygningssimulering og ENØK-tiltak.

### 1.2 Problemstilling

Hovedmålet med denne masteroppgaven er å definere og simulere relevante effekt- og energiøkonomiske tiltak for typiske universitetsbygninger. Tiltakene skal redusere energibehov og effekttopper uten å gå på bekostning av inneklimate, samt være lønnsomme og ha kort tilbakebetalingstid. I tillegg skal tiltakenes klimafotavtrykk evalueres for iboende utslipp og potensiale for reduksjon av operasjonelle utslipp. ENØK-tiltak skal identifiseres og evalueres ved bruk av simuleringsprogrammet IDA ICE. Arbeidet kan deles i følgende delmål:

- Forbedre og kalibrere eksisterende modell i IDA ICE.
- Definere effekt- og energieffektiviseringstiltak og simulere tiltakene i IDA ICE.
- Utvikle reelle modeller for energipris og vurdere lønnsomhet av de definerte tiltakene.
- Evaluere tiltakenes klimafotavtrykk sammenliknet med nåværende drift.
- Vurdere effekt- og energieffektiviseringstiltakene basert på resultater for energi, effekt, inneklimate, klimafotavtrykk og lønnsomhet.
- Anbefale en tiltakspakke for bygningskohorten i henhold til NTNUs miljøutviklingsplan for 2020-2030.

### 1.3 Begrensninger

For å kunne levere en gjennomarbeidet rapport må noen begrensninger settes. På grunn av tidsbegrensning vil kun bygg fra tidsperioden 1971-1999 bli evaluert, da disse byggene har et svært høyt energiforbruk og dermed et stort potensial for forbedring. Tiltak som evalueres er begrenset til tiltak som er mulig å implementere i IDA ICE. Dette utelukker tiltak som energioppfølgningssystem (EOS) og energiledelse.

### 1.4 Rapportstruktur

**Kapittel 1** introduserer bakgrunn og motivasjon for prosjektoppgaven, samt problemstilling og begrensninger som er blitt satt.

## KAPITTEL 1: INTRODUKSJON

**Kapittel 2** redegjør for den teoretiske bakgrunnen for oppgaven, herunder energibruk og effektbehov i bygninger, varmebalanse og inneklime i bygg, relevante tekniske installasjoner i bygninger, kostnader ved energibruk og tiltak for energieffektivisering, samt klimafotavtrykk av bygningssystemer og bygningssimulering.

**Kapittel 3** presenterer den overordnede metoden, metode for kalibrering og verifisering av referansemodellen, samt metode for utarbeiding av tiltak, tiltakene, beregning av klimafotavtrykk og lønnsomhet. Avslutningsvis presenteres metoden for utarbeiding av anbefalt tiltakspakke.

**Kapittel 4** redegjør for bygningskohorten referansebygget er basert på og referansebygget, herunder bygningskropp, sonefordeling og geometri, bruksmønstre, ventilasjonsløsninger og varme- og kjøleenheter.

**Kapittel 5** presenterer resultater fra kalibrering og verifisering av referansebygget. I tillegg presenteres resultater for energi og effekt, inneklime, klimafotavtrykk og økonomi, som et sammenlikningsgrunnlag for tiltakene. En analyse av varmebalansen i utvalgte soner er presentert og vurdert som et utgangspunkt for utarbeiding av tiltak.

**Kapittel 6** presenterer og evaluerer resultater for energi og effekt, inneklime, klimafotavtrykk og lønnsomhet for tiltak 1-5.

**Kapittel 7** presenterer og evaluerer resultater for energi og effekt, inneklime og lønnsomhet for anbefalt tiltakspakke.

**Kapittel 8** diskuterer resultatene på et overordnet nivå, samt peker på usikkerheter ved resultatene.

**Kapittel 9** inneholder konklusjonen for rapporten.

**Kapittel 10** presenterer grunnlaget for videre arbeid.



### 2 Teoretisk bakgrunn

I dette kapitlet vil den teoretiske bakgrunnen for rapporten presenteres. Først skal energibruk og effektbehovet i bygninger redegjøres for, før varmebalanse og inneklima, samt relevante tekniske systemer i bygninger presenteres. Videre skal verktøy for beregning av lønnsomhet, kostnader ved energibruk, samt klimafotavtrykk og tiltak for energieffektivisering belyses. Avslutningsvis skal bygningssimulering redegjøres for.

#### 2.1 Energifbruk og effektbehov i bygninger

I dette delkapitlet skal energibruk og effektbehov i bygninger, samt forskjellen mellom disse redegjøres for. I tillegg presenteres energikrav i bygninger i henhold til tekniske krav til byggverk.

##### 2.1.1 Energifbruk

Energifbruk i bygninger påvirkes av 6 faktorer: klima, bygningskropp, teknisk utstyr i bygningen, drift og vedlikehold, brukeratferd og inneklimateforhold (Yoshino, et al., 2017). Disse faktorene kan deles inn i to kategorier: menneskelige faktorer og tekniske og fysiske faktorer. De tekniske og fysiske faktorene klima, bygningskropp og teknisk utstyr kan gi et anslag på en bygnings energiytelse. De resterende faktorene er vanskelige å kvantifisere og varierer mye. Når alle 6 faktorene tas i betraktning, kan bygningens faktiske energibruk identifiseres.

En syvende faktor kan også påvirke energibruket i et bygg, den sosiale faktoren (Yoshino, et al., 2017). Forhold som energipris, energikilder, brukernes holdninger til energibruk og politiske holdninger kan påvirke energibruket. Denne faktoren hører til under menneskelige faktorer.

I en rapport utgitt av NVE i 2014 presenteres formålsdelt energibruk i undervisningsbygninger. Rapporten presenterer data fra blant annet NTNU, Statsbygg og SSB om spesifikk energibruk i norske universitets- og høyskolebygninger. Gjennomsnittlig spesifikk energibruk i disse bygningene er omtrent 260 kWh/m<sup>2</sup> per år. NTNUs campus har det høyeste spesifikke energiforbruket blant universitetsbygg med 277 kWh/m<sup>2</sup> per år i tidsperioden 2008 - 2012 (NVE, 2014). Dette kan begrunnes med den store andelen eldre bygg på Gløshaugen. Rapporten peker også på en del trender og drivere som påvirker spesifikt energibruk. Økt driftstid øker energibruket,

## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

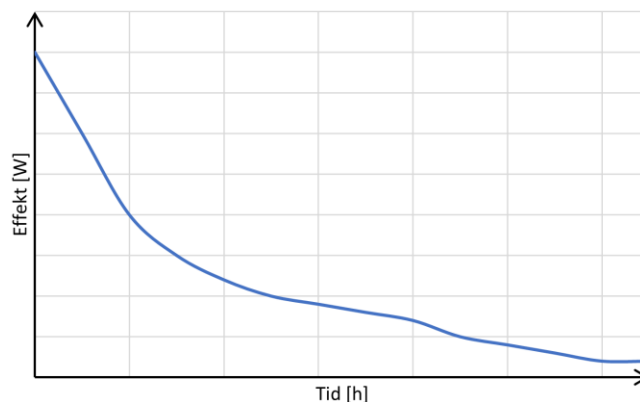
mens strengere byggeforskrifter og økt fokus på energibruk og miljøbevissthet kan redusere energibruket.

Norsk standard, NS3031 Bygningers energiytelse, benyttes til beregning av energibehov og energiforsyning for bygninger. Totalt energibehov til en bygning består av romoppvarming, ventilasjonsvarme, romkjøling, ventilasjonskjøling, varmtvann, vifter, pumper, belysning og teknisk utstyr. Standarden beskriver hvordan hver energipost skal beregnes og er tilpasset dynamiske beregningsprogrammer (Standard Norge, 2020).

### 2.1.2 Effektbehov

Effekt er omsatt energi per tidsenhet (Hofstad, 2019). Effektbehovet til en bygning er derfor sterkt knyttet til energibehovet. Effekttoppen eller topplasten er det høyeste effektuttaket til et bygg. Denne toppen er den kapasiteten som må avsettes til bygget og gjelder alle energibærere. For eksempel må fjernvarmerørene dimensjoneres slik at nødvendig massestrøm kan forsyne bygningen med nok fjernvarme til å varme bygget på den kaldeste dagen. Dette gjelder også kapasiteten på strømmettet.

Effektbehovet i et bygg kan fremstilles som en varighetskurve, med effekt på y-aksen og timer på x-aksen. Varighetskurven viser hyppigheten for uttak av effekt. Dataene er sortert i synkende rekkefølge for effektuttaket, slik at timene refererer til antall timer med et gitt effektuttak. Typisk er kurven bratt de første timene, fordi det er få timer med høyt effektuttak, før den flater ut mot grunnlasten. En typisk varighetskurve er presenter i Figur 2.1.



Figur 2.1: Illustrasjon av en typisk varighetskurve.

## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

Brukstid er antall timer et system ville vært i drift med maksimum effektuttak i løpet av et år, og kan beregnes med Formel 2.1. Dersom brukstiden er lav indikerer det at anlegget er overdimensjonert store deler av året.

*Formel 2.1: Brukstid.*

$$\text{Brukstid [h]} = \frac{\text{Årlig energibruk [kWh]}}{\text{Maksimum effektuttak [kW]}}$$

### 2.1.3 Energikrav i bygninger

Byggteknisk forskrift (TEK) setter minimumskravene til egenskapene et byggverk må ha for å kunne oppføres lovlig i Norge (Direktoratet for byggkvalitet, 2017). TEK fornyes med jevne mellomrom, og gjeldende forskrift kalles gjerne TEK17 da forskriften ble publisert i 2017. Kapittel 13 Inneklima og helse, stiller blant annet krav til termisk inneklima og luftkvalitet, og skal forebygge helseskader og negativ komfortopplevelse. Kapittel 14 Energi, setter krav til energieffektivitet og løsninger for energiforsyning.

## 2.2 Inneklima i bygninger

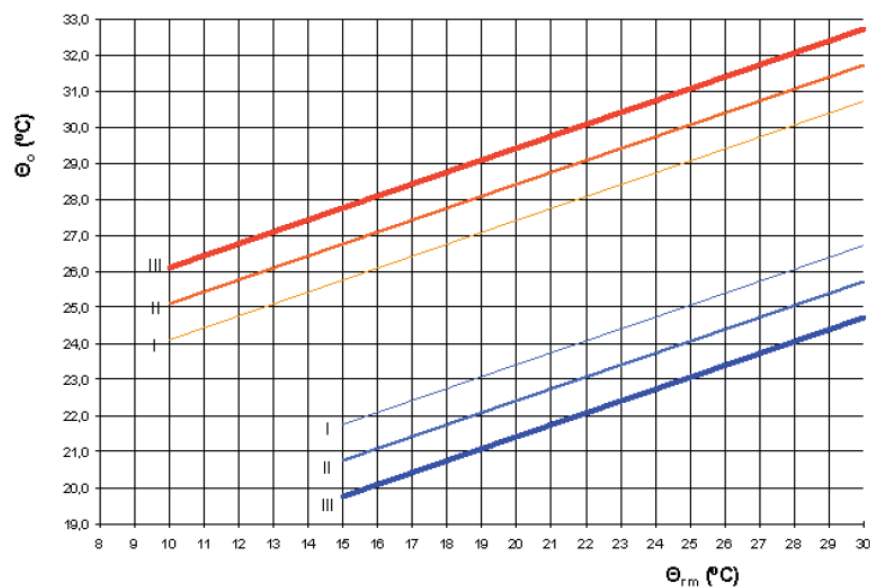
Inneklima består av termisk, atmosfærisk, aktinisk, akustisk og mekanisk miljø (NAAF, 2021). Termisk miljø inneholder de ulike temperaturene i et rom. Atmosfærisk miljø beskriver luftkvaliteten i rommet. Aktinisk miljø beskriver lysforhold, mens akustisk miljø beskriver lydforhold i rommet. Mekanisk miljø beskriver fysiske omgivelser. Videre i dette delkapittelet vil termisk og atmosfærisk miljø presenteres, samt hva som påvirker disse miljøene.

### 2.2.1 Termisk miljø

Termisk komfort er en tilstand hvor en føler seg tilfreds med det termiske miljøet (Novakovic, et al., 2007). Tilfredshet påvirkes av flere faktorer. Menneskelige faktorer inkluderer bekledning, aktivitetsgrad og oppholdstid i bygningen. Romlige faktorer kan være overflatetemperatur og stråling fra for eksempel radiatorer. Ventilasjonsanlegg, eller mangel på dette, påvirker blant annet lufttemperaturen, bevegelsesmønsteret til lufta og luftfuktigheten, som igjen påvirker termisk komfort.

## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

For å kunne si noe konkret om det termiske miljøet i et rom har ulike modeller blitt utviklet. Et eksempel på dette er adaptive modeller. De adaptive modellene er basert på at kravene for termisk komfort endres basert på utetemperatur, og at brukerne av bygg uten kjøling ofte tåler større temperaturforandringer enn i bygg med kjøling. For eksempel vil det aksepteres høyere innnetemperaturer på varme sommerdager enn på kalde vinterdager. NS-EN 15251 beskriver adaptiv termisk komfortmodell og stadfester at denne skal brukes dersom bygget ikke har mekanisk kjøling (Standard Norge, 2014). I Figur 2.2 presenteres adaptiv komfortmodell, hvor optimal operativ temperatur er en funksjon av middelveien av utetemperaturen.



Figur 2.2: Adaptiv termisk komfortmodell (Standard Norge, 2014).

Figur 2.2 viser at det er en lineær trend mellom optimal operativ temperatur og utetemperatur. Modellen er delt inn i tre kategorier hvor kategori I er best og kategori III er akseptabel. Figuren viser at man er mer tilpasningsdyktig til varme innnetemperaturer på sommeren og kalde innnetemperaturer på vinteren. Det finnes også andre modeller for evaluering av termisk komfort. Et eksempel er Fangers komfortmodell, hvor individer sin opplevelse av temperaturen blir brukt til å regne ut et estimat på hvor mange prosent som er misfornøyde med det termiske miljøet. Dette er en metode som brukes for bygg med kjøling og vil derfor være lite relevant i denne oppgaven (Novakovic, et al., 2007).

## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

### 2.2.2 Atmosfærisk miljø

Det atmosfæriske miljøet er påvirket av luftkvaliteten i rommet. Luftkvaliteten i et rom har stor innvirkning på hvordan individene opplever inneklimate. Dersom det er lite utskiftning av luft, kan rom ofte oppleves som tette og man kan få vondt i hodet, bli svimmel eller bli plaget av vond lukt (FHI, 2018). CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i et rom, samt luftens alder, er målbare parametere for å evaluere luftkvaliteten i rommet. CO<sub>2</sub> produseres i utgangspunktet fra personer og må ofte kontrolleres i rom med høy personbelastning. Luftens alder angir hvor lang tid det tar før luften i et punkt i rommet skiftes ut. Ofte brukes en gjennomsnittlig verdi av luftens alder i et rom, eller en del av et rom, for å evaluere luftkvaliteten. Verdien beskriver effektiviteten til ventilasjonsanlegget, og om det er stagnasjonsområder i rommet.

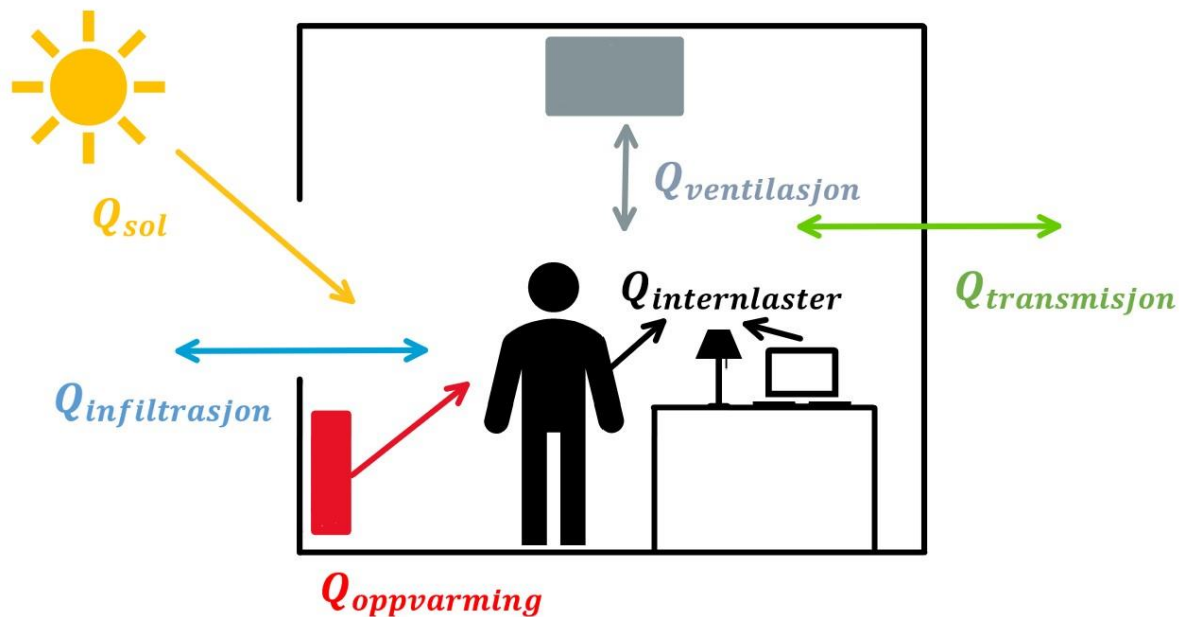
CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i et rom blir ofte gitt i antall partikler per million, kalt ppm. Frisk uteluft, og tilluft fra ventilasjon, har en CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen på rundt 400 ppm. Denne verdien har økt gjennom årene og er antatt å øke ytterligere (Øvrebø, 2021). For å opprettholde god luftkvalitet i et rom er det anbefalt å holde CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen på under 1000 ppm (Arbeidstilsynet, 1991).

### 2.3 Varmebalanse i bygg

Varmebalansen i bygg har innvirkning på energi, effekt og inneklimate. Ved analyse av varmebalanse vil det komme frem om enkelte tekniske systemer jobber mot hverandre. Det kan også bli tydelig hvilke faktor som i størst grad påvirker varmebalansen, og dermed hvor det er potensiale for å spare energi.

Temperaturen i et rom er avhengig av hvor mye varme som tilføres og fjernes. Dersom temperaturen øker er det overskudd av tilført varme og dersom temperaturen synker er det overskudd av varmetap. For å oppnå ønsket temperatur er det derfor essensielt å undersøke rommets varmebalanse. Varmebalansen til et rom er illustrert i Figur 2.3, og påvirkes av solinnstråling, transmisjon, internlast, oppvarming, infiltrasjon og ventilasjon (NAAF, 2016). For å oppnå en stabil temperatur i rommet må summen av varmetap og varmegevinst være null.

## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN



Figur 2.3: Illustrasjon av varmebalanse i et rom.

$Q_{sol}$  er det varmetilskuddet som blir tilført rommet gjennom solinnstråling og vil alltid være positiv. På vinteren vil solinnstråling tilføre varmegevinst og dermed redusere oppvarmingsbehovet. På sommeren vil solinnstråling også gi et varmetilskudd til rommet, som ofte resulterer i et økt behov for kjøling. Dette kan minimeres ved å installere solskjerming eller åpne vinduer. Solinnstråling bidrar også til dagslys i bygget og påvirker derfor inneklimate mer enn bare for termisk komfort.

$Q_{internlaster}$  er varmetilskudd fra alt i et rom som ikke er en del av oppvarmingsystemet. Dette kan for eksempel være varme fra lys, utstyr og personer. Internlaster er med på å øke temperaturen i rommet. Dette er med på å redusere oppvarmingsbehovet om vinteren, men det vil øke kjølebehovet om sommeren.  $Q_{oppvarming}$  er varme som med hensikt tilføres rommet for å opprettholde oppvarmingsbehovet. Dette kan for eksempel være varme fra radiatorer. Varmetilskudd fra oppvarming er en faktor det er mulig å styre, kontrollere og optimalisere.

$Q_{transmisjon}$  er varmeoverføring gjennom bygningskroppen. Dette kan for eksempel være varmeoverføring fra et oppvarmet rom til kjølig uteluft om vinteren, eller fra et rom gjennom innvendig vegg til et annet rom med lavere temperatur. Retningen på varmeoverføringen er

## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

avhengig av temperatur, og transmisjon vil derfor kunne gi både varmetilskudd og varmetap. Varmeoverføring gjennom transmisjon kan reduseres ved å redusere U-verdi og kuldebroer til bygningskroppen.

$Q_{infiltrasjon}$  er varmeoverføring via luft gjennom åpninger eller lekkasjer i bygningskroppen.  $Q_{ventilasjon}$  er varmeoverføring via tilført ventilasjonsluft. Infiltrasjon vil gi varmetap eller varmetilskudd avhengig av utetemperaturen. Mengde infiltrasjon er avhengig av trykkforskjeller, temperaturforskjeller og vindforhold. Om vinteren siger for eksempel varm luft ut av bygget og skaper tap. Åpning av vinduer kan være en måte å skape ønsket infiltrasjon og naturlig ventilasjon for å kjøle inne. Ventilasjon er nødvendig for å tilføre frisk luft i rommet for å opprettholde god luftkvalitet og akseptabelt temperaturnivå. Ventilasjon er hovedsakelig en kilde for varmetap, men kan også blir brukt for oppvarming av rom, og dermed gi varmegevinst.

### 2.4 Fjernvarme

I et fjernvarmesystem overføres varmeenergi i form av varmt vann gjennom rør fra fjernvarmesentral til bygninger. Energikilden kan være avfallsforbrenning, gass, olje, strøm eller overskuddsvarme fra industri (Rosvold, 2021). Energibæreren varmes opp av energikilden i varmesentralen og transporteres til forbruker i et dobbelt rørrnettverk bestående av tur- og returledning. Fjernvarme kan brukes til romoppvarming, oppvarming av ventilasjonsluft og tappevann eller kjøling. Fjernvarmesystemene kan variere i størrelse, i Trondheim finnes et større fjernvarmenett med flere varmesentraler og mange tusen kunder. Distribuert energi i fjernvarmenettet bestemmes av volumstrømmen og temperaturforskjellen mellom tur- og returtemperatur.

### 2.5 Ventilasjon

Ventilasjon er essensielt for å opprettholde et godt inneklima i et bygg. Det finnes flere ulike ventilasjonstyper og metoder for styring og regulering. Ventilasjon er en stor energipost i bygninger, og det er ofte stort potensiale for innføring av energiøkonomiske løsninger i eksisterende ventilasjonssystemer.

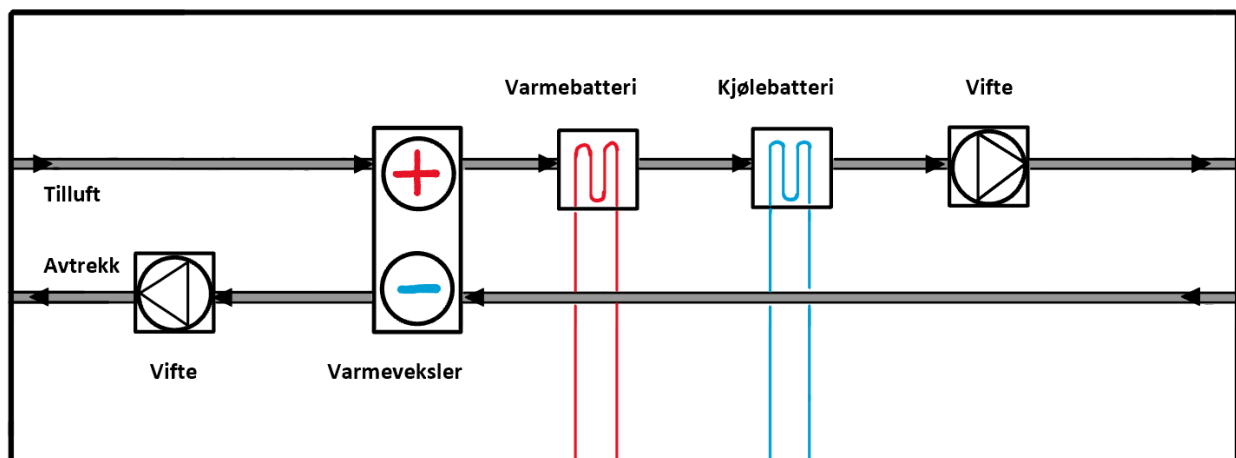
### 2.5.1 Ventilasjonstyper

Ventilasjon kan deles inn i naturlig eller mekanisk. Om man kombinerer naturlig og mekanisk ventilasjon blir det kalt hybrid ventilasjon. Naturlig ventilasjon er det eldste prinsippet for ventilering av bygg og går ut på å utnytte naturlige oppdriftskrefter og/eller vindtrykk for å tilføre frisk luft og fjerne forurenset luft gjennom åpninger i bygningskroppen (Thue, 2021). Mekanisk ventilasjon går ut på å bruke en vifte for å tvinge luft inn og ut av bygget.

Balansert ventilasjon er en form for mekanisk ventilasjon hvor luftmengdene til tilluft og avtrekk er like. Med balansert ventilasjon oppnår man kontrollerte luftmengder som gir et godt inneklima og reduserte sjanser for fuktskader (Enova, 2016). Ventilasjonstypen er spesielt viktig i tette bygg hvor det er liten grad av infiltrasjon og lite frisk luft slipper naturlig inn i bygget. En av hovedfordelene med balansert ventilasjon er at en varmegjenvinner kan bli brukt til å overføre varme fra avtrekksluft til tilluft. På den måten kan oppvarmingsbehovet for tilluft reduseres.

### 2.5.2 Ventilasjonsaggregatet

Et balansert mekanisk ventilasjonsanlegg består hovedsakelig av kanalnettet med spjeld og ventiler, og et ventilasjonsaggregat. Ventilasjonsaggregatet sørger for sirkulering og regulering av luften i ventilasjonssystemet. Et ventilasjonsaggregat i et balansert ventilasjonssystem består blant annet av vifter, filtre, varmegjenvinner og varme- og kjølebatteri (Ingebrigsten, 2019). I Figur 2.4 presenteres en forenklet systemtegning av et standard ventilasjonsaggregat.

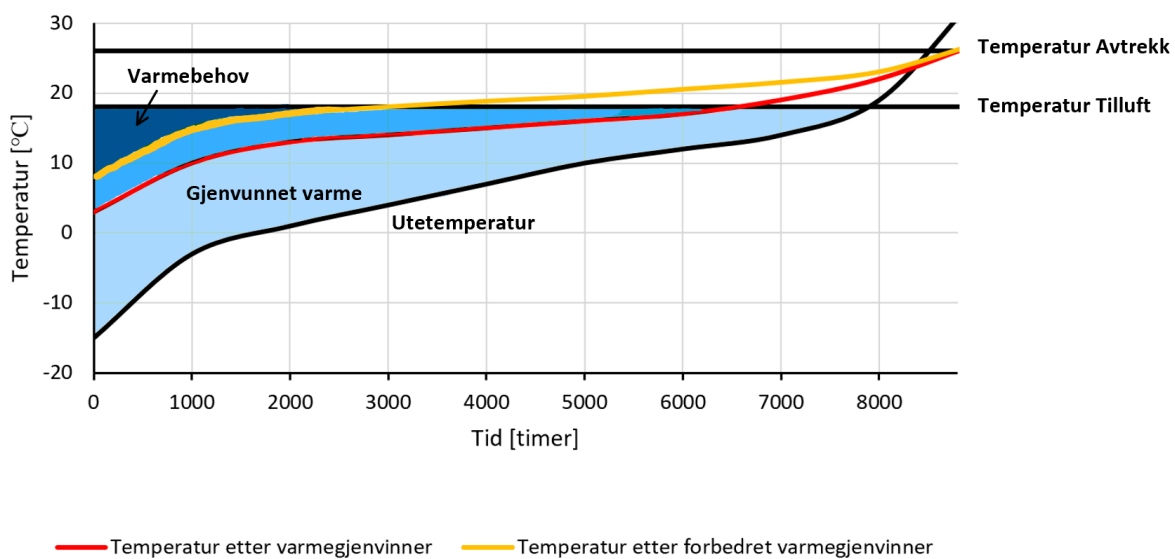


Figur 2.4: Forenklet systemtegning av et standard ventilasjonsaggregat.



## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

Aggregatet i Figur 2.4 deles inn i en tilluftsside og en avtrekksside. På begge sider er det vifter som tvinger luft inn og ut av aggregatet. En varmegjenvinner er plassert mellom tilluft- og avtrekkssiden og på tilluftssiden er det i tillegg et varmebatteri og et kjølebatteri. Varmegjenvinneren sørger for at varme fra avtrekksluften kan bli overført til tilluften, og varme- og kjølebatteriet sørger for at tilluftstemperaturen er akseptabel. Om man ønsker å redusere energiforbruket knyttet til ventilasjonsanlegget er det spesielt vifter og varmegjenvinner man må se på. Virkningsgraden til disse komponentene har stor innvirkning på effektiviteten til anlegget. I Figur 2.5 illustreres potensiale for spart energi ved bruk av en forbedret varmegjenvinner.



Figur 2.5: Illustrasjon av potensiale for varmegjenvinning for ventilasjon (Cao, 2021).

Figur 2.5 viser varighetskurve for utetemperaturen over et år, og hvilket potensiale det er for gjenvinning av varme. Den røde linjen representerer temperaturen på oppvarmet luft etter varmegjenvinning, og den gule linjen representerer tilsvarende for en forbedret varmegjenvinner. Gjenvunnet varme tilsvare arealet mellom graf for utetemperatur og graf for temperatur etter varmegjenvinner. Varmebehovet som videre må tilføres av varmebatteriet tilsvare arealet mellom graf for temperatur etter varmegjenvinner, og graf for ønsket temperatur på tilluft. Det er tydelig at varmebehovet er lavere for den forbedrede varmegjenvinneren.

I nye tette bygg er oppvarmingsbehovet lavt og det er mulig å benytte seg av forenklete løsninger til romoppvarming (Thunshelle, 2016), for eksempel oppvarming via tilluft. Grunnet varmegjenvinnere med høy virkningsgrad kan dette redusere energiforbruket sammenlignet med

## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

oppvarming med radiator. I eldre bygg er varmetapstallet høyt og levert luftmengde, samt tilluftstemperatur må økes betraktelig for å opprettholde settpunkt ved oppvarming via ventilasjon. Dette kan resultere i dårlig termisk komfort for brukerne.

### 2.5.3 Styring og regulering av ventilasjon

Styring og regulering av ventilasjon er essensielt for å oppnå et godt inneklima på en energieffektiv måte. Rom med ulike bruksområder og driftstid har forskjellige behov som gjør at enkelte styrings- og reguleringsmetoder egner seg bedre enn andre. Styring av spjeld i ventilasjonssystemet kan deles inn i tre kategorier:

- CAV (Constant Air Volume)
- VAV (Variable Air Volume)
- DCV/Behovsstyrt ventilasjon (Demand Controlled Ventilation)

Spjeld i ventilasjonsanlegget brukes for å kontrollere at riktig mengde luft distribueres til riktig sted (Tekna, 2020). CAV-spjeld er forhåndsinnstilte i en statisk posisjon og leverer derfor alltid samme mengde luft til de ulike rommene i bygget. Denne typen spjeld egner seg best for rom hvor belastning av personer og varme ikke varierer mye. VAV-spjeld er dynamiske og kan derfor levere ulike luftmengder avhengig av behovet i rommet. Spjeldet har forhåndsinnstilte posisjoner som den regulerer mellom. VAV-spjeld egner seg derfor godt når det er store belastningsvariasjoner for personer og varme. Målinger og energisimuleringer har vist at det kan spares mellom 30 og 40 kWh/m<sup>2</sup> per år ved bruk av VAV sammenlignet med CAV (Tekna, 2021).

Den siste formen for styring er DCV-spjeld. Behovsstyrt ventilasjon er en type VAV-styring, men DCV-spjeld er litt mer kompliserte enn de klassiske VAV-spjeldene. Et DCV-spjeld er motorisert og kommuniserer med sensorer plassert i rommet (Tekna, 2020). Kommunikasjonen med sensorene gjør at man kan måle effekten av den varierende luftmengden. Det er da mulig å undersøke om den påtrykte luftmengden gir utslag på parametere i rommet, og videre regulere luftmengde for å møte rommets behov. DCV-spjeld kan være med på å kutte energiforbruket til flere av energipostene i ventilasjonssystemet og er derfor en effektiv metode for å ivareta et godt inneklima på en energieffektiv måte. Behovsstyrt ventilasjon vil for eksempel påvirke vifteenergi,

## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

oppvarming og kjøling av ventilasjonsluft, romoppvarming og automatikk (Mysen & Schild, 2014).

For at det skal være mulig å styre ventilasjon etter behov, må mengde tilført friskluft reguleres etter en parameter. Dette kan for eksempel være tidsstyring, regulering av temperaturnivå, eller regulering av CO<sub>2</sub>-konsentrasjon. Det er også mulig å styre ventilasjon ved å regulere etter flere av parameterne samtidig.

Å regulere ved bruk av tidsstyring er billig, men kan gi store avvik i tilstrekkelig luftmengde og faktisk luftmengde. Regulering etter temperatur vil forsikre at temperaturen alltid holder seg på et akseptabelt nivå. Dette er en god løsning spesielt på sommeren eller når man har rom med høye internlaste. Når man regulerer etter CO<sub>2</sub>-konsentrasjon forsikrer man seg om at konsentrasjonen alltid holder seg på et akseptabelt nivå (Mysen & Schild, 2014). Dette er spesielt egnet for rom med høy personbelastning og lavt kjølebehov. I rom hvor det er usikkerhet om CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen eller temperaturen når akseptabelt nivå først, er det gunstig å regulere etter begge parametere. Dette kan ha noe høyere investeringskostnader, men vil resultere i et bedre inneklima.

I tillegg til at man kan regulere luftmengde som tilføres rommen er det også mulig å variere temperaturen på tilluften. Den vanligste måten å gjøre dette på er å variere tilluftstemperaturen etter utetemperatur. Dette skaper ofte minimale endringer i tilluftstemperaturen i løpet av året, og det er enkelt å forutsi hvor mye energi som kreves til oppvarming. Ved bruk av denne metoden vil likevel ikke tilluftstemperaturen alltid være tilpasset forholdene i rommet. Dette kan løses ved å variere tilluftstemperaturen etter kontroll av avtrekkstemperaturen i rommet. Da vil tilluftstemperaturen variere i mye større grad og inneklima kan forbedres. En av ulempene med reguleringsmetoden er den store usikkerheten rundt temperaturen på tilluften og hvor mye energi som vil kreves til oppvarming. Kontroll av avtrekkstemperatur kan likevel spare energi i rom med høye internlaste, om tilluftstemperaturen tidligere har vært høyere enn nødvendig.

### **2.6 Kontrollsystemer og regulatorer**

Hensikten med kontrollsystemer i bygg er å holde det innvendige miljøet på et akseptabelt nivå (Novakovic, et al., 2007). For eksempel kan radiatorer styres etter settpunkttemperatur, ventilasjon kan styres etter CO<sub>2</sub>-nivå i rommet og lys kan styres av bevegelsessensorer. Overordnet styring av

## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

en bygning skjer i et sentralt driftsanlegg, som sender signaler til regulatorene om hvordan enkeltkomponenter skal styres.

Det skilles mellom åpen sløyfe og lukket sløyfe kontroll. Åpen sløyfe kontroll er regulering etter forstyrrelser og ikke etter variabelen som skal kontrolleres. Et eksempel på dette er kontroll av tilluftstemperatur basert på utetemperatur. I lukket sløyfe kontroll reguleres pådraget basert på avviket som oppstår når kontrollert verdi avviker fra ønsket verdi. Dette prinsippet brukes dersom tilluftstemperaturen styres etter temperaturen på lufta etter varmebatteriet i ventilasjonsaggregatet (Novakovic, 2021).

Med utgangspunkt i hvor lett eller vanskelig noe er å regulere, kan forskjellige typer regulatorer brukes. En P-regulator, hvor P står for proporsjonal, multipliserer avviket mellom målt verdi og referanseverdi med en konstant for å beregne nødvendig pådrag. Dette er den enkleste regulatoren. Problemet med en P-regulator er at pådraget reduseres jo mindre avviket blir, og det vil aldri være mulig å opprettholde referanseverdi. En PI-regulator løser dette problemet ved å integrere avviket mellom målt verdi og referanse, slik at pådraget aldri blir null, selv om avviket er null. I-leddet i en PI-regulator står for integral. Videre finnes det også PD-regulatorer, hvor D-leddet står for derivat. En PD-regulator innfører demping i reguleringsystemet, som hjelper til med å nå referanseverdien fortere. Om alle regulatorene kombineres får man en PID-regulator, som er den vanligste regulatoren å bruke, og som har egenskapene til alle de tre nevnte regulatorene (Gravdahl, 2016).

### **2.7 Økonomi**

Energiøkonomisering (ENØK) et begrep som brukes for å omtale optimal energiteknisk og økonomisk utnyttelse av tilgjengelige energiresurser (Rosvold & Halleraker, 2021). Et ENØK-tiltak skal derfor redusere energibruk og være økonomisk lønnsomt, samtidig skal ikke tiltaket gå utover komfort for brukere. For å vurdere om et tiltak bør implementeres eller ikke, er det derfor viktig å vurdere lønnsomheten av tiltaket, energibesparelser og påvirkningen på innneklimaet i bygget. Energibesparelser og innneklima kan simuleres med bygningssimuleringsprogram som presenteres i kapittel 2.10.

## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

### 2.7.1 Lønnsomhetsberegning

Netto nåverdi (NPV) er en måte å kalkulere lønnsomhet. Metoden går ut på å beregne alle utgifter og inntekter til dagens verdi ved diskontering, altså beregne kapitalverdien av investeringen. En investering er lønnsom dersom netto nåverdien er større enn 0. Netto nåverdi beregnes med Formel 2.2, hvor  $B$  er årlige besparelser,  $S$  er restverdi,  $N$  er investeringens økonomiske levetid,  $I$  er investeringskostnad og  $r$  er diskonteringsrenten (Novakovic, et al., 2007). Diskonteringsrenten refererer til risikoen ved investeringen. Middels risiko tilsvarer en diskonteringsrente på omtrent 5 % (Copiello, 2021).

*Formel 2.2: Netto nåverdi.*

$$NPV = B \frac{1 - (1 + r)^{-N}}{r} + S(1 + r)^{-N} - I$$

Refusjonstiden for investert kapital kalles tilbakebetalingstid og kan beregnes med Formel 2.3, hvor  $N_0$  er tilbakebetalingstiden,  $B$  er årlige besparelser,  $I$  er investeringskostnad og  $r$  er diskonteringsrenten (Novakovic, et al., 2007). Netto nåverdi er 0 når tilbakebetalingstiden er nådd.

*Formel 2.3: Tilbakebetalingstid.*

$$N_0 = \frac{\ln \left( \left( 1 - \frac{I}{B} * r \right)^{-1} \right)}{\ln (1 + r)}$$

### 2.7.2 Total Concept

De fleste byggherrer ønsker kun å investere i et energibesparende tiltak dersom det er lønnsomt. Ved bruk av mange av dagens lønnsomhetsanalyser blir derfor flere forslag om gjennomføring av energibesparende tiltak forkastet. Bakgrunnen for at tiltak ikke blir beregnet til lønnsomme er hovedsakelig er at man ser på enkelttiltak hver for seg og ikke i sammenheng med andre tiltak og investeringer. Dette problemet er forsøkt løst av metoden Total Concept.

Total Concept er en metode og et verktøy for å analysere lønnsomheten for investering av energibesparende tiltak i eksisterende yrkesbygg (Wahlström & Maripuu, 2017). Metoden har som mål å motivere byggherrer til å renovere eksisterende bygg mot energieffektive nullutslippsbygg. Dette skal gjøres ved å innføre ambisiøse, men lønnsomme, oppgraderingspakker. Metoden skiller

## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

seg fra andre lønnsomhetsanalyser ved at en pakke med flere tiltak blir sett på i helhet, fremfor å evaluere tiltak alene. Dette har vist seg å kunne redusere energiforbruket med opptil 50 %. Metoden gjør det mulig for mindre lønnsomme tiltak å bli gjennomført fordi de mer lønnsomme tiltakene «gjør opp for» det økonomiske tapet.

### 2.7.3 Kostnader ved energibruk

Det er mange kostnader å ta hensyn til ved lønnsomhetsberegninger. I dette delkapitlet vil de løpende kostnadene ved energibruk presenteres.

#### Elektrisitetspris

Elektrisitetsprisen er prisen for elektrisk kraft per kWh. Prisen er markedsstyrt og bestemmes av kraftmarkedet Nord Pool. Prisen påvirkes av tilbud og etterspørsel. I lengre kuldeperioder som fører til økt strømforbruk til oppvarming vil prisen være høy. Siden ca. 90 % av den norske krafta kommer fra vannkraft (Energifakta Norge, 2021), påvirker størrelsen på vannreservoarene prisen i stor grad. I 3. kvartal i 2020 var elektrisitetsprisen på 14,4 øre/kWh, 66 % mindre enn prisen i 3. kvartal i 2019, fordi fyllingsgraden i vannreservoarene var høy (Aanensen, 2020). Elektrisitetsprisen vil variere i løpet av dagen, og er høyest når etterspørselen er høy. Dette er typisk på morgenen og ettermiddag etter endt arbeidsdag. Det vil derfor være gunstig med effekttopper som inntreffer til tider på døgnet med lav etterspørsel.

#### Nettleie

Nettleien er prisen for distribusjon av elektrisitet. Den betales til netteieren av distribusjonsnett i området. I Trøndelag er netteieren Tensio. Nettleien bestemmes av netteieren, men er strengt regulert av Reguleringsmyndigheten for energi. Historisk sett har nettleieprisen blitt bestemt av et fastledd og et energiledd (Elvia, 2021). Fastleddet er en fast pris alle som er tilknyttet nettet betaler til netteier. Energileddet beregnes ut ifra mengde energi levert til kunden. For å utjevne effekttopper og unngå å måtte øke kapasiteten på nettet er nettleieprisen endret til å inkludere en effektavgift. Avgiften belønner kunder med lav samtidighet for effektuttaket, samt kunder med forbruk utenfor tradisjonelle effekttopper.

For bedrifter tilknyttet distribusjonsnett eid av Tensio inkluderer nettleien fastbeløp, energipris, forbruksavgift og effektpris. Fastbeløpet er 4 800 kr/år. Energiprisen og forbruksavgiften

## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

kombinert utgjør 13,91 øre/kWh fra januar til april og 20,41 øre/kWh resten av året (Tensio, 2022). Effektprisen er avhengig av sesong samt maksimum effektuttak den aktuelle måned. Effektprisen er presentert i Tabell 2.1.

Tabell 2.1: Effektpris for elektrisitet vinter (nov-april) og sommer (mai-okt) (Tensio, 2022).

Månedlig effekttopp [kW]	Vinter [kr/kW/mnd]	Sommer [kr/kW/mnd]
0 – 99	59	39
100 – 399	49	33
>400	39	27

### Fjernvarme

Fjernvarmeprisen består av offentlige avgifter, energipris og nettleie. For privatkunder er nettleien fast, mens for næringskunder består den av forbruk og effektavgift (Statkraft, 2021). Ifølge energiloven § 5.5 skal ikke prisen for fjernvarme overstige prisen for elektrisk oppvarming i vedkommende forsyningsområde (Energiloven, 1990).

Statkraft eier fjernvarmenettet i Trondheim. For næringskunder består fjernvarmeprisen av effektledd, energiledd og volumledd. Energileddet består av månedsmiddel for forsyningsområdet, samt påslag for nettleie, elsertifikat og forbruksavgift. Volumprisen er 3,13 kr/m<sup>3</sup>, men gjelder kun fra november til februar. Effektleddet varierer avhengig av sesong og maksimum effektuttak i en måned, prisen er presentert i Tabell 2.2 (Statkraft, 2021). Effektprisen for fjernvarme og elektrisitet er lik, men prisen må beregnes separat, da distributørene for elektrisitet og fjernvarme ikke er de samme.

Tabell 2.2: Effektpris for fjernvarme for vinter (nov-april) og sommer (mai-okt) (Statkraft, 2021).

Månedlig effekttopp [kW]	Vinter [kr/kW/mnd]	Sommer [kr/kW/mnd]
0 – 99	59	39
100 – 399	49	33
>400	39	27

### Avgifter

Ved kjøp av varer og tjenester må merverdiavgift (mva) betales. Mva gir et påslag på 25 % på strømpris, nettleie og andre avgifter. I tillegg er det andre avgifter, som elsertifikater, en

## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

støtteordning til kraft produsert av fornybare kilder. Enova-avgiften går til Enova, et selskap som støtter energitiltak både for privatpersoner og bedrifter. Inntekter fra elavgiften går til staten (EnergiNorge, 2020).

### **Fremtidig energipris**

Ettersom energimarkedet er et verdensmarked, vil prisen på fjernvarme og elektrisitet være avhengig av mer enn produksjonskostnader og tilbud og etterspørsel i Norge. Økt overføringskapasitet for import og eksport av strøm til utlandet knytter de tradisjonelt billige strømprisene i Norge til markeder hvor prisen er sterkt knyttet til prisen på gass og kull (Holstad, 2022). På grunn av lovgivningen om at fjernvarmeprisen skal ligge under elektrisitetsprisen økes prisen på fjernvarme når elektrisitetsprisen går opp. De siste månedene har prisen på strøm økt til rekordnivåer. Det er ikke forventet at disse prisene vil bli den nye normen, men NVE predikerer at prisene vil øke med 3-5 øre/kWh mot 2040. I tillegg er det ventet at prisene vil variere i større grad enn den historiske normen (NVE, 2021).

### **2.8 Tiltak for energieffektivisering**

I juni 2016 vedtok Stortinget et mål om å redusere energibruk i eksisterende bygg med 10 TWh sammenliknet med datidens nivå innen 2030 (Stortinget, 2016). I den forbindelse utarbeidet Gehør strategi og rådgivning AS en rapport for Lavenergiprogrammet med formål om å identifisere kostnadseffektive energitiltak i eksisterende norsk bygningsmasse. Potensialet for energieffektivisering ble beregnet for en tidshorisont på 20 år. For yrkesbygg, herunder kontorbygg, undervisningsbygg og forretningsbygg, vil følgende energitiltak gi de største besparelsene (Grini, et al., 2017):

- Installasjon av varmepumper kan gi besparelse på 1,9 TWh
- LED-belysning og lysstyring kan gi besparelse på 1,8 TWh
- Forbedret varmegjenvinning av ventilasjonsluft kan gi besparelse på 1,7 TWh
- Driftsoptimalisering, herunder energioppfølgingssystem og bruk av SD-anlegg kan gi besparelser på 1,1 TWh

Det er viktig å understreke at effekten av et tiltak vil påvirke energibesparelsen i et annet tiltak. Det er derfor ikke mulig å estimere besparelsene ved å innføre samtlige av tiltakene over ved å summere besparelsene knyttet til hvert enkelt tiltak (Grini, et al., 2017).



## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

Det er mange grunner til å energieffektivisere bygg, Enova fremhever positive utslag på klima og økonomi, men også inneklime og dermed komfort for brukere av bygget. Komfortdelen er viktig da det kan føre til økt produktivitet og ytterligere økonomiske besparelser. Enova peker på 10 tiltak som de anbefaler. Det understrekes at tiltak må sees på i en helhet, da tiltak kan påvirke hverandre og redusere den totale gevinsten. Tiltakene som anbefales er som følger (Enova, 2021):

- Energiledelse og energioppfølgningssystem
- SD-anlegg og justering av driftstider og temperaturer
- Lysstyring
- LED-belysning
- Sikre god vannkvalitet i vannbårne varmeanlegg
- Isolering av varme rør, ventiler og kjelsystem
- Varmepumpe
- Etterisolering
- Utskifting eller tetting av vindu
- Varmegjenvinning i ventilasjonsaggregat

Det finnes mange studier hvor potensialet for energisparing er identifisert med ulike bygningssimuleringsprogram. Kang et al. (2015) brukte EnergyPlus til å undersøke energibesparelser i et skolebygg i Seoul i Sør-Korea ved bruk av passive eller aktive energisparingsstrategier. De aktive strategiene som ble implementert var varmegjenvinning av ventilasjonsluft, kontroll av belysning etter dagslysstyrke og kontroll av utvendig lysskjerming. Kontroll av belysning var det mest effektive aktive tiltaket med 28 % mindre energibehov enn referansebygget. På grunn av det store behovet for kjøling gikk energibehovet opp ved innføring av varmegjenvinning av ventilasjonsluft. Den passive strategien gikk ut på å redesigne bygget til en mer kompakt bygningskropp. Resultatet viste at energibehovet sank med 32 % (Kang, et al., 2015). Energibesparelsene for de passive strategiene er dermed større enn for de aktive. Dette understreker påvirkningen geometrien til bygningskroppen har på energiforbruket til et bygg.

Nattsinking er et tiltak som senker settpunkttemperaturen utenfor driftstid. Slik kan unødvendig oppvarming av bygget unngås. Avhengig av bygg og hvordan tiltaket er utformet har tiltaket medføre ulik energisparepotensiale. I et fransk skolebygg fra 1975 medførte varierende

## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

nattsenking ned til 15 °C, og krav om minst 19 °C innetemperatur ved driftsstart, et energisparepotensial på 5 % (Berthou, et al., 2013). Avhengig av den termiske massen til bygget kan nattsenking føre til økt effekttopp, da bygget må raskt varmes opp til driftstid. Dette kan til en viss grad løses ved gradvis lineær økning i settpunkttemperaturen over 1-2 timer. Dette ble undersøkt for en boligbygning og ga reduksjon i effekttoppen på mellom 10 % og 25 % sammenliknet med tradisjonell nattsenking (Date, et al., 2015).

### 2.9 Klimafotavtrykk fra bygningsinstallasjoner

Livssyklusanalyse (LCA) er et verktøy for å evaluere den totale miljøpåvirkningen fra et produkt i løpet av hele livsløpet. LCA kan gjennomføres for alt fra små produkter som ventiler eller sensorer, til hele bygninger. Analysen inkluderer alt fra uthenting av råmaterialer, produksjon, bruksfase, transport og avfallshåndtering (Kjeken, 2021).

En EPD (Environmental Product Declaration) er en tredjepartssertifisert miljødeklarasjon som inneholder en LCA til et produkt etter ISO 14040-14044 standarden (The Norwegian EDP Foundation, 2022). EPD inneholder LCA-resultater for ulike parametere for miljøpåvirkning i ulike faser av livsløpet. Systemgrensene i en LCA er presentert i Figur 2.6.

Produktfase			Konstruksjon installasjon fase		Bruksfase							Slutfase				Etter endt levetid
Råmaterialer	Transport	Tilvirkning	Transport	Konstruksjon installasjon fase	Bruk	Vedlikehold	Reparasjon	Utskiftinger	Renovering	Operasjonell energibruk	Operasjonell vannbruk	Demontering	Transport	Avfallsbehandling	Avfall til sluttbehandling	Gjenbruk-gjenvinning-resirkulering-potensiale
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

Figur 2.6: Systemgrenser i en LCA (VentiStål AS, 2022).

Som vist i Figur 2.6 angir produktfasen A1-A3 miljøpåvirkningen fra råmaterialer, transport og tilvirkning. Konstruksjon- og installasjonsfasen A4-A5 inneholder transport og konstruksjon og installasjon fase. Bruksfasen B1-B7 angir miljøpåvirkningen fra bruk. Vedlikehold, reparasjon, utskiftninger, renovering, operasjonell energibruk og operasjonell vannbruk. Slutfasen C1-C4 inkluderer demontering, transport, avfallsbehandling og avfall til sluttbehandling. LCA inneholder

## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

også fasen etter endt levetid D: gjenbruk-, gjenvinning- og resirkuleringspotensiale. Miljøpåvirkningene som deklarerer i en EPD er blant annet GWP (globalt oppvarmingspotensial) og ODP (potensial for nedbrytning av stratosfærisk ozon).

Ifølge NTNUs miljøutviklingsplan skal NTNU kutte klimagassutslippet med 50 %. ENØK-tiltak kan føre til reduksjon i energibruk i bygningsmassen, som vil ha direkte påvirkning på klimagassutslippet. Reduksjonen i klimagassutslippet fra energibruk er avhengig av energibæreren som blir redusert. Fjernvarme har i Trondheim en utslippsintensitet på 44,6 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh (Statkraft Varme, 2021). Utslippsintensiteten til elektrisitet er sterkt avhengig av elektrisitetsmiksen. Ifølge NVEs klimadeklarasjon for fysisk levert strøm i Norge, var utslippsintensiteten 17 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh, 8 CO<sub>2</sub>-ekv/kWh og 11 CO<sub>2</sub>-ekv/kWh i henholdsvis 2019, 2020 og 2021 (NVE, 2022). NVE har tatt høyde for import av strøm fra utlandet med annen energimiks enn Norge. Likevel foreslår ZEB-veiledningen at en høyere utslippsintensitet på 100 CO<sub>2</sub>-ekv/kWh bør benyttes (Fufa, et al., 2016).

ENØK-tiltak som innebærer utskiftning av komponenter, medfører iboende utslipp fra komponentene. Dette er utslipp som skjer i produktfasen A1-A3. For at et ENØK-tiltak skal være aktuelt, må iboende utslipp evalueres for å sikre at disse utslippene ikke overstiger reduksjonen i utslipp som følge av tiltaket.

### **2.10 Bygningssimulering**

Bygningssimulering benytter dynamiske matematiske modeller til å predikere ytelse i bygninger (Hensen & Lamberts, 2011). Det finnes forskjellige programmer som er nyttige å bruke avhengig av ytelsene som skal undersøkes.

Simien, EnergyPlus og IDA ICE er programmer som egner seg til undersøkelse av energiytelse og inn klima. For å vurdere hvilke programmer som er best egnet til et problem kreves god kjennskap til hvordan modellen bygges opp, kunnskap om begrensningene til programmet og hva som kreves av inndata. Det kan være vanskelig å oppdage tilfeldige feil i simuleringsprogrammer, så det er viktig å være nøye i oppbygning av modellen. Dessuten er det knyttet usikkerhet til standardiserte inndata fra for eksempel NS3031 Beregning av bygningers energiytelse. Standardisert inndata er en god indikasjon, men representerer ikke nødvendigvis det spesifikke bygget som skal simuleres.

## KAPITTEL 2: TEORETISK BAKGRUNN

Likevel er det mange fordeler med bygningssimulering, blant annet brukervennligheten, muligheten til å beregne dynamisk og til å modellere komponenter og systemer som planlagt bygget (Hensen & Lamberts, 2011).

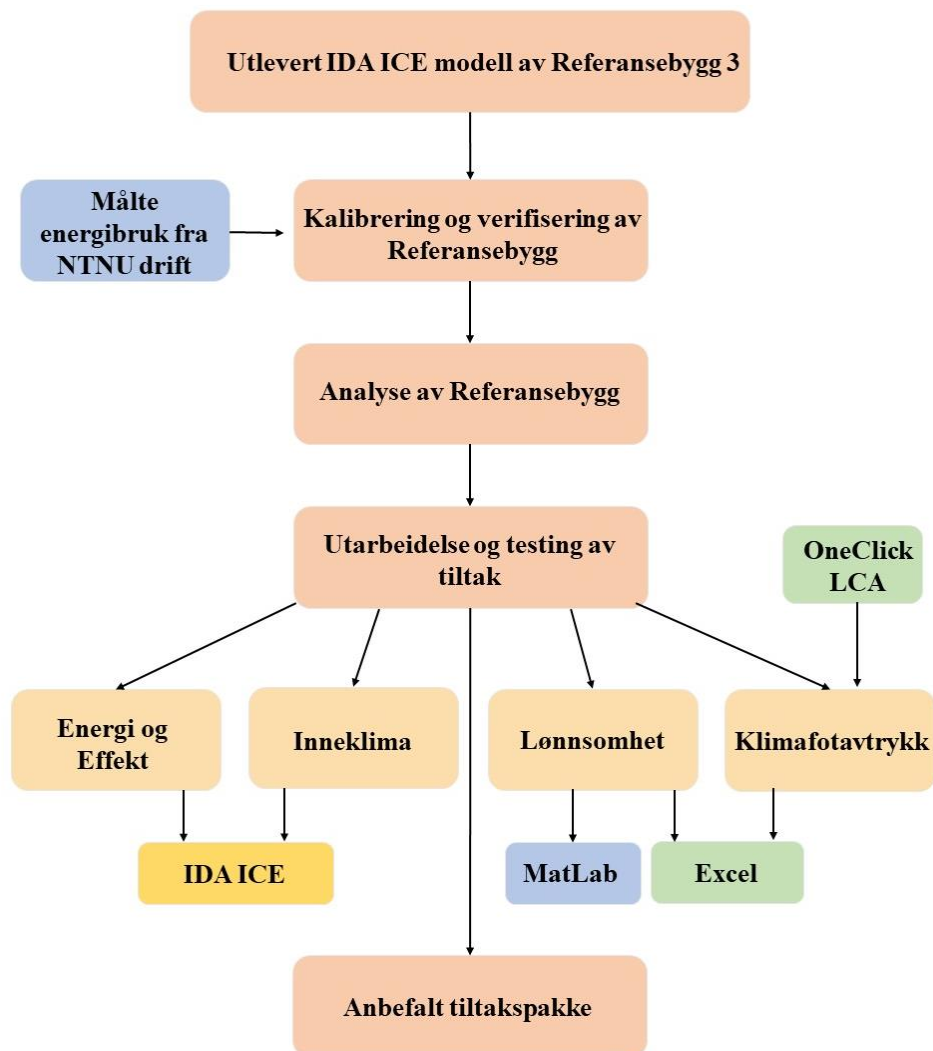
Testing av ENØK-tiltak kan enkelt gjøres med bygningssimulering ved å endre på modellen. Slik kan energiforbruket og inneklimate til bygget med implementerte ENØK-tiltak predikeres. Resultatet av simuleringen legger grunnlaget for vurderingen av tiltaket. Problemer under drift kan oppdages ved å sammenlikne den predikerte energiprofilen til bygget med den faktiske energiprofilen.

### 3 Metode

I dette kapitlet vil oppgavens overordnede metode presenteres. Videre presenteres metode for kalibrering og verifisering av referansebygget, utarbeidelse og presentasjon av tiltak, samt metode for beregning av klimafotavtrykk og lønnsomhet. Avslutningsvis vil metode for valg av anbefalt tiltakspakke presenteres.

#### 3.1 Overordnet metode

I dette delkapitlet vil oppgavens overordnede metode presenteres. En illustrasjon av arbeidsmetoden er vist i Figur 3.1, og vil videre bli presentert detaljert.



Figur 3.1: Illustrasjon av overordnet metode.

## KAPITTEL 3: METODE

I denne masteroppgaven skal simuleringsverktøyet IDA ICE benyttes til å identifisere ENØK-tiltak. Tiltakene testes for et referansebygg som representerer en bygningskohort med undervisningsbygg bygget mellom 1971-1999 på NTNU Gløshaugen. Målet med implementering av tiltak er å redusere energibruk og effekttopper, uten negativ påvirkning på termisk komfort og luftkvalitet. I tillegg skal tiltakene være lønnsomme. Tilbakebetalingstiden skal ikke være lenger enn 5 år, i henhold til NTNUs miljøutviklingsplan (NTNU, 2020). Iboende utslipp og reduksjon i operasjonelle utslipp skal evalueres for å sikre at tiltakene reduserer klimafotavtrykket til referansebygget.

Arbeidet er en videreføring av to tidligere masteroppgaver og eget arbeid fra prosjektoppgave. Eirik Andre Nesgård og Minh Huy Ngo utarbeidet i deres masteroppgave fire referansebygg i IDA ICE som hver skulle representere bygg på NTNU Gløshaugen fra forskjellige byggeperioder. Referansebygg 3 skal benyttes i denne masteroppgaven. En kalibrering av referansebygget utføres for å redusere avviket mellom simulert energiforbruk og målt energiforbruk. Fremgangsmåte for kalibrering og verifisering blir presentert i 3.2.

Ragna Gjerstad undersøkte i sin masteroppgave ulike ENØK-tiltak for reduksjon av energi- og effektforbruk i referansebygg 2, som representerer bygg fra perioden 1951-1970. I prosjektoppgaven ble det undersøkt om ENØK-tiltak tilpasset referansebygg 2 også vil være lønnsomme for referansebygg 3. Erfaringer fra dette arbeidet legger grunnlaget for videre utvikling av ENØK-tiltak for referansebygg 3.

Bygningssimuleringsprogrammet IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) skal i denne oppgaven benyttes til å simulere energiytelse og inneklima. Programmet er laget av det svenske selskapet EQUA Simulation AB, den første versjonen ble lansert i 1998. I denne oppgaven vil versjon 4.9.9 bli benyttet.

Tiltakene som skal simuleres er presentert i 3.3. Disse tiltakene er utviklet fra erfaring ved uttesting av tiltak i prosjektoppgaven og analyse av varmebalanse i referansebygget. Hvert tiltak skal evalueres basert på resultater fra årlig energisimulering i IDA ICE. Resultatene som tiltakene evalueres ut ifra er energiforbruk fra fjernvarme og elektrisitet, effektforbruk herunder varighetskurver, topplast for fjernvarme og elektrisitet og brukstid, avslutningsvis

## KAPITTEL 3: METODE

inneklimaparameterne CO<sub>2</sub>-konsentrasjon, luftens alder og termisk komfort. I tillegg skal lønnsomheten for tiltakene evalueres, samt potensialet for reduksjon i klimafotavtrykk. Målet er å finne den optimale kombinasjonen av tiltak for bygningskohorten.

Ved vurdering av termisk komfort for de ulike tiltakene, vil den adaptive komfortmodellen for bygg uten kjøling bli benyttet i IDA ICE. Modellen deler termisk komfort inn i tre akseptable kategorier. I denne oppgaven blir kategori I betegnet som «best», kategori II er «bra», kategori III er akseptabelt, og alt som får utenfor disse kategoriene regnes som «uakseptabelt». Evalueringen av termisk komfort blir kun gjort i timene hvor sonene er okkupert. Resultatene i IDA ICE blir gitt for hver sone, men i denne oppgaven vil kun sonen med best og verst termisk komfort bli presentert.

Hvilke resultater som presenteres for hvert tiltak er avhengig av hva som har et betydelig avvik fra referansebygget. Resultater som det er hensiktsmessig å analysere for en dag vil bli presentert for 27. januar og 25. mai, da disse dagene representerer en tilfeldig ukedag i og utenfor oppvarmings sesongen. Der det er hensiktsmessig å analysere mer enn en dag i oppvarmings sesongen er siste uke i januar, samt februar måned valgt.

### **3.2 Metode for kalibrering og verifisering av referansebygg**

For å sikre at referansebyggets energibruk samsvarer med målt energibruk for bygningskohorten, skal modellen kalibreres. Målte verdier for levert fjernvarme og elektrisitet per time i 2016 til bygningskohorten er innhentet fra NTNU drift. De målte verdiene er analysert, og store avvik er fjernet ved å erstatte avvikene med gjennomsnittet av verdien til foregående og neste time.

Referansebygget er levert av Nesgård & Ngo (2018) fra deres masteroppgave. En energisimulering, med klimafil for Trondheim, skal utføres for året 2016 for å hente ut verdier for elektrisitet- og fjernvarmeforbruk på timesbasis. Simulerte og målte verdier skal sammenliknes ved å lage grafer for spesifikt elektrisitets- og fjernvarmeforbruk separat.

Prøv- og feil-metoden brukes for å få simulerte verdier for energiforbruk til å avvike minimalt fra målte verdier. Elektrisitetsforbruket ble kalibrert under arbeidet med prosjektoppgaven med følgende metode. Elektrisitetsforbruket ble først kalibrert ved å endre på internlastene. For å finne

## KAPITTEL 3: METODE

korrekte internlaster for belysning, utstyr og grunnlast, ble et bygg uten laboratorier, sentralbygg 1, benyttet. Videre ble internlaster knyttet til laboratoriene lagt til. Disse varierer i løpet av året for at simulerte verdier for elektrisitet skal variere på samme måte som målte verdier.

For å kalibrere fjernvarmeforbruket skal følgende justeringer i referansebygget testes. Redusere varmekjelstørrelse til å stemme overens med maksimum effektuttak i bygningskohorten, justere internt varmetilskudd fra utstyrlaster, endring av byggets tidskonstant, endre bygningskroppen slik at bygget får større termisk kapasitet, samt endre styringsstrategien for åpning av vinduer slik at vinduene ikke åpnes på nattestid. I tillegg skal radiatorene i hver sone justeres til det faktiske varmebehovet til den enkelte sone.

For å verifisere den kalibrerte modellen skal en nærmere analyse av elektrisitetsforbruket og fjernvarmeforbruket utføres. Igjen vurderes elektrisitets- og fjernvarmeforbruket separat. Det beregnes et gjennomsnittlig effektuttak per time for elektrisitet for alle hverdager og helger separat for månedene februar, september og november. Både målte og simulerte verdier blir presentert. Det samme skal gjøres for fjernvarme, men de valgte månedene er februar, juli og november. Dette skal gjøres for å se nærmere hvordan simulerte verdier avviker fra målte verdier. Om avvikene er store vil referansebygget sammenlignes med enkelte bygg i bygningskohorten.

### **3.3 Metode for utarbeidelse og presentasjon av ENØK-tiltak**

Nær analyse av referansebygget gjennom kalibrering, verifisering og varmebalanse, samt erfaringer fra tiltak som fungerte bra i prosjektoppgaven legger grunnlaget for videre utforskning for energieffektive tiltak. I dette delkapittelet skal tiltakene som skal simuleres presenteres. Disse tiltakene må derfor ses i sammenheng med referansebygget som presenteres i kapittel 4 og analysen av referansebygget i kapittel 5.

#### **Tiltak 1 – Utskiftning av ventilasjonsaggregat**

Gjennomsnittlig virkningsgrad for varmevekslere i ventilasjonsaggregat i bygningskohorten er 0,56. Nyere ventilasjonsaggregat har gjerne varmevekslere med virkningsgrad rundt 0,80. Utskiftning av varmevekslerne har derfor høyt energisparepotensiale. Dessverre er det ikke reelt å kun bytte ut varmevekslere, vanlig praksis i rehabiliteringsprosjekt er nemlig å bytte hele ventilasjonsaggregatet. Utbygging av ventilasjonsaggregat kan simuleres i IDA ICE ved å endre



## KAPITTEL 3: METODE

virkningsgraden til varmevekslere og vifter. Gjennomsnittlig virkningsgrad for viftene i bygningskohorten er 0,60, mens nyere vifter kan ha virkningsgrad opp mot 0,80.

Tiltaket simuleres derfor ved å implementere 0,80 som virkningsgrad for både varmeveksler og vifter på samtlige ventilasjonsaggregat. Økt varmegjenvinningsgrad vil føre til lavere fjernvarmeforbruk og effekttopper, da varmen fra internlaster benyttes mer effektivt. Mer effektive vifter trenger mindre elektrisitet for å skape samme trykkforskjell for å bevege ventilasjonsluften, derfor forventes det at elektrisitetsforbruket og effekttopper for elektrisitet minimeres.

### **Tiltak 2 – Nattsinking med gradvis temperaturøkning mot driftstid**

I vurdering og verifisering av referansebygget ble det oppdaget at radiatorene ikke avgir effekt på dagtid på grunn av de høye internlastene, en utfyllende analyse er presentert i 5.4. I referansebygget er settpunkttemperaturen til radiatorene konstant 21°C hele døgnet. For å unngå unødvendig høye innetemperaturer utenfor driftstiden er nattsinking av settpunkttemperaturen til radiatoren et alternativ. I denne tiltakspakken er nattsinking testet med følgende settpunkttemperaturer: 16°C, 17°C, 18°C og 19°C. Nattsinkingen er innført mellom 17-05. For å unngå unødvendig høy effekttopp er gradvis økning av temperaturen innført, som avdekket i 2.8. Det vil si at temperaturen økes lineært fra nattsinkingstemperaturen til settpunkttemperaturen mellom 05-08. Mellom 08-17 er settpunkttemperaturen som i referansebygget, 21 °C.

I utgangspunktet vil lav settpunkttemperatur utenfor driftstid føre til mindre energibehov til oppvarming. Nattsinking kan derimot føre til økte effekttopper ved gjenoppvarming til driftstid. I tillegg er det viktig å ta den termiske kapasiteten til bygget i betraktning. I bygg med høy termisk kapasitet vil gjenoppvarmingen ta lengre tid enn i bygg med lav termisk kapasitet. Det kan føre til at det fortsatt er kaldt når driftstiden starter eller at radiatorene krever høyere effekt for å varme bygget tilstrekkelig. Det er derfor viktig å teste flere nattlige settpunkttemperaturer og sikre at nattsinkingen ikke fører til unødvendige effekttopper og negative påvirkninger på termisk komfort.

### **Tiltak 3 – Regulering av tilluftstemperatur ved kontroll av avtrekkstemperatur**

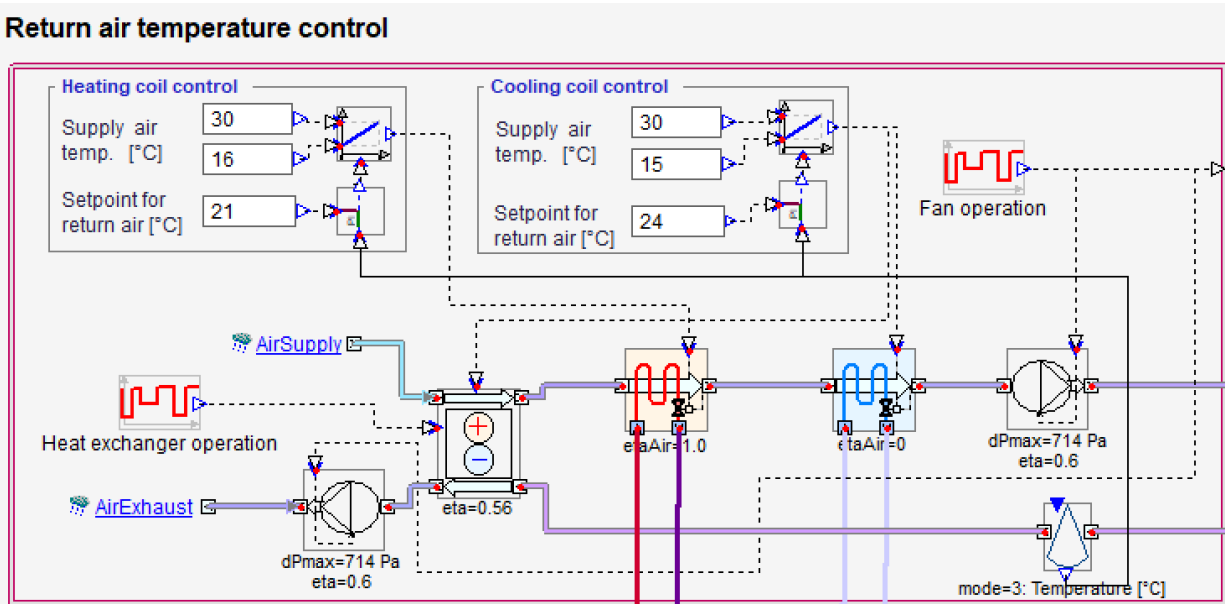
I referansebygget er tilluftstemperaturen satt til å variere som funksjon av utetemperaturen. Dette kan resultere i tilluftstemperaturen ikke er optimal i flere av sonene. Det betyr at man enten varmer

## KAPITTEL 3: METODE

opp tilluftstemperaturen til en unødvendig høy eller lav verdi, som kan påvirke radiator negativt. Ved analyse av adaptiv termisk komfortmodell i 5.3.2, kommer det frem at noen soner har unødvendig høye lufttemperaturer i rommet, og tilluftstemperaturen kan derfor være lavere. Dette kan resultere i besparelser i energi til oppvarming av luft.

Det er forventet ulike resultater for endring i energi- og effektforbruk for alle de ulike sonene. I sonene hvor internlastene er høye og temperaturen i rommet for høy, er det forventet at tilluftstemperaturen reduseres og dermed også energiforbruket. I rom med lave internlast og hvor termisk komfort allerede er bra, er det ikke forventet å se en betydelig endring i energiforbruket. Det er viktig å påpeke at radiatorene blir påvirket av endring i tilluftstemperatur. Analyse av hvordan levert effekt til radiator endrer seg etter implementering av tiltaket bør derfor undersøkes.

For å implementere regulering av tilluftstemperatur ved kontroll av avtrekkstemperatur blir ventilasjonsaggregatet erstattet i IDA ICE. Det blir valgt et ventilasjonsaggregat som heter «return air temperature control», hvor tilluftstemperaturen reguleres etter avtrekkstemperaturen. Selv om hele aggregatet erstattes i IDA ICE, antas det at de faktiske aggregatene kan oppgraderes med sensorer og regulatorer for å implementere tiltaket. En illustrasjon av implementasjonen i IDA ICE er presentert i Figur 3.2.



Figur 3.2: Ventilasjonsaggregat med "return air temperature control" fra IDA ICE.

## KAPITTEL 3: METODE

Figur 3.2 viser hvordan temperaturen i avtrekksluften blir kontrollert med en sensor nederst til høyre. Signalet blir videre sendt til en PI-regulator som sjekker temperaturen opp mot settpunkt på 21 °C, og finner nødvendig tilluftstemperatur mellom 16 °C og 30 °C for å opprettholde ønsket settpunkt. Et signal sendes da videre til varmebatteriet som varmer tilluften til ønsket temperatur. Det er også mulig å kjøle luften til ønsket settpunkt, men i referansebygget er det ikke noe kjølebatteri i ventilasjonsanlegget.

### **Tiltak 4 – VAV-styring av ventilasjon**

Tidligere i prosjektoppgave ble VAV testet i alle kontorsoner, noe som viste seg å redusere effektuttaket samtidig som det var lønnsomt. Grunnet store variasjoner i personbelastning i de ulike sonene i modellen er det forventet at VAV-styring vil redusere levert luftmengde i samtlige soner. Om luftmengdene reduseres vil man spare energi på oppvarming av tilluft, radiatorer kan levere mindre varme grunnet redusert varmetap fra luftstrømmer og viftene i ventilasjonsaggregatet trenger ikke jobbe like mye. Derfor er det gunstig å teste VAV-styring i alle sonene i modellen.

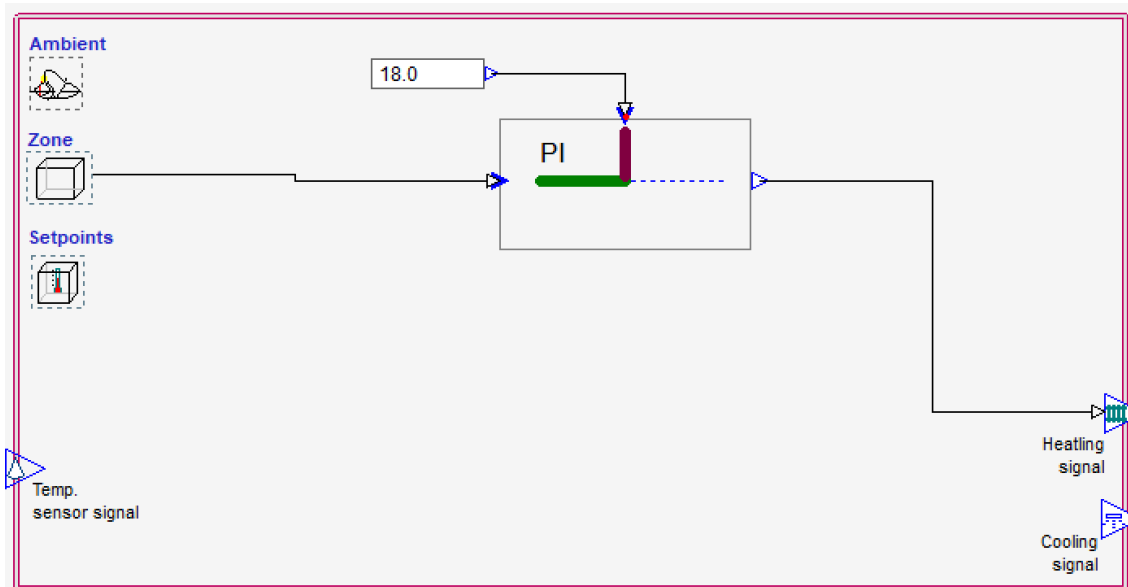
For å implementere tiltaket i modellen vil alle CAV-spjeld bli erstattet med VAV-spjeld. Minimum og maksimum luftmengde beholdes lik som luftmengden for CAV, slik kan eksisterende kanaler, ventiler og annet utstyr beholdes. Det er antatt av 250 spjeld må erstattes.

I IDA ICE, blir VAV-styring med kontroll av CO<sub>2</sub>- og temperaturnivå implementert i alle sonene. Settpunkt for CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i alle soner blir satt til minimum 400 ppm og maksimum 800 ppm, med mindre annet blir spesifisert. For temperatur er minimum settpunkt 21 °C og maksimum er 22 °C. VAV med CO<sub>2</sub>- og temperaturstyring i IDA ICE bruker maks verdi for CO<sub>2</sub>-konsentrasjon for å styre mengde tilluft, samtidig som den regulerer levert luftmengde for å holde temperaturen på et akseptabelt nivå (EQUA Simulation AB, 2013). Det er forventet store energi- og maksimum effektbesparelser, samtidig som inn klima skal opprettholdes på et akseptabelt nivå. I IDA ICE kalles funksjonen VAV-styring, men dette er i praksis behovsstyrt ventilasjon (DCV), ettersom styringen tar hensyn til tilstanden i rommet.

### Tiltak 5 – Delvis oppvarming via ventilasjon

Luftstrømmer står for store deler av varmetapet i sonene til referansebygget, som avdekket i 5.4. maksimum tilluftstemperatur er 19 °C, men settpunkttemperaturen i alle soner er 21 °C. Det ønskes å teste ut om å øke temperaturen på tilluften kan minimere varmetap fra luftstrømmer og dermed redusere levert varme fra radiatorer. Oppvarmingsbehovet vil da delvis bli dekket av ventilasjonsluften. Dette tiltaket kan potensielt spare energi ettersom oppvarming av tilluft tar i bruk en varmegjenvinner. Som nevnt kan oppvarming kun via tilluft gi dårlig termisk komfort i eldre bygg. I dette tiltaket vil derfor ikke radiatorene elimineres. I IDA ICE vil tiltaket bli testet på tre ulike måter, hvor tilluftstemperaturen fortsatt er utetemperaturkompensert.

- Sette eget settpunkt for radiator som kontrolleres med en PI-regulator. Settpunkt settes til mellom 17 °C og 20 °C. Regulatoren er presentert i Figur 3.3. VAV-styring med regulering av temperatur og CO<sub>2</sub>-nivå innføres i alle soner, og tilluftstemperatur i oppvarmingssesongen økes til mellom 20 °C og 26 °C.
- VAV-styring med regulering av temperatur og CO<sub>2</sub>-nivå innføres i alle soner og tilluftstemperatur i oppvarmingssesongen økes til 20 °C, 22 °C og 24 °C.
- Kun tilluftstemperatur økes i alle soner. Tilluftstemperaturene som testes er 20 °C, 22 °C og 24 °C i oppvarmingssesongen.



Figur 3.3: Egendefinert regulator i IDA ICE.

## KAPITTEL 3: METODE

### 3.4 Klimafotavtrykk

For å sikre at ENØK-tiltakene ikke bare reduserer energibruk, men også medfører reduksjon i klimafotavtrykket må iboende utslipp i tiltak, samt utslipp fra energiforbruk evalueres. Som avdekket i 2.9, foreslår ulike kilder forskjellige utslippsintensiteter for elektrisitet. For å ta høyde for dette skal utslipp i bruksfasen som følge av energibruk beregnes for samtlige tiltak for to utslippsfaktorer. Beregningen er gjort i Excel. Utslippsintensitetene for fjernvarme og elektrisitet benyttet i utslippsfaktor 1 og 2 er presentert i Tabell 3.1.

Tabell 3.1: Beskrivelse av utslippsfaktor 1 og 2.

Utslippsfaktor	Utslippsintensitet fjernvarme [g CO <sub>2</sub> -ekv/kWh]	Utslippsintensitet elektrisitet [g CO <sub>2</sub> -ekv/kWh]
1	44,6	10
2	44,6	100

Iboende utslipp fra tiltak skal også vurderes. EPD hentet fra OneClick LCA benyttes for å uthente iboende utslipp. Iboende utslipp fra tiltak 1-5 er presentert i Tabell 3.2.

Tabell 3.2: Iboende utslipp fra tiltak.

Tiltak	Iboende utslipp per komponent [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Totalt iboende utslipp [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
1	19 100	95 500
2	-	-
3	-	-
4	18	4 500
5	-	-

Som vist i Tabell 3.2 har et ventilasjonsaggregat iboende utslipp på 19 100 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Dette er fra VentiStål AS sin EPD på luftbehandlingsaggregat eQ50 (VentiStål AS, 2022). Dette ventilasjonsaggregatet har kapasitet på 17 000 m<sup>3</sup>/h og vil ikke være stort nok for alle soner i referansebygget. Det trengs 5 ventilasjonsaggregat for referansebygget. Siden det er få EPD tilgjengelig for ventilasjonsaggregater, må denne benyttes. Når 5 aggregat byttes ut, må de eksisterende aggregatene avfallshåndteres og gjenvinnes. Dette vil medføre endring i

## KAPITTEL 3: METODE

klimafotavtrykket. Dersom samme EPD benyttes til å identifisere ytterligere utslipp, vil gjenvinningen spare utslipp slik at det totale utslippet per ventilasjonsaggregat er 12 479 kg CO<sub>2</sub>-ekv.

For å forenkle er et 200 mm VAV-spjeld valgt, da det antas at dette vil være den gjennomsnittlige størrelsen på alle spjeldene som skiftes ut. Dette er også størrelsen spjeld med tilgjengelig EPD. Tabell 3.2 viser at iboende utslipp per spjeld er 18 kg CO<sub>2</sub>-ekv (Wildeboer Bauteile GmbH, 2015). Det antas at det trengs 250 nye spjeld. Avfallshåndtering av eksisterende spjeld er ikke hensyntatt.

Tiltak som kun inneholder endring i settpunkttemperaturer eller styringsstrategier antas ingen iboende utslipp. Det er mulig at noe nytt utstyr må installeres, som sensorer, men det antas at iboende utslipp fra dette er minimalt og neglisjerbart.

### 3.5 Lønnsomhetsanalyse

Et viktig vurderingsgrunnlag for tiltakspakkene er lønnsomhet. For hver tiltakspakke skal både netto nåverdi og tilbakebetalingstid beregnes og vurderes. Alle beregningene er gjort i Excel og er vedlagt i Vedlegg A.4. Netto nåverdi beregnes med Formel 2.2 og tilbakebetalingstid beregnes med Formel 2.3. Begge formlene er presentert i kapittel 2.7.1. I tiltakspakker med mer enn et tiltak er levetiden basert på gjennomsnittet av levetiden til de enkelte tiltakene. Diskonteringsrenten er 5 % da investeringenes risiko antas å være middels. Dersom enkelte tiltak, som er energibesparende, ikke beregnes til lønnsomme skal metoden Total Concept brukes.

For å sikre at vurderingen av lønnsomhet tar høyde for variasjoner i strøm- og fjernvarmepris skal årlige besparelser, i tillegg til netto nåverdi og tilbakebetalingstid, beregnes med ulike forslag for energipris og effektpris. Følgende prismodeller for energipris skal benyttes:

- 1,2 kr/kWh
- 1,0 kr/kWh + effektpris
- 1,2 kr/kWh + effektpris

Effektprisen beregnes med kode i MatLab, presentert i vedlegg A.1, i henhold til Tabell 2.1 og Tabell 2.2. Elektrisitet og fjernvarme har samme tariffer for effektpris, men beregnes hver for seg

## KAPITTEL 3: METODE

for å få en realistisk pris. Energiprisen derimot er antatt lik for både elektrisitet og fjernvarme, og er basert på historiske priser som presentert i 2.7.3.

Investeringskostnadene til de ulike tiltakene er antatt basert på ulike kilder, men det knyttes usikkerhet til antagelsene. Følgende prisestimat og investeringskostnader er benyttet i vurderingen av lønnsomhet.

- I tiltak hvor kontrollstrategier er endret er investeringskostnaden satt til mellom 5000 kr og 20 000 kr. Dette er enkle tiltak som krever minimalt med arbeid å gjennomføre, men det vil alltid knyttes noen kostnader til tiltakene likevel.
- Et nytt ventilasjonsaggregat er antatt å koste omtrent 450 000 kr inkludert mva, se vedlegg A.2. Monteringskostnaden antas å være 250 000 kr.
- Oppgradering av styringsstrategi for ventilasjon fra CAV til VAV medfører utskiftning av spjeld. VAV-spjeldenes pris avhenger av størrelsen, det antas en gjennomsnittlig pris per spjeld på 3000 kr (Trox, 2022). Monteringskostnaden antas å være 500 000 kr.

### **3.6 Anbefalt tiltakspakke**

Etter analyse av resultater for hvert enkelt tiltak, vil det bli anbefalt en kombinasjon av tiltak som bør testes sammen. Tiltakene blir implementert i IDA ICE på samme måte som da de ble testet individuelt, med mindre annet er spesifisert. Resultatene fra simulering av den nye tiltakspakken vil bli analysert og hvordan de ulike tiltakene påvirker energi, effekt og inneklime vil bli diskutert. Om noen av tiltakene ikke egner seg i kombinasjon med andre, vil de bli fjernet fra den anbefalte tiltakspakken. Avslutningsvis vil en analyse av klimafotavtrykk og lønnsomhet bli utført.

## 4 Referansebygget

I dette kapittelet skal referansebygget presenteres. Modellen ble etablert av Eirik Andre Nesgård og Minh Huy Ngo til deres masteroppgave. All informasjon om referansebygget er derfor hentet fra denne masteroppgaven.

Referansebygget er en modell i IDA ICE som skal representere typiske bygg på NTNU Campus Gløshaugen. Nesgård & Ngo etablerte fire referansebygg, men denne rapporten vil kun undersøke en av modellene; referansebygg 3 som representerer bygningskohorten med bygg fra 1971-1999. Kohorten består av byggene presentert i Tabell 4.1.

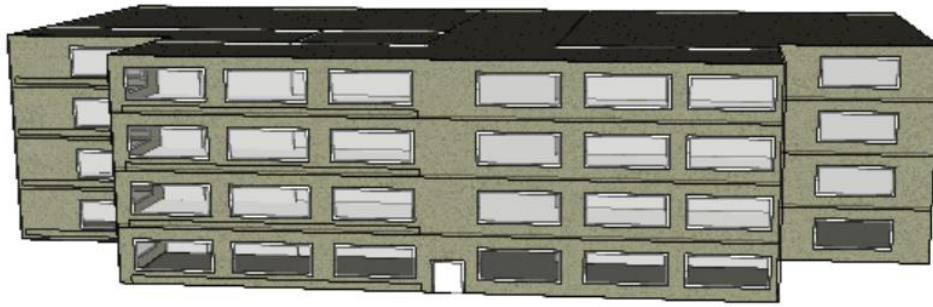
Tabell 4.1: Bygninger i bygningskohort 3.

Bygg	Byggear	Oppvarmet BRA [m <sup>2</sup> ]
Elektro D+B2	1971	6228
IT Bygget	1973	5484
Byggteknisk	1975	18175
Berg avd	1981	3955
Elektro E+F	1986	10457
Produktdesign	1996	2476

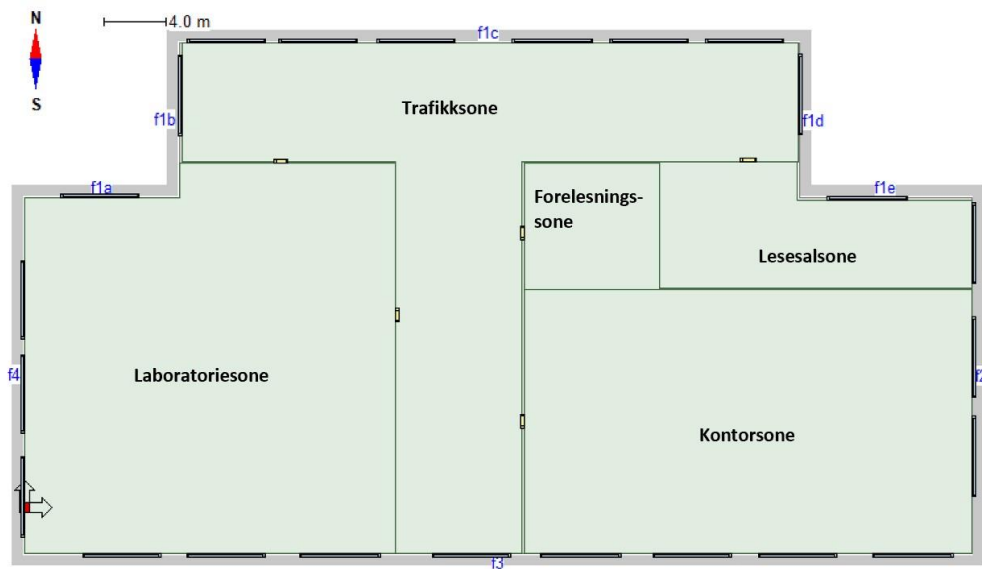
På grunn av tidsbegrensning ble bygningsgeometrien til referansebygget etablert basert på byggene i bygningskohort 2. Geometrien er generell og er vurdert som tilstrekkelig for formålet til denne rapporten. Referansebygget i IDA ICE er vist i Figur 4.1. Modellen har fire identiske etasjer, hver etasje består av fem soner: Laboratorium, trafikkareal, forelesningssal, lesesal og kontor, som vist i Figur 4.2. Prosentvis sonfordeling er presentert i Tabell 4.2. Hver etasje har bruksareal 1790 m<sup>2</sup>, totalt bruksareal for referansebygget er 7160 m<sup>2</sup>. Inndata for bygningskroppen er basert på energiattester fra Norges vassdrag- og energidirektorat for hvert bygg i bygningskohorten, og er arealvektet for å finne en gjennomsnittlig verdi for referansebygget. Inndata til referansebygget i IDA ICE er presentert i Tabell 4.3.



## KAPITTEL 4: REFERANSEBYGGET



Figur 4.1: Referansebygget i IDA ICE.



Figur 4.2: Planløsning i hver etasje i referansebygget.

Tabell 4.2: Prosentvis sonefordeling.

Romtype	Prosentvist areal av totalt areal [%]
Kontor	27,54
Lesesal	7,65
Forelesning	4,00
Laboratorium	32,7
Trafikkareal	28,63

## KAPITTEL 4: REFERANSEBYGGET

Tabell 4.3: Inndata til referansebygget i IDA ICE.

Kategori	Parameter	Verdi	Kommentar
U-verdi	Yttervegg [W/m <sup>2</sup> K]	0,36	
	Indrevegg [W/m <sup>2</sup> K]	0,62	Standard i IDA ICE
	Ytre gulv [W/m <sup>2</sup> K]	0,23	
	Indre gulv [W/m <sup>2</sup> K]	2,39	Standard i IDA ICE
	Vinduer [W/m <sup>2</sup> K]	1,98	
	Dører [W/m <sup>2</sup> K]	1,09	Standard i IDA ICE
	Tak [W/m <sup>2</sup> K]	0,27	
Generelt for bygningskroppen	Normalisert kuldebroverdi [W/m <sup>2</sup> K]	0,08	
	Lekkasjetall [h <sup>-1</sup> ]	2,42	

### Bruksmønster

Bruksmønster og brukerrate ble bestemt fra data fra NTNU Drift og NS 3031. Brukerraten for hver sone er presentert i Tabell 4.4, hvor brukerraten i lesesal, kontor og laboratorium er beregnet fra NS 3031. Brukerraten i forelesningssalen er basert på kapasiteten i forelesningssalene i Sentralbygg 1 og 2, mens i trafikkarealet er brukerraten summen av antall personer i lesesalene og forelesningssalene.

Tabell 4.4: Brukerrate i sonene.

Sone	Brukerrate [Personer/m <sup>2</sup> ]
Lesesal	0,2069
Kontor	0,0690
Laboratoriet	0,1034
Forelesningssal	0,8791
Trafikkareal	0,1765

## KAPITTEL 4: REFERANSEBYGGET

Bruksmønsterprofilene angir andelen av brukerraten som er til stede i sonene i løpet av 24 timer. Det er laget egne brukermønsterprofiler for vanlige ukedager, helg og eksamensperiode, i tillegg er det lagt til påskeferie, fellesferie og juleferie i modellen. Det er antatt full tilstedeværelse i kontorrom, laboratorierom, lesesal og forelesning fra kl 08 til kl 18. I trafikkareal er tilstedeværelsen størst i det akademiske kvarteret, altså i pausene til forelesningene. Brukermønsterprofilene for hver sone er presentert i Vedlegg A.3.

### Ventilasjon

Data om ventilasjonssystemet ble hentet fra NTNU Drift og energiattester fra NVE. Det er lagt til fem ventilasjonsaggregat i referansebygget, et aggregat per sonekategori. I laboratoriet er ventilasjonsaggregatet utstyrt med en rekuperativ varmegjenvinner for å unngå å overføre luft fra avtrekksluft til tilluft. De resterende aggregatene er utstyrt med regenerative varmegjenvinnere. Virkningsgraden til varmegjenvinnerne og spesifikk vifteeffekt er beregnet som et vektet gjennomsnitt av bygningene i bygningskohorten, og er henholdsvis 56 % og 2,38 kW/(m<sup>3</sup>/s). Virkningsgraden til varmegjenvinnerne er lav fordi ikke alle ventilasjonsaggregatene i bygningskohorten er utstyrt med varmegjenvinner.

Temperaturen på tilluften er styrt av utetemperaturen. Ved utetemperaturer under 10 °C, er temperaturen til tilluften 19 °C. Ved utetemperaturer over 10 °C, er temperaturen til tilluften 18 °C. Temperaturen til tilluften øker med ca. 1 °C mellom varmebatteriet og tilluftsventilene til sonen. Dette er på grunn av viftene. Tabell 4.5 presenterer ventilasjonen i sonene.

Tabell 4.5: Beskrivelse av ventilasjon i sonene.

Sone	Ventilasjonsstyring	Tilluft [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h]	Driftstid
Lesesal	VAV, CO <sub>2</sub>	9,71	Alltid på
Kontor	CAV	9,71	6-18 (9-15)
Laboratorierom	CAV	9,71	Alltid på
Forelesningsrom	VAV, CO <sub>2</sub> og temperatur	21,60	Alltid på i hverdager
Trafikk	CAV	8,07	6-18 (9-15)

## KAPITTEL 4: REFERANSEBYGGET

### Varme og kjøling

Det er i utgangspunktet ingen kjøling i byggene på Gløshaugen. Unntakene er i laboratorier og andre spesialrom med utstyr som krever kjøling. Derfor er det satt inn ideelle kjøleenheter i laboratoriene i referansebygget.

Byggene er tilknyttet fjernvarme som benyttes til romoppvarming, varmebatteri i ventilasjonsaggregat og oppvarming av tappevann. Vannbårne radiatorer avgir varme til sonene med turtemperatur 80°C og returtemperatur 60°C. Varmesystemets effektivitet er 84 %. Radiatorene er dimensjonert etter 110 % av maksimum effekt for 4. etasje ved bruk av ideelle romoppvarmere i IDA ICE. Vannbårne radiatorer er satt ut i sonene, størrelsen på radiatorene er presentert i Tabell 4.6.

*Tabell 4.6: Dimensjonering av vannbårne radiatorer.*

<b>Sone</b>	<b>Maksimum levert effekt av ideell oppvarmingsenhet [W]</b>	<b>Dimensjonert radiatorkapasitet [W]</b>
Kontor	22 058	24 500
Laboratorierom	21 558	24 000
Lesesal	6 140	7 000
Forelesning	1 406	1 500
Trafikk	25 379	28 000

### **5 Resultater og analyse av referansebygg**

I dette kapitlet skal resultater fra kalibrering, verifisering og analyse av referansebygget presenteres. Disse resultatene legger grunnlaget for valg av energieffektive tiltak, samt peker på svakheter og avvik i modellen som må hensyntas i vurderingen av tiltak.

#### **5.1 Kalibrering av energiforbruk**

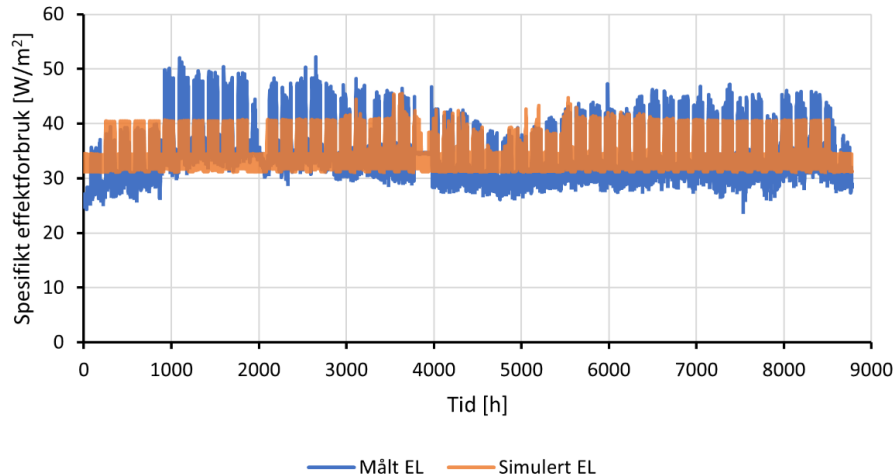
For at energiforbruket i referansebygget skal samsvare best mulig med gjennomsnittlige målte verdier fra bygningskohorten, ble en kalibrering utført. Energiforbruket til bygningskohorten består av elektrisitet og fjernvarme. Kalibreringen av disse energibærerne er gjennomført separat. Målte verdier for elektrisitets- og fjernvarmeforbruk for bygningskohorten er hentet fra NTNU drift. Først presenteres kalibreringen av elektrisitetsforbruket, deretter presenteres kalibreringen av fjernvarmeforbruket.

##### **5.1.1 Kalibrering av elektrisitetsforbruk**

I dette delkapitlet er en kort oppsummering av hvilke endringer som er gjort i referansebygget under kalibreringen av elektrisitetsforbruket.

Totalt er målt elektrisitetsforbruk på 302,1 kWh/m<sup>2</sup>. Spesielt Berg og Byggteknisk har høyt forbruk, sannsynlig grunnet maskiner på lab som kontinuerlig trekker strøm. Presentert i Figur 5.1 er målt spesifikt elektrisitetsforbruket i 2016 og simulert forbruk for bygningskohort 3 fra tidligere master Nesgård & Ngo (2018). Timer med usannsynlig lave eller høye verdier er fjernet og erstattet med et gjennomsnitt av målt verdi timen før og etter. De usannsynlige verdiene er avvik i målingene som hovedsakelig skyldes manglende verdier fra timen avviket skjer eller timene før.

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG



Figur 5.1: Resultat for målt EL og simulering med internlasten fra tidligere masteroppgave.

Figur 5.1 viser at det målte spesifikke elektrisitetsforbruket for referansebygget har en grunnlast som varierer i løpet av året, men holder seg stort sett mellom  $25 \text{ W/m}^2$  og  $35 \text{ W/m}^2$ . Toppene ligger som regel mellom  $15 \text{ W/m}^2$  og  $20 \text{ W/m}^2$  over grunnlasten. Simulerte verdier ligger gjennomsnittlig veldig likt som målte verdier og totalt forbruk er likt. Likevel er effekttoppene for lave og grunnlasten er ofte for høy. Det er derfor tydelige ulikheter mellom målte verdier og referansebygget fra tidligere master og det ble besluttet å ikke ta utgangspunkt i disse verdiene for internlasten videre i kalibreringen.

I IDA ICE består elektrisitetsforbruket av belysning, utstyr, kjøling og oppvarmingssystem og luftbehandling (HVAC aux). Under kalibrering ble belysning og utstyr endret for best mulig tilnærming til virkelige verdier. For å oppnå riktige verdier for belysning, utstyr og grunnlast i IDA ICE ble det tatt utgangspunkt i Sentralbygg 1 på Gløshaugen som regnes som et bygg uten lab. Sentralbygg 1 har et spesifikt energibehov på  $120 \text{ kWh/m}^2$ . Lys og utstyr økes slik at man får ønsket forhold mellom topp- og grunnlast, og resterende grunnlast settes slik at bygget får et spesifikt elektrisitetsforbruk på  $120 \text{ kWh/m}^2$ .

Videre ble det testet ulike laster og timeplaner for grunnlast i laboratoriet for å nå totalt forbruk på  $302,1 \text{ kWh/m}^2$ . Det ble også testet ut variasjon i lasten i løpet av året. Timeplanene med laster i laboratoriet som samsvarte best med målte verdier, og som ga totalt energibehov på  $302,1 \text{ kWh/m}^2$  er presentert i Tabell 5.1. Oppsummering av anvendte verdier for endelig kalibrering er gitt i Tabell 5.2.

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

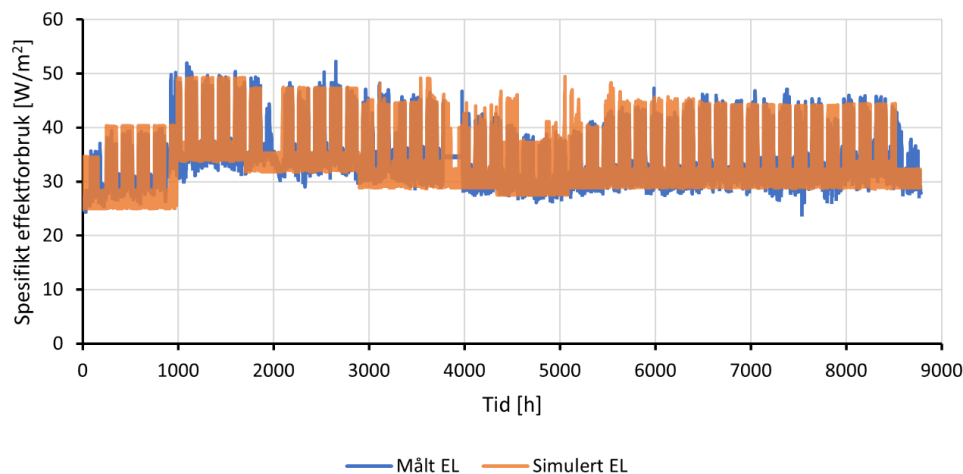
Tabell 5.1: Inndata i IDA ICE for ekstra internlaster i laboratoriet.

	Timeplan 1	Timeplan 2	Timeplan 3	Timeplan 4	Timeplan 5
<b>Tidsrom</b>	1.jan – 10.feb	11.feb – 11.mar	12.mar – 30.aug	30.jun – 30.jul	Resten av året
<b>Størrelse på last [W]</b>	29412,5	45250	41630	33937,5	36200
<b>Prosent av maks last [%]</b>	0,65	1	0,92	0,75	0,8

Tabell 5.2: Verdier for internlaster for endelig kalibrering.

Sone	Belysning [W/m <sup>2</sup> ]	Utstyr [W/m <sup>2</sup> ]	Grunnlast [W/m <sup>2</sup> ]	Laboratoriet Grunnlast [W]	Utstyr Sommer [W]
Lesesal	12	7	6,67	0	0
Kontor	12	7	6,67	0	0
Laboratoriet	12	7	6,67	45 250	11 000
Forelesning	12	3	6,67	0	0
Trafikk	12	2	6,67	0	0

Referansebygget ble simulert med verdiene fra Tabell 5.1 og Tabell 5.2. Resultater for spesifikt elektrisitetsbehov for målte verdier og simulering av referansebygget er presentert i Figur 5.2. Dette er også resultatene for endelig kalibrering.

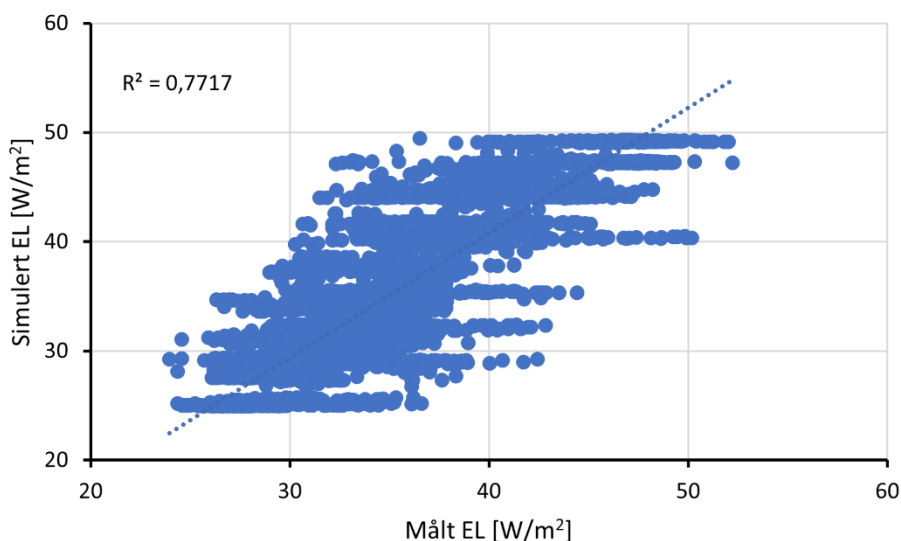


Figur 5.2: Resultat for endelig kalibrering EL.

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

Figur 5.2 illustrerer at målt og simulert elektrisitetsforbruk har tydelige sammenhenger for topp- og grunnlast, samt variasjon i løpet av året. Referansebygget er forbedret og stemmer nå bedre overens med virkelige målte verdier for elektrisitetsforbruket. Kalibreringen har resultert i en mer nøyaktig modell som vil gi færre usikkerheter i videre bruk av modellen.

For å vise korrelasjonen mellom målte og simulerte verdiene, er et spredningsdiagram for målt og simulert spesifikt effektforbruk presentert i Figur 5.3.



Figur 5.3 Spredningsdiagram for simulert og målt spesifikt effektforbruk EL.

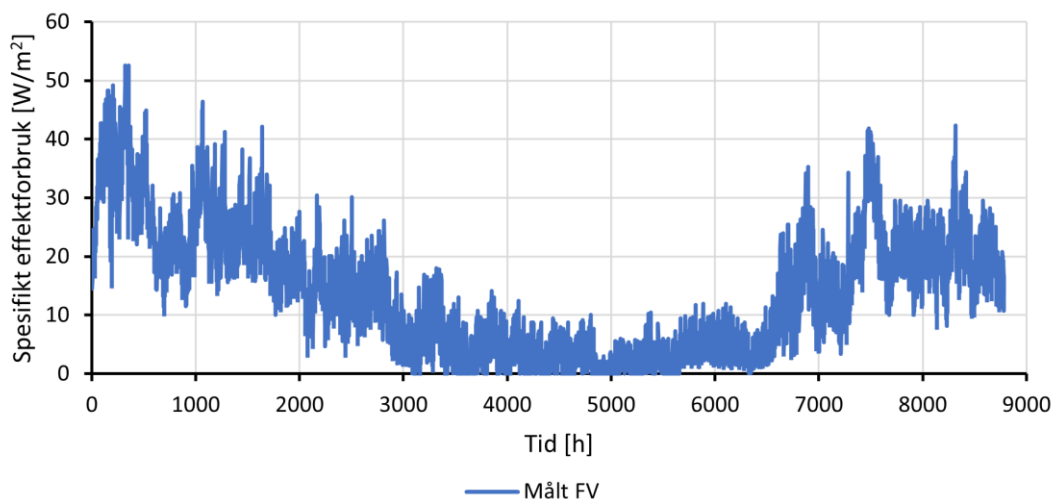
Figur 5.3 illustrerer sammenhengen mellom målte og simulerte verdier, hvor verdiene samsvarer mer jo nærmere de er den stiplede trendlinjen. Det er en tydelig sammenheng mellom målte og simulerte verdier med  $R^2 = 0,7717$ , hvor  $R^2 = 0$  tilsvarer ingen sammenheng og  $R^2 = 1$  tilsvarer absolutt lineær korrelasjon.

### 5.1.2 Kalibrering av fjernvarmeforbruk

For å sikre at varmebehovet i referansebygget er så nært målte verdier som mulig ble en kalibrering av fjernvarmebehovet utført. I 2016 ble det levert 121,1 kWh/m<sup>2</sup> fjernvarme til bygningskohorten. Spesifikt effektforbruk per time i 2016 er presentert i Figur 5.4.

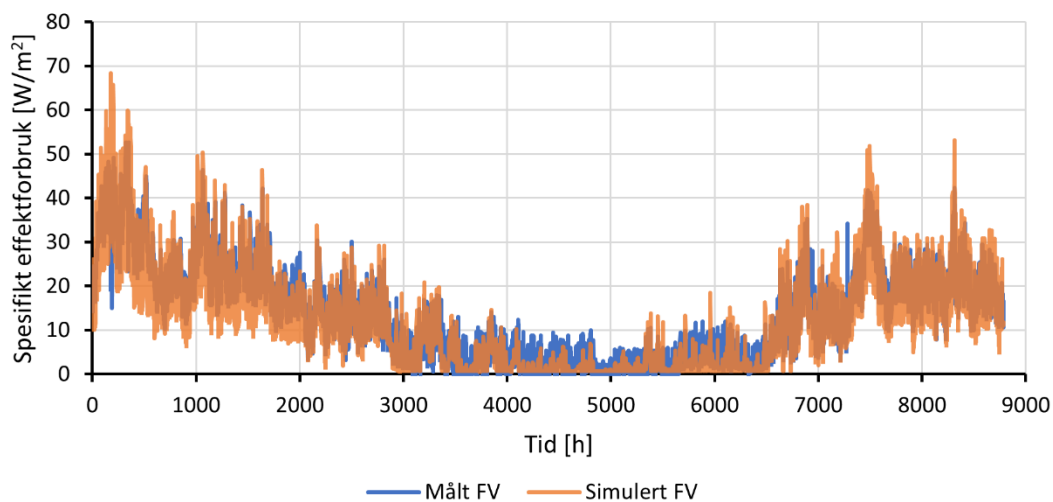


## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG



Figur 5.4: Målt spesifikt effektforbruk FV i 2016.

Som vist i Figur 5.4 er varmebehovet høyt på vinteren og minimalt i sommermånedene. Det er heller ingen betydelige avvik som tyder på at det er målefeil i datagrunnlaget fra NTNU drift. En sammenligning mellom målt og simulert levert fjernvarme før kalibrering er presentert i Figur 5.5.

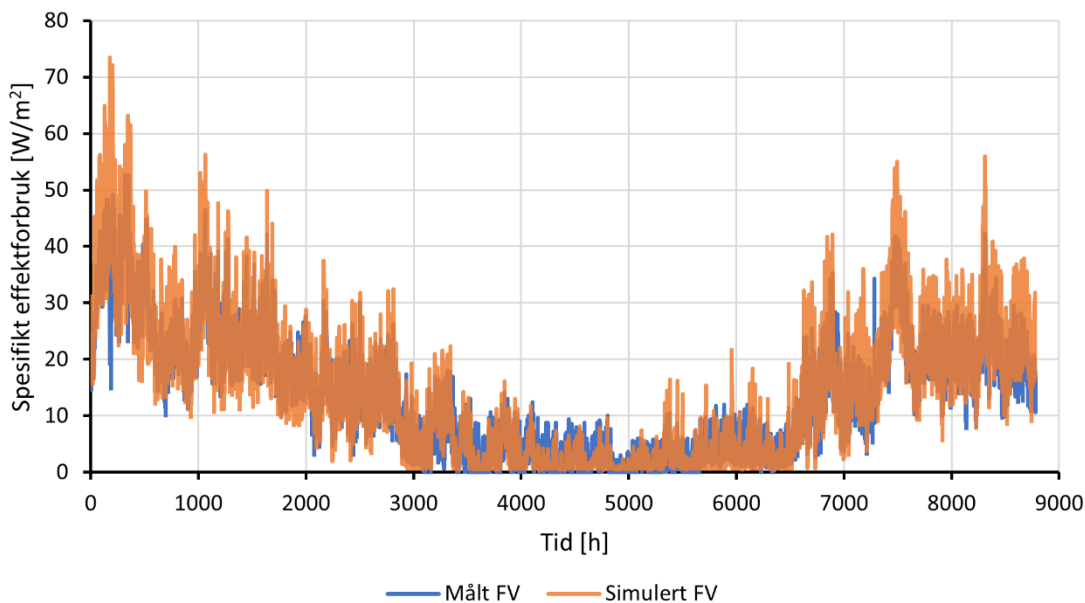


Figur 5.5: Målt og simulert spesifikt effektforbruk FV i 2016.

Totalt levert fjernvarme til referansebygget er 98,2 kWh/m<sup>2</sup> i 2016. Dette er et avvik på 18,9 % fra målte verdier fra NTNU Drift. Som vist i Figur 5.5 forbruker bygningskohorten mer fjernvarme på sommeren enn referansebygget. På vinteren har referansebygget høyere effekttopper enn

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

bygningkohorten. Det kan se ut til at referansebyggets fjernvarmebruk varierer i større grad per time enn bygningkohorten. I arbeidet med prosjektoppgaven ble referansebygget kalibrert ved å justere varmetilskuddet fra grunnlasten til utstyr fra 1 til 0,3. Resultatet er presentert i Figur 5.6.



Figur 5.6: Målt og simulert spesifikt effektforbruk FV etter kalibrering i prosjektoppgave.

Justeringen resulterte i at fjernvarmeforbruket økte til 120,2 kWh/m<sup>2</sup>. Avviket ble da 0,74 % fra målte verdier. Som vist i Figur 5.6, samsvarer fjernvarmeforbruket til referansebygget bedre med målte verdier i sommermånedene, men avviket ved effekttoppene i vinterhalvåret økte. Dermed er det et forbedringspotensial fra kalibreringen gjort i prosjektoppgaven.

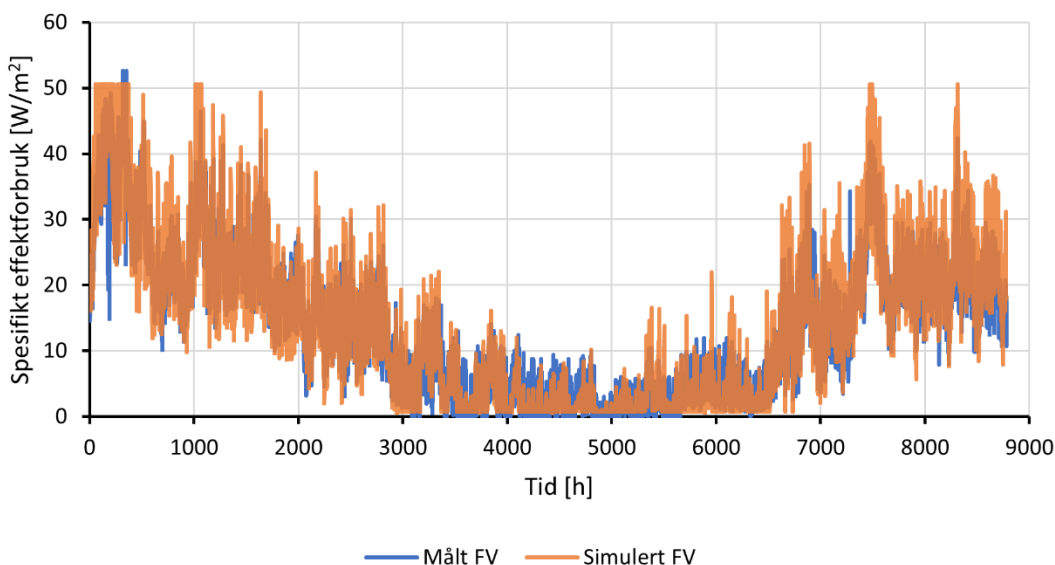
Flere løsninger ble testet for å forbedre referansebygget ytterligere. Siden effekttoppene er for høye i vinterhalvåret, men levert fjernvarme er generelt for lav i sommerhalvåret, ble avgitt varme fra utstyrsgrunnlasten endret fra 0,3 til å variere i løpet av året. Mellom 1. mai og 1. september ble avgitt varme satt til 0, mellom 15. oktober og 15. februar ble avgitt varme satt til 1, ellers er avgitt varme 0,3. Dette ga ikke et tilfredsstillende fjernvarmeforbruk sammenliknet med målte verdier. Dessuten er løsningen urealistisk, da varmetilskuddet fra utstyr ikke kan antas å variere i løpet av året.

Bygningskroppen ble også vurdert endret, for å øke den termiske kapasiteten. Økt termisk kapasitet forventes å øke tregheten i bygget, som vil gi lavere effekttopper. Tykkere yttervegger, gulv og

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

tak, samt økt internmasse i sonene ble testet uten nevneverdig utslag. I alle tilfellene ble bygningskroppens U-verdi beholdt ved å redusere isolasjonstykkelsen og øke betongtykkelsen. Det er uvisst hvorfor disse justeringene ikke ga forventet resultat, men det er tydelig at IDA ICE ikke tar hensyn til byggets treghet på en realistisk måte.

Kalibreringen som ga best resultat inkluderer en rekke justeringer, deriblant en reduksjon i varmekjelen fra 99999 kW til 300 kW, varmetilskuddet fra grunnlasten fra utstyr ble senket hele året til 0,2, vinduer kan ikke lengre åpnes på nattetid og radiatorstørrelsene ble justert til det faktiske varmebehovet for den enkelte sone. Det totale fjernvarmeforbruket i 2016 for referansebygget etter kalibrering er 121,1 kWh/m<sup>2</sup>, dette er 0 % avvik fra målte verdier. Det er likevel avvik på timenivå. En sammenlikning av spesifikt effektforbruk for referansebygget og bygningskohorten er presentert i Figur 5.7.



Figur 5.7: Målt og simulert spesifikt effektforbruk FV etter fullført kalibrering.

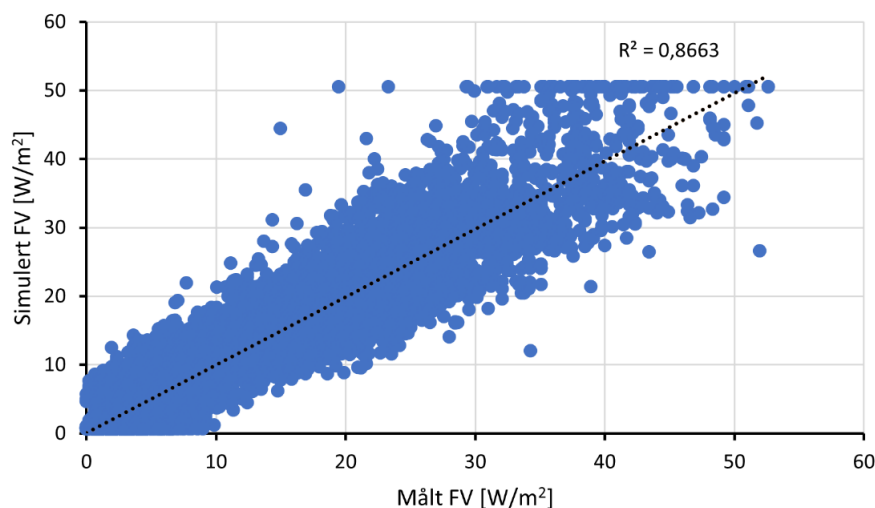
Som vist i Figur 5.7, fører reduksjonen i størrelsen på varmekjelen til at effekttoppene i referansebygget er i samme størrelsesorden som effekttoppene til bygningskohorten. Likevel er det perioder hvor effektuttaket i referansebygget er både for høyt og for lavt i forhold til målt effektuttak for bygningskohorten. Dette undersøkes videre i delkapittel 5.2.2. Reduksjon av varmetilskuddet fra utstyrgrunnlasten sørger for noe høyere varmebehov i sommerhalvåret, men det er tydelig at fjernvarmeforbruket til referansebygget mellom time 4000 og 5000 er for lavt i forhold til bygningskohorten. Dette vil ha minimalt med påvirkning på resultater av tiltakspakker,

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

da planlagte tiltak hovedsakelig vil påvirke fjernvarmeforbruket i oppvarmings sesongen. Avvikene fra målt effektuttak vil gi usikkerheter når referansebygget skal brukes til undersøkelse av tiltak for energieffektivisering.

Elimineringen av muligheten til automatisk åpning av vinduer på nattetid, samt korrigerende radiatorstørrelser hadde liten effekt på totalt energiforbruk og topplast. Dette var likevel viktige korrigeringer å gjennomføre før videre testing av energieffektive tiltak, slik at resultatene inneholder færre feilkilder.

Et spredningsdiagram er produsert for å finne korrelasjonen mellom målte og simulerte verdier for fjernvarme, diagrammet er vist i Figur 5.8.



Figur 5.8: Spredningsdiagram for målt og simulert FV.

Spredningsdiagrammet i Figur 5.8 viser en tydelig korrelasjon mellom målt og simulert effektuttak fra fjernvarme med  $R^2 = 0,8663$ . Spredningsplottet sammen med kurvene for spesifikk energibruk viser at ved lavt fjernvarmebruk korrelerer bygningskohorten og referansebygget godt, men ved høyere forbruk er det større avvik. I tillegg

### 5.2 Verifisering av energiforbruk

Etter kalibrering av energiforbruket er det viktig å vite hvor modellen avviker fra målte verdier. Dette er for å vurdere kredibiliteten til resultater for ENØK-tiltak. I dette kapitlet vil målte og simulerte verdier sammenlignes på både et overordnet og et detaljert nivå. Det først bli presentert en generell sammenligning av verdier fra simulering og virkelige målinger. Videre vil

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

elektrisitetsforbruket og fjernvarmeforbruket i referansebygget bli analysert og verifisert grundigere.

I Tabell 5.3 presenteres en oversikt over totalt levert spesifikk effekt for målte verdier, og referansebygg. Det blir også presentert prosentvist avvik fra målte verdier. Dette blir gjort for elektrisitet, fjernvarme og totalt årlig spesifikt energiforbruk.

*Tabell 5.3: Totalt levert spesifikt energiforbruk for målte verdier og referansebygg.*

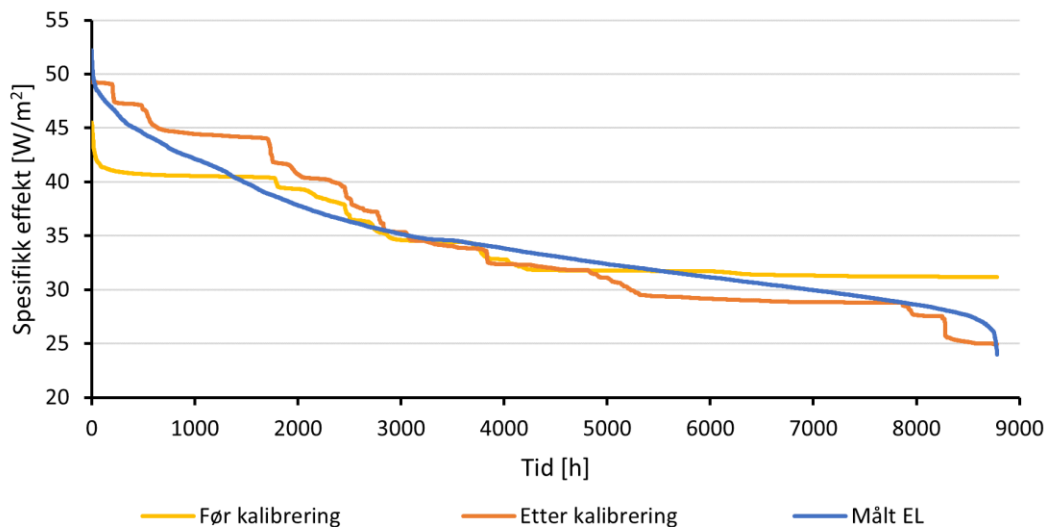
	<b>Elektrisitet</b>	<b>Fjernvarme</b>	<b>Totalt</b>
<b>Spesifikt forbruk [kWh/m<sup>2</sup>]</b>			
Målt	302,1	121,1	423,2
Referansebygg	302,5	121,1	423,6
<b>Prosentvist avvik fra målte verdier [%]</b>			
Referansebygg	0,13	0,00	0,09

Tabell 5.3 viser at referansebygget har et avvik på 0,13 % for elektrisitetsforbruket og 0 % for fjernvarmeforbruket. Totalt energiforbruk har et avvik på 0,09 %. Dette betyr at om man kun ser på totalt årlig energiforbruk, er referansebygget en god tilnærming til virkeligheten. Det er likevel essensielt å se videre på både elektrisitets- og fjernvarmeforbruket mer detaljert for å evaluere om kalibrert modell er realistisk.

### 5.2.1 Verifisering av elektrisitetsforbruk

I dette delkapittelet blir elektrisitetsforbruket til referansebygget verifisert ved sammenligning med målte verdier. En varighetskurve for målte og simulerte verdier vil først bli presentert, før levert spesifikt effektforbruk for en gjennomsnittlig hverdag og helgedag i februar, september og november vil bli analysert. Månedene er valgt for å gi en representativ presentasjon av variasjonen i levert elektrisitet i løpet av året. Varighetskurve for levert spesifikk effekt for referansebygg før kalibrering, referansebygg etter kalibrering og målte verdier er presentert i Figur 5.9.

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG



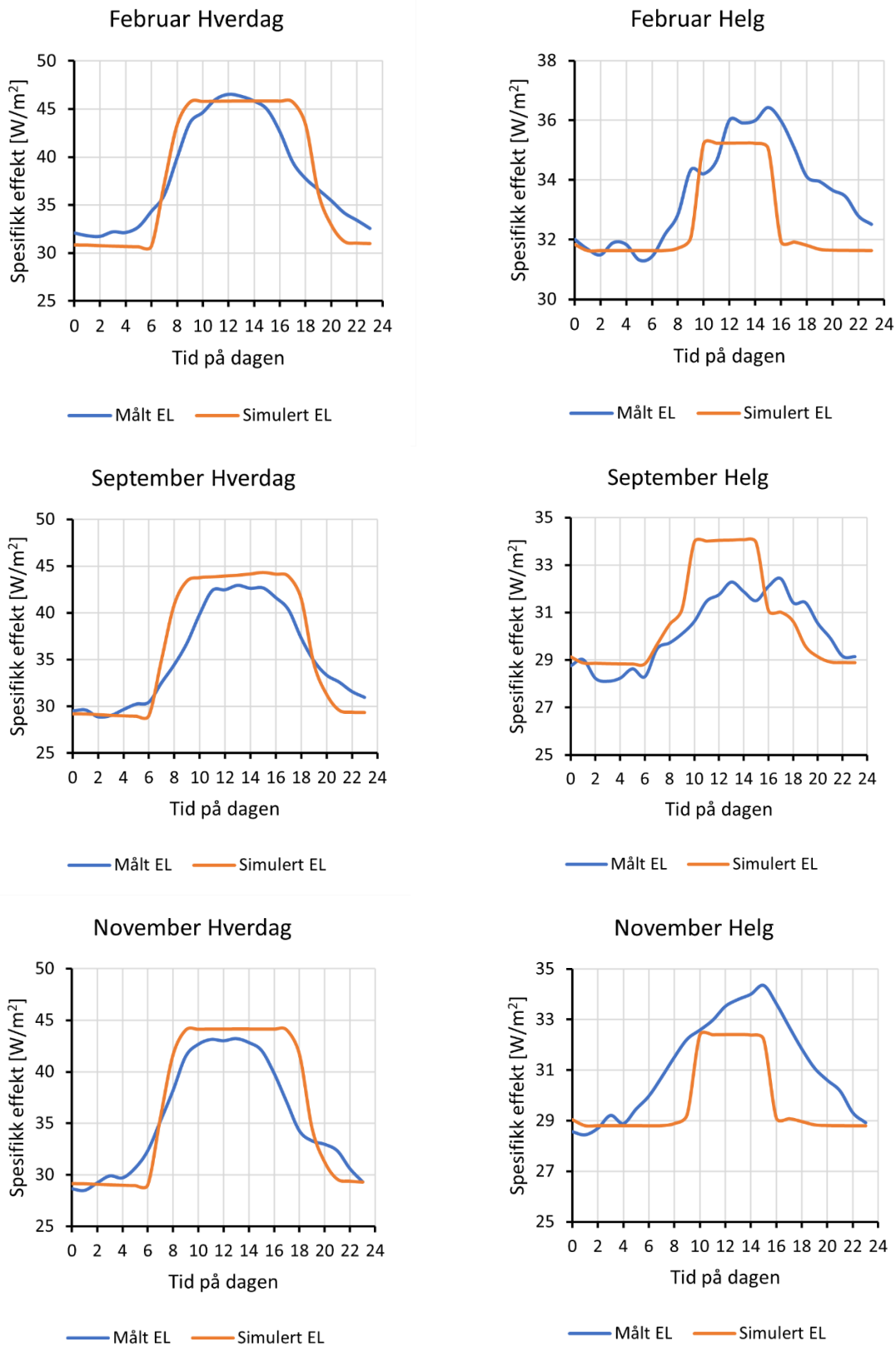
Figur 5.9: Varighetskurve for levert spesifikk effekt EL, før og etter kalibrering, samt målte verdier.

Figur 5.9 viser tydelige forskjeller og ulikheter mellom varighetskurvene. Simulert spesifikk effekt er trinnvis fordelt, og de målte verdiene har jevn kurve. Dette er hovedsakelig fordi levert effekt i virkeligheten alltid vil variere noe, men i IDA ICE må det settes inn timeplaner med bestemte verdier for levert elektrisitet til for eksempel lys og utstyr. Da vil det automatisk bli dager som har tilnærmet likt elektrisitetsforbruk.

Videre, for levert spesifikk effekt før kalibrering, er de høyeste verdiene lavere enn målte, og de laveste verdiene høyere. Etter kalibrering er tilfellet motsatt. For resultatene sin del er det hovedsakelig de høyeste verdiene som vil bli påvirket. Det er fordelaktig at verdiene er høye, ettersom man ikke ender opp med usannsynlig lave effekttopper. Samtidig vil det også ha negativ innvirkning da de høye verdiene kan føre til for store reduksjoner i levert effekt ved testing av energibesparende tiltak. Dette kan igjen føre til for store økonomiske besparelser.

Figur 5.10 presenterer levert spesifikt effektforbruk for en gjennomsnittlig hverdag og helgedag i februar, september og november. Figuren er presentert for å gi en mer detaljert sammenligning av målt og simulert elektrisitetsforbruk.

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG



Figur 5.10: Målt og simulert spesifikt effektforbruk EL for en gjennomsnittlig hverdag og helgedag i februar, september og november.

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

Figur 5.10 viser hovedsakelig at simulerte og målte verdier for elektrisitetsforbruket samsvarer godt i hverdager. For helgedager er det noen større forskjeller, men det er likevel samsvarende trender som følges av begge verdiene.

For en gjennomsnittlig hverdag er maks levert spesifikk effekt veldig lik for de simulerte og målte verdiene. For både målte og simulerte verdier er det tydelig når driftstid starter, men overgangen fra i og utenfor driftstid er mye mer markant for de simulerte verdiene. Dette gjør at både de laveste og høyeste verdiene for levert spesifikk effekt varer litt lenger ved simulering enn for virkelig målte verdier. Dette kom også tydelig frem i varighetskurven i Figur 5.9 hvor varighetskurven var trinnvis delt opp med lang varighet av høye og lave verdier for levert spesifikk effekt.

En gjennomsnittlig helgedag har noen avvik mellom målte og simulerte verdier. Det er avvik i både størrelsen på maksimum levert effekt og hvordan levert effekt varierer i løpet av dagen. For referansebygget er maksimum levert effekt for lav i februar og november og for høy i september, noe som tyder på at det i virkeligheten brukes mer elektrisitet i de kaldeste månedene. Felles for alle grafene er at både målt og simulert effektforbruk er lavere utenfor driftstid og når maksimum verdi midt i driftstiden. Ulikhetene i verdiene kan føre til usikkerheter rundt resultatene. Det er viktig å poengtere at helgedagene har relativt lav andel levert spesifikk effekt sammenlignet med hele året.

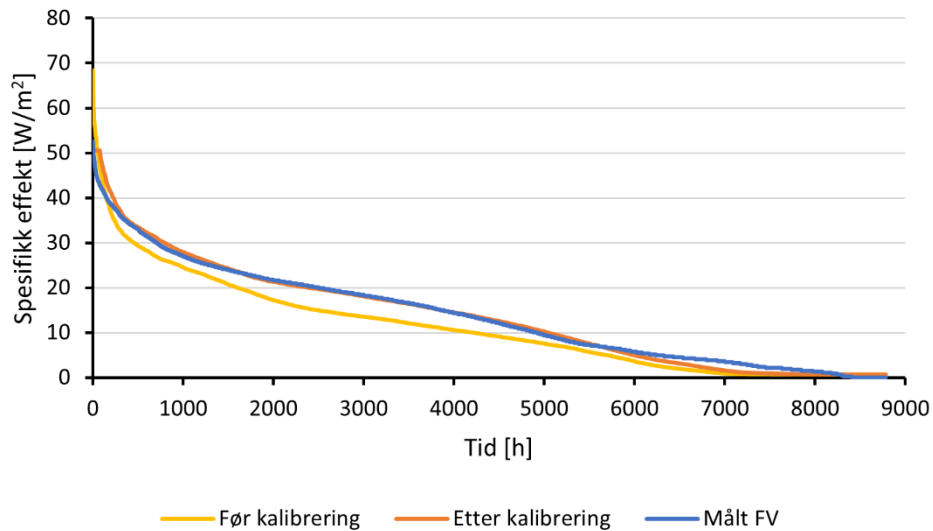
### 5.2.2 Verifisering av fjernvarmeforbruk

Tiltakene som skal testet ut i denne masteroppgaven vil gi innvirkning på oppvarmingsbehovet i bygget og dermed også fjernvarmeforbruket. Det er derfor viktig med en detaljert analyse og verifisering av fjernvarmeforbruket til referansebygget. I dette delkapittelet vil det først bli presentert en varighetskurve for levert spesifikk effekt for målte og simulerte verdier. Videre vil effektforbruket for en gjennomsnittlig hverdag og helgedag bli analysert for februar, juli og november. Månedene er valgt for å gi en representativ presentasjon av variasjonen til oppvarming i løpet av året. Til slutt vil en sammenligning av levert spesifikk effekt for referansebygget og et av byggene fra utvalgt kohort, Elektro E+F, bli sammenlignet.

En varighetskurve med spesifikk levert effekt for referansebygg før kalibrering, referansebygg etter kalibrering og målte verdier er presentert i Figur 5.11.



## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

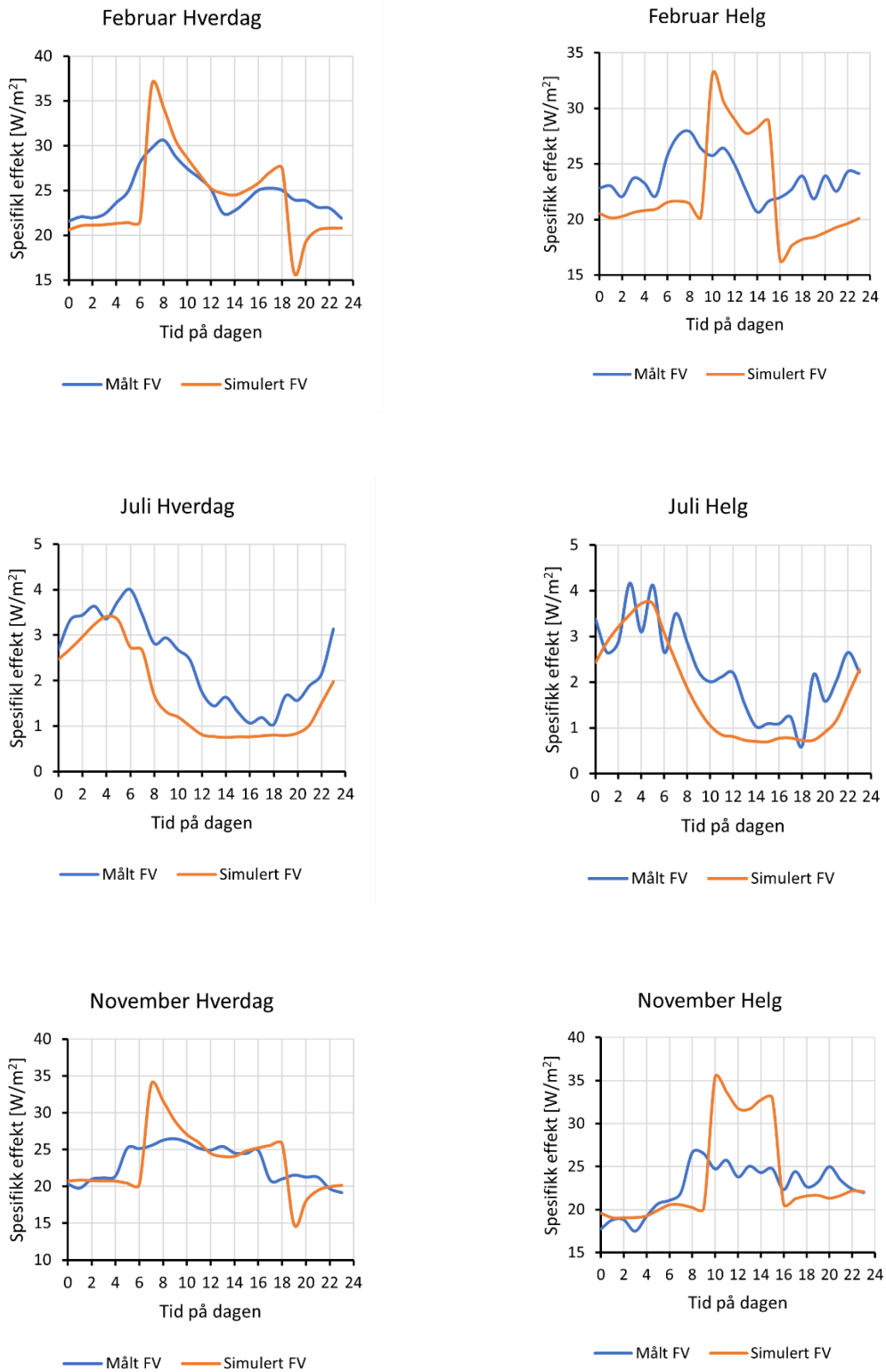


Figur 5.11: Varighetskurve for levert spesifikk effekt FV, før kalibrering, etter kalibrering og for målte verdier.

Figur 5.11 viser tydelig at varighetskurven etter kalibrering samsvarer med målte verdier. Før kalibrering hadde modellen en for høy maksverdi og lå alltid litt under målte verdier resten av tiden. Dette er betydelig forbedret etter kalibrering hvor maks effekt er redusert og varighetskurven hevet. Etter kalibrering er hovedforskjellene fra simulerte til målte verdier at de laveste målte verdiene er noe høyere enn de simulerte. Dette kan for eksempel tyde på at forbruket av varmtvann er noe høyere enn antatt eller at det i virkeligheten blir levert mer varme fra radiatorene enkelte dager. De fleste energibesparende tiltakene som skal simuleres i denne oppgaven vil ikke ha stor innvirkning på de laveste leverte effektene, og det sees derfor ikke på som en stor feilkilde for videre resultater.

Figur 5.12 presenterer levert spesifikt effektforbruk for en gjennomsnittlig hverdag og helgedag i februar, juli og november. Figuren er presentert for å gi en mer detaljert sammenligning av målt og simulert fjernvarmeforbruk både i og utenfor oppvarmingssesongen.

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG



Figur 5.12: Målt og simulert spesifikt effektforbruk FV for en gjennomsnittlig hverdag og helgedag i februar, juli og november.

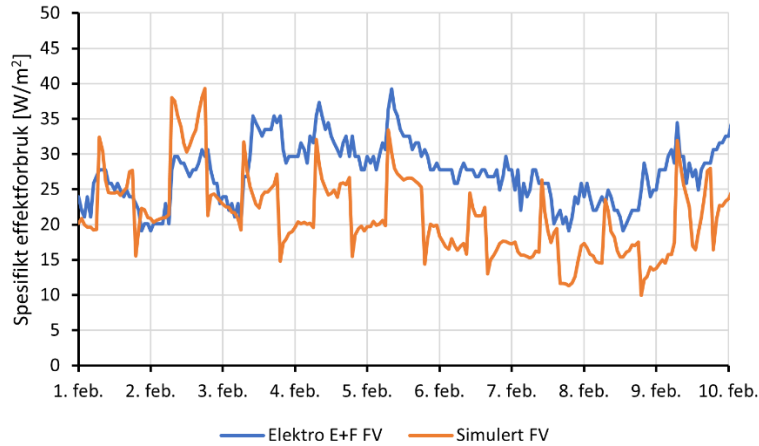
## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

Figur 5.12 presenterer at de simulerte og målte verdiene i februar følger relativt lik trend. Det leveres mest effekt når driftstid starter og varmebehovet synker midt på dagen når internlastene er høye. Det oppstår en ny topp igjen når personer begynner å forlate bygget. Klokken 18, synker effektforbruket betraktelig mer for referansebygget enn i virkeligheten. Dette skyldes at ventilasjonen skrur av i flere soner og det ikke lenger et like stort behov for oppvarming av tilluft. Dette er ikke nødvendigvis tilfellet for alle byggene i den utvalgte bygningskohorten, og reduksjonen i det spesifikke effektforbruket er derfor jevnere for de målte verdiene. Hovedforskjellen mellom de simulerte og målte verdiene i februar er at effekttoppene er høyere for de simulerte verdiene. Dette er fordi IDA ICE reagerer raskere enn det virkelige systemer gjør. Dette skaper usikkerhet knyttet til endring i effekttopper.

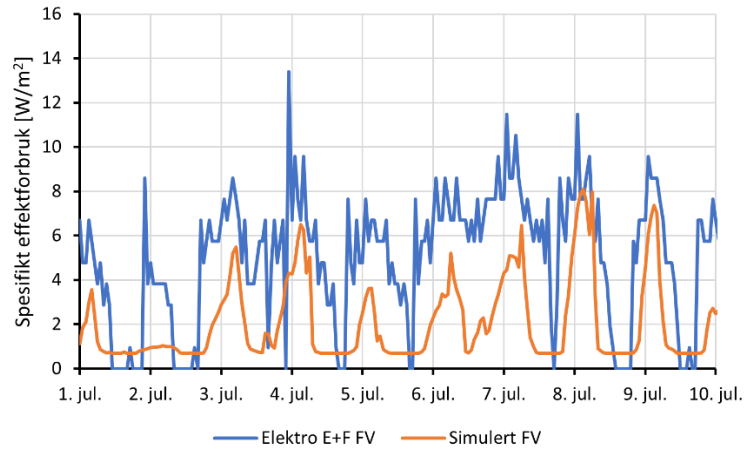
Videre viser Figur 5.12 at målte og simulerte verdier følger like trender og størrelser i juli, både for hverdag og helg. Det spesifikke effektforbruket er lavt ettersom det er utenfor oppvarmingssesongen. Dette resulterer i lavere avvik mellom målte og simulerte verdier. November er den måneden med størst avvik mellom målte og simulerte verdier, både når det gjelder trend og størrelse, samt hverdag og helg. De simulerte verdiene samsvarer godt med de målte verdiene i februar, men målte verdier er noe lavere. Dette kan skyldes endring i bruksmønster i virkeligheten, som ikke er tatt hensyn til i IDA ICE.

Problemer med forskjell i levert effekt fra fjernvarme trenger ikke nødvendigvis bety at referansebygget er en unøyaktig tilnærming til virkeligheten. De målte verdiene som referansebygget sammenlignes opp mot er en samling av flere bygninger med tilsvarende like romtyper og bruksmønster. Likevel kan det være avvik mellom de ulike bygningene i kohorten. Dette kan gjøre at de målte verdiene ikke følger en bestemt trend for levert fjernvarme, men heller er en blanding av flere forskjellige bruksmønster. Etter gjennomgang av levert fjernvarme for alle byggene i kohorten ble det tydelig at bygget Elektro E+F var relativt likt som referansebygget. I Figur 5.13, Figur 5.14 og Figur 5.15 presenteres en sammenligning av levert spesifikk effekt knyttet til fjernvarme for referansebygget og Elektro E+F for henholdsvis februar, juli og november.

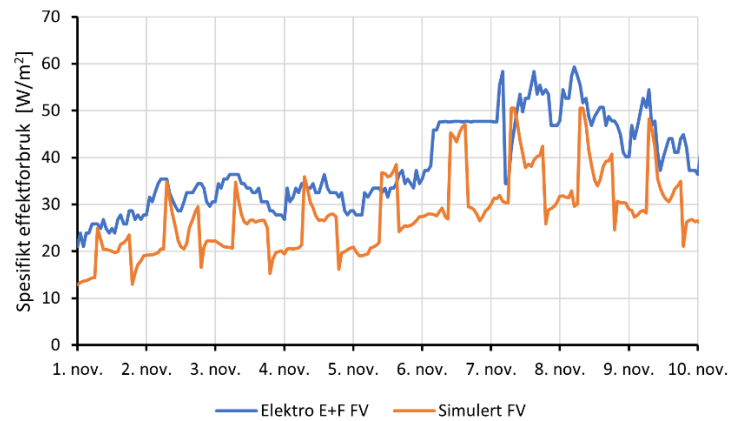
## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG



Figur 5.13: Spesifikt effektforbruk FV i Elektro E+F og simulert referansebygg, 10 dager i februar.



Figur 5.14: Spesifikt effektforbruk FV i Elektro E+F og simulert referansebygg, 10 dager i juli.



Figur 5.15: Spesifikt effektforbruk FV i Elektro E+F og simulert referansebygg, 10 dager i november.

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

Figur 5.13, Figur 5.14 og Figur 5.15 viser at referansebygget ikke avviker i like stor grad fra Elektro E+F som for bygningskohorten. Effekttoppene for målte verdier i Elektro E+F er ofte like høye eller høyere enn simulerte verdier fra referansebygget. I februar samsvarer den store forskjellen mellom levert effekt til fjernvarme i og utenfor driftstid bedre. Hovedforskjellen i februar er størrelsen på redusert levert effekt midt i driftstid. Denne reduksjonen er noe større for referansebygget enn Elektro E+F. Dette var også et avvik mellom gjennomsnittlige målte verdier og referansebygget. Det kan tyde på at radiator leverer for lite effekt midt på dagen grunnet for høye internlaste i referansebygget. Det er også mulig at det i virkeligheten blir levert unødvendig høy effekt fra radiatorene midt på dagen, slik at temperaturen går over settpunkt.

Simulerte verdier samsvarer godt med målte verdier fra Elektro E+F i juli, som vist i Figur 5.14. Figur 5.12 viser at simulerte verdier også samsvarer med gjennomsnittlige målte verdier for juli. Effekttoppene er noe lavere for simulerte verdier, men som nevnt tidligere vil dette ikke påvirke resultatene til tiltakene som testes i stor grad.

For måneden november er det også tydelig at de høyeste effekttoppene fra referansebygget er realistiske, som vist i Figur 5.15. Forskjellen mellom topplast og grunnlast er for stor i referansebygget og det er jevnere fordeling av levert effekt for de målte verdiene. Dette tyder på at effekttoppene er realistiske, men trenden og bruksmønsteret avviker.

### **5.3 Resultater og analyse av referansebygg**

For å ha et sammenlikningsgrunnlag for vurdering av tiltak må nøkkelresultatene for den kalibrerte referansebygget presenteres. I kalibreringen ble maksimum størrelse på varmekjel ble begrenset til 300 kW. For å videre kunne undersøke hvordan de ulike tiltakene påvirker energi- og effektbehovet kan ikke varmekjelen ha noen begrensning. Da kan heller ikke referansebygg, som er sammenlikningsgrunnlaget for tiltakene, ha noen begrensning på varmekjelen. I dette delkapittelet presenteres resultater for energiforbruk, effekttopper, inneklime, klimafotavtrykk og lønnsomhetsgrunnlag for referansebygget uten begrensning på varmekjel.

#### **5.3.1 Energi og effekt - referansebygg**

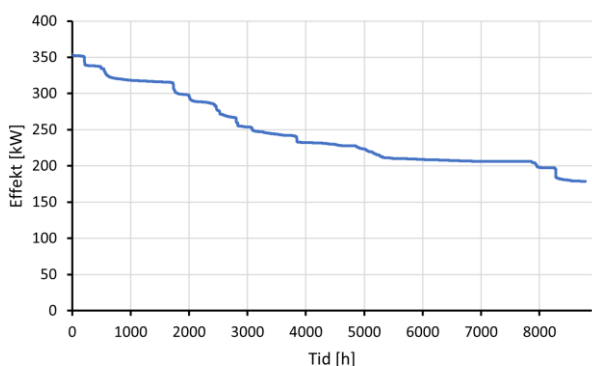
I Tabell 5.4 er resultater for elektrisitetsforbruk, fjernvarmeforbruk, maksimum levert effekt til fjernvarme og elektrisitet, samt brukstiden for fjernvarme presentert.

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

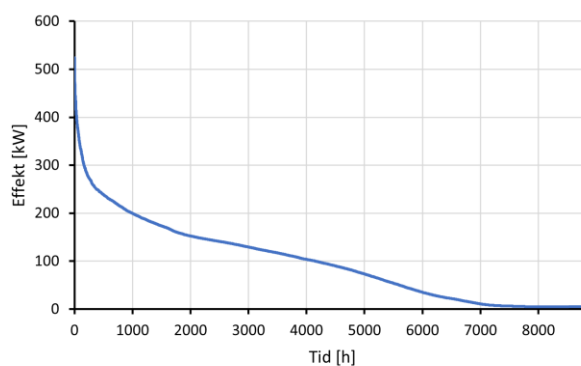
Tabell 5.4: Energi og effekt for referansebygget.

Elektrisitetsforbruk [kWh/m <sup>2</sup> ]	Fjernvarmeforbruk [kWh/m <sup>2</sup> ]	Maks effekt EL [kW]	Maks effekt FV [kW]	Brukstid FV [h]
302,5	121,3	353,6	523,8	1658

Som vist i Tabell 5.4 har referansebygget et svært høyt elektrisitetsbehov. Dette er på grunn av energikrevende komponenter på lab, for eksempel smelteovner. Det er dessverre ingen tiltak i denne rapporten som vil forbedre elektrisitetsbehovet til et akseptabelt nivå. Da tiltak som mer effektive komponenter på lab er vanskelig å foreslå uten nærmere analyse av aktiviteten på laboratoriene. Fjernvarmeforbruket er også høyt, men dette er forventet i eldre bygg med betongkonstruksjon. Hele varmebehovet blir dekt av fjernvarme, derfor vil tiltak som påvirker varmebehovet direkte påvirke fjernvarmebehovet. Maksimum effektuttak for fjernvarme er omtrent 180 kW høyere enn maksimum effektuttak for elektrisitet. Det kan derfor være et potensial i reduksjon av maksimum effektuttak for fjernvarme, som igjen vil øke brukstiden. Varighetskurver for elektrisitet og fjernvarme er presentert i henholdsvis Figur 5.16 og Figur 5.17.



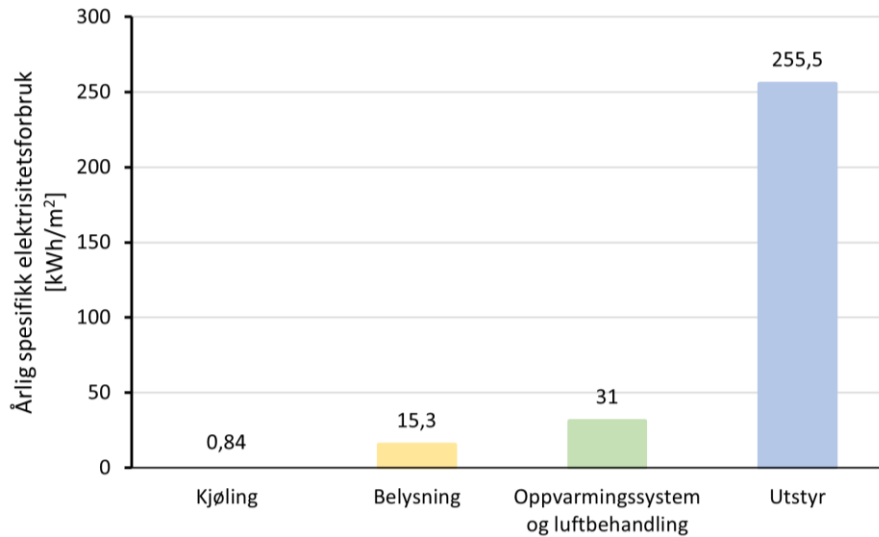
Figur 5.16: Varighetskurve EL referansebygg.



Figur 5.17: Varighetskurve FV referansebygg.

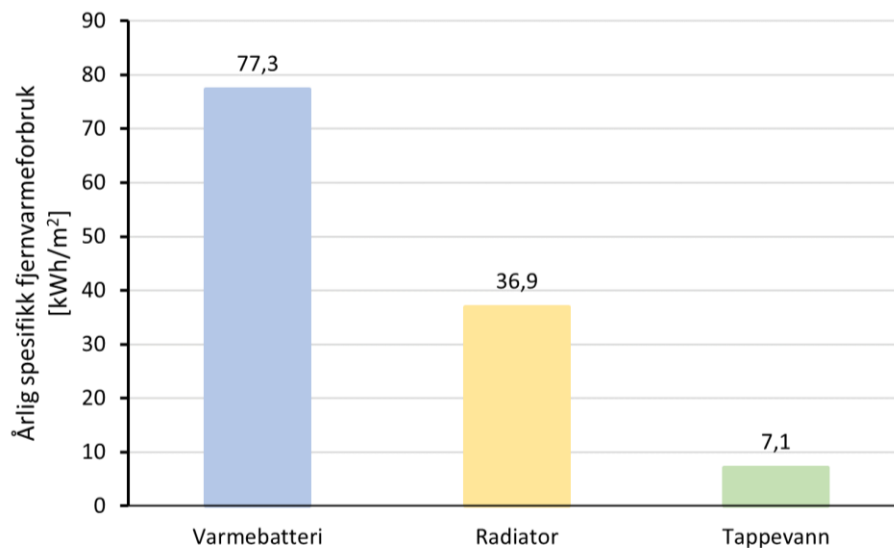
Varighetskurven for elektrisitet, vist i Figur 5.16, viser at effektuttaket fra elektrisitet er generelt høyt gjennom hele året. Dette skyldes hovedsakelig grunnlastene i laboratoriene. Fordelingen av elektrisitetsforbruket er presentert i Figur 5.18. Varighetskurven for fjernvarme derimot, vist i Figur 5.17, viser at effektuttaket er høyt kun korte perioder i løpet av året. Fordelingen av årlig fjernvarmeforbruk er presentert i Figur 5.19.

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG



Figur 5.18: Fordeling av årlig elektrisitetsforbruk i referansebygget.

Som vist i Figur 5.18 går mesteparten av elektrisitetsforbruket til utstyr i referansebygget. Selv om bygget har et veldig høyt elektrisitetsforbruk, vil det ikke være mulig å redusere utstyrsposten uten nærmere analyse av utstyret på laboratoriet i byggene tilhørende bygningskohorten. Dette ligger utenfor rapportens omfang. Det antas at LED-lys allerede benyttes og at belysning ikke har noe reduksjonspotensial. Kjøling står for en svært liten andel av elektrisitetsforbruket. Potensialet for reduksjon av elektrisitetsforbruk ligger derfor i oppvarmingssystem og luftbehandling. Dette er poster som blant annet inneholder, vifter, pumper og sensorer.



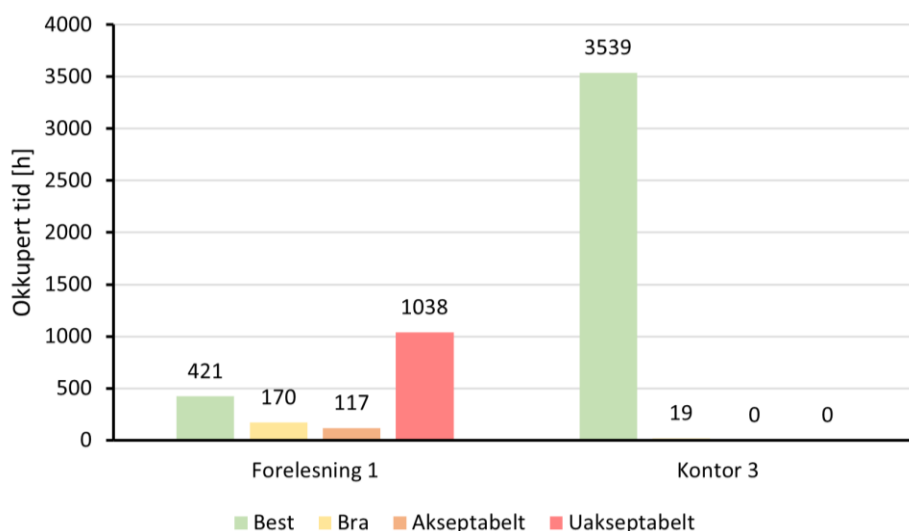
Figur 5.19: Fordeling av årlig fjernvarmeforbruk i referansebygget.

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

Fjernvarmeforbruket fordeles på tre poster: varmebatteriet i ventilasjonsaggregatene, radiatorer i sonene og tappevann, som vist i Figur 5.19. Varmebatteriet i ventilasjonsaggregatene står for over 60 % av fjernvarmeforbruket. Dersom varmegjenvinningen i ventilasjonsaggregatene økes, kan fjernvarmeforbruket i varmebatteriet reduseres. Styringsstrategier kan redusere fjernvarmeforbruket til radiatorer. Tappevann er derimot antatt konstant, og siden posten er minimal er det ikke potensiale for reduksjon her.

### 5.3.2 Inneklima - referansebygg

Det er valgt å presentere resultater for inneklima for to soner, sonen med best termisk inneklima og sonen med dårligst inneklima, dette er henholdsvis kontor 3 og forelesning 1 i referansebygget. Termisk komfort i forelesning 1 og kontor 3 er presentert med adaptiv komfortmodell i Figur 5.20.



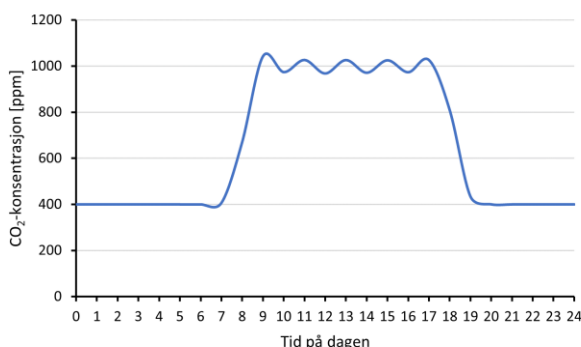
Figur 5.20: Adaptiv komfortmodell for referansebygg.

Som vist i Figur 5.20 har forelesning 1 utilfredsstillende termisk inneklima med 1038 timer av driftstid innenfor den uakseptable komfortkategorien. Det vil si at i omtrent 59% av driftstiden er det enten for kaldt eller for varmt i sonen. Problemet i denne sonen er at personbelastninger er basert på kapasiteten i forelesningssaler på NTNU Gløshaugen, men takhøyden er ikke hensyntatt. Dette fører til svært høy lufttemperatur i driftstid. Siden forelesningssonene ikke er realistisk modellert, knyttes det stor usikkerhet resultatene for termisk inneklima i denne sonen. Kontor 3 har ingen driftstimer innenfor den uakseptable termiske komfortkategorien, men 3539 timer innenfor den beste komfortkategorien. Dette tilsvarer 99 % av driftstid. Det er viktig å bemerke at disse to sonene ikke har samme driftstid.

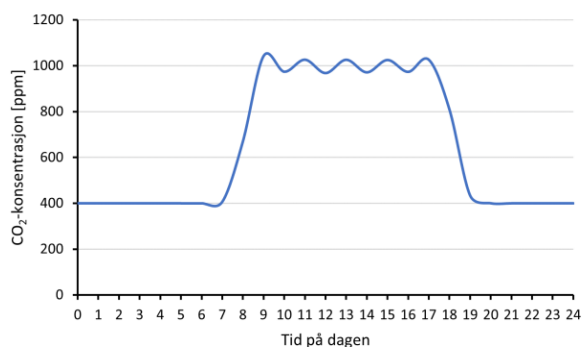


## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

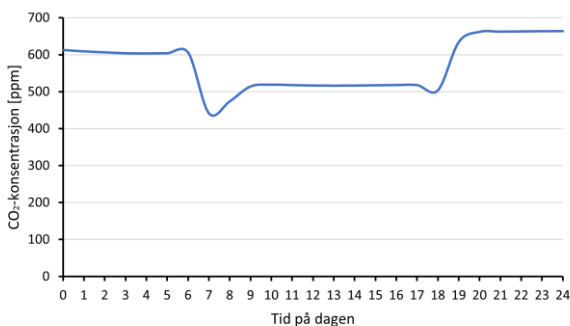
I tillegg til termisk inneklima er det viktig å evaluere luftkvaliteten i sonene. Som et sammenlikningsgrunnlag skal CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen og luftens alder presenteres for forelesning 1 og kontor 3 både for en kald og varm dag. CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i forelesning 1 27. januar og 25. mai er presentert i henholdsvis Figur 5.21 og Figur 5.22. CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i kontor 3 27. januar og 25. mai er presentert i henholdsvis Figur 5.23 og Figur 5.24.



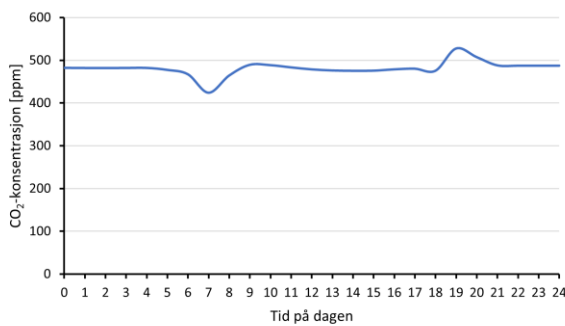
Figur 5.21: CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i forelesning 1, 27. januar referansebygg.



Figur 5.22: CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i forelesning 1, 25. mai referansebygg.



Figur 5.23: CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i kontor 3, 27. januar referansebygg.



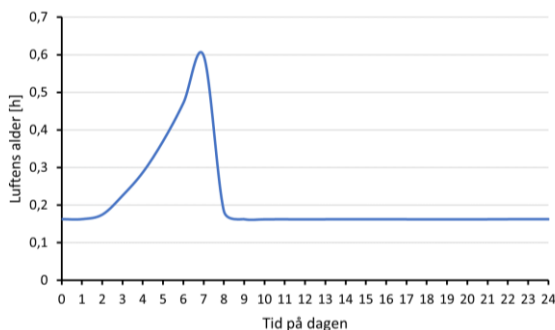
Figur 5.24: CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i kontor 3, 25. mai referansebygg.

Som vist i Figur 5.21 og Figur 5.22 er CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i forelesning 1 omtrent 1000 ppm i driftstid januar og mai. 1000 ppm er øvre grense for hva arbeidstilsynet anbefaler (Arbeidstilsynet, 1991). Brukere vil kunne oppleve ubehag ved å oppholde seg i forelesningssonen over lengre tid. VAV-styringen i denne sonen er satt til å holde CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen under 500 ppm. Dette klarer ikke ventilasjonen med de gitte luftmengder. Ventilasjonen leverer altså maksimum luftmengder, uten å redusere CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen til ønsket nivå. Dette er også grunnen til at CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen er lik i januar og mai. Utenfor driftstid er CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen stabil på 400 ppm.

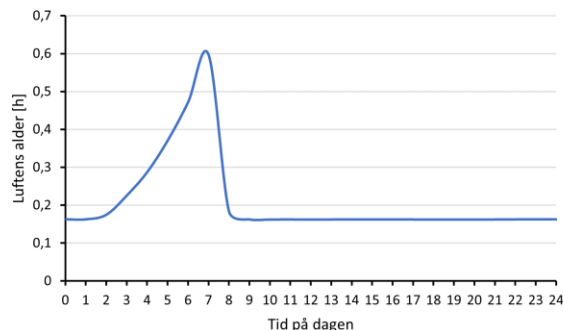
## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

I driftstid er CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i kontor 3 stabil rundt 500 ppm, dette er vist i Figur 5.23 og Figur 5.24. CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen er noe lavere i mai, fordi vinduene åpnes når temperaturen i sonen øker til kjølesettpunkttemperaturen som er 22 °C. Styringsstrategien for ventilasjonen i kontorsonen er CAV og ventilasjonen er skrudd av utenfor driftstid, dette blir tydelig i høyere CO<sub>2</sub>-konsentrasjoner utenfor driftstid. 27. januar er CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen høyere utenfor driftstid enn 25. mai, også dette kan begrunnes med åpning av vinduer i driftstid.

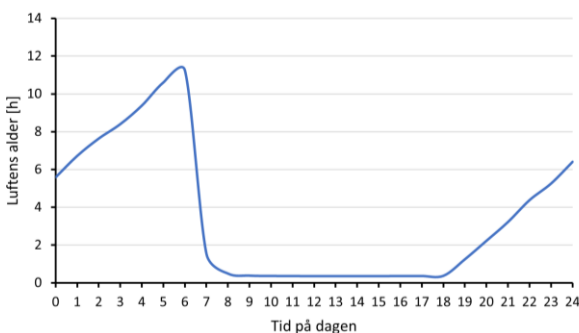
Luftens alder beskriver luftskiftene i en sone. Den er viktig å analysere for å vurdere om ventilasjonen er tilstrekkelig i driftstid, men også vurdering av unødvendig ventilering utenfor driftstid. Luftens alder i forelesning 1 27. januar 2016 og 25. mai 2016 er presentert i henholdsvis Figur 5.25 og Figur 5.26. Tilsvarende er luftens alder i kontor 3 27. januar 2016 og 25. mai 2016 presentert i henholdsvis Figur 5.27 og Figur 5.28.



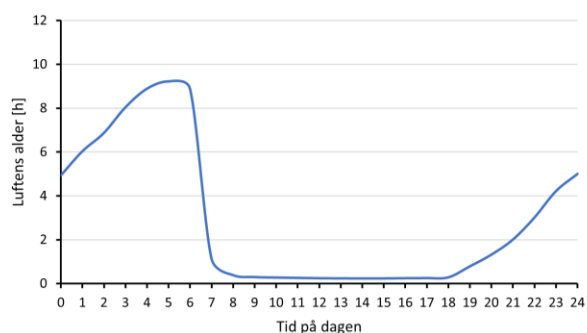
Figur 5.25: Luftens alder i forelesning 1, 27. januar referansebygg.



Figur 5.26: Luftens alder i forelesning 1, 25. mai referansebygg.



Figur 5.27: Luftens alder i kontor 3, 27. januar referansebygg.



Figur 5.28: Luftens alder i kontor 3, 25. mai referansebygg.

Grafene for luftens alder gjennom et kaldt og et varmt døgn har minimale forskjeller i forelesning 1, som vist i Figur 5.25 og Figur 5.26. Luftens alder øker som forventet på nattestid, men på grunn av VAV-styringen, som har samme settpunkt for CO<sub>2</sub>-konsentrasjon hele døgnet, er luftskiftene

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

hyppige også på denne tiden av døgnet. Ventilasjonen står dermed alltid på, og det er grunn til å tro at dette fører til unødig energibruk. I kontor 3 er det hyppige luftskifter i driftstid, som vist i Figur 5.27 og Figur 5.28. Siden styringsstrategien i kontorsonen er CAV øker luftens alder i løpet av natten, frem til ventilasjonen skrur på kl 06. Vinduene kan åpnes mellom 06 og 20, dette fører til at luftens alder er lavere i mai enn i januar før ventilasjonen skrur på.

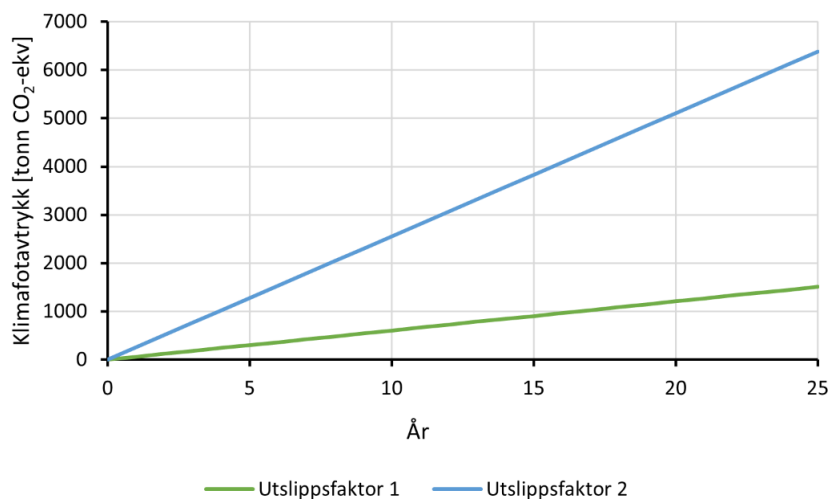
### 5.3.3 Klimafotavtrykk - referansebygg

Det årlige klimafotavtrykket knyttet til energibruk i referansebygget er presentert i Tabell 5.5.

Tabell 5.5: Årlig klimafotavtrykk fra energibruk i referansebygget.

Utslippsfaktor	Utslipp FV [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Utslipp EL [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Totalt årlig utslipp [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
1	38 731	21 657	60 388
2	38 731	216 565	255 297

Som vist i Tabell 5.5 er det årlige CO<sub>2</sub>-utslippet sterkt avhengig av utslippsintensiteten til elektrisitet. Utslippsfaktor 1 og 2 fører til at elektrisitetsforbruket står for henholdsvis 36 % og 85 % av det totale årlige utslippet. Det er derfor viktig å evaluere flere utslippsintensiteter. Begge utslippsfaktorer beregnes med samme utslippsintensitet for fjernvarme, 44,6 g/kWh. Utslippsfaktor 1 beregnes med 10 g/kWh for elektrisitet, mens utslippsfaktor 2 beregnes med 100 g/kWh. Figur 5.29 viser det summerte klimafotavtrykket fra referansebygget over 25 år.



Figur 5.29: Klimafotavtrykk referansebygg over 25 år.

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

Over 25 år vil utslippsfaktor 2 medføre 5000 tonn CO<sub>2</sub>-ekv høyere utslipp enn utslippsfaktor 1. Dette er vist i Figur 5.29 og understreker usikkerheten knyttet til beregningen av klimafotavtrykk. Det er rimelig å anta at det faktiske CO<sub>2</sub>-utslippet i bruksfasen til bygget vil ligge et sted mellom de to utslippsfaktorene.

### 5.3.4 Lønnsomhetsgrunnlag – referansebygg

Årlig energikostnad for referansebygget med de tre prismodellene er presentert i Tabell 5.6.

Tabell 5.6: Årlig energikostnad for referansebygget.

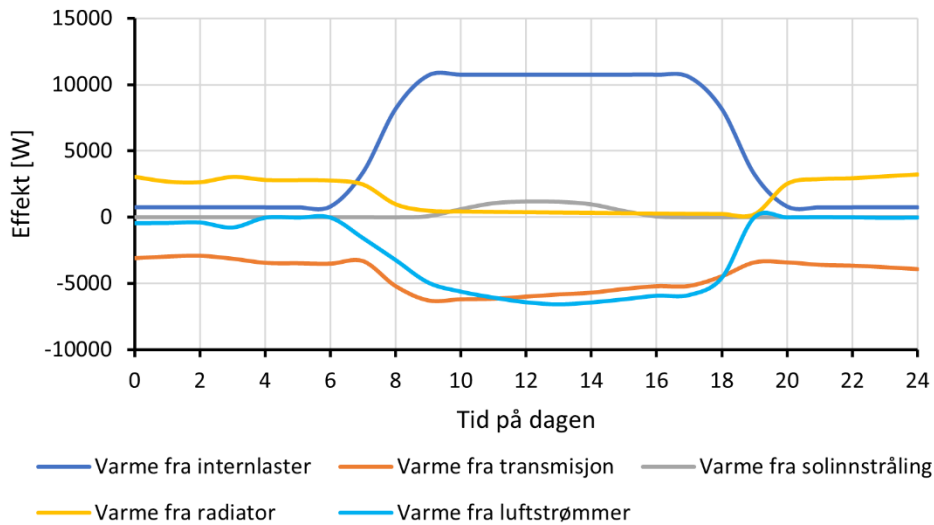
Prismodell	Årlig energipris [kr]	Årlig effektpris [kr]	Total årlig energikostnad [kr]
1	3 640 883	0	3 640 883
2	3 034 069	308 698	3 342 767
3	3 640 883	308 698	3 949 581

Grunnet usikkerhet med tanke på fremtidens energipriser benyttes tre prismodeller for den totale årlige energikostnaden. Som vist i Tabell 5.6 påvirker prismodellen den totale årlige energikostnaden i stor grad. Prismodell 1 har kun energipris, 1,2 kr/kWh, denne prisen ligger i det øvre sjiktet av historiske energipriser og resulterer i total årlig energikostnad på omtrent 3,6 millioner kroner. Prismodell 2 har lavere energipris, 1,0 kr/kWh, men har også inkludert effektpris etter Tensios tariff. Resultatet er likevel lavere total årlig energikostnad enn prismodell 1, med omtrent 3,3 millioner kroner i total årlig energikostnad for referansebygget. Prismodell 3 har høyest total årlig energikostnad, omtrent 3,9 millioner kroner. Det er viktig å evaluere samtlige prismodeller for å få en realistisk oversikt over årlige energikostnader.

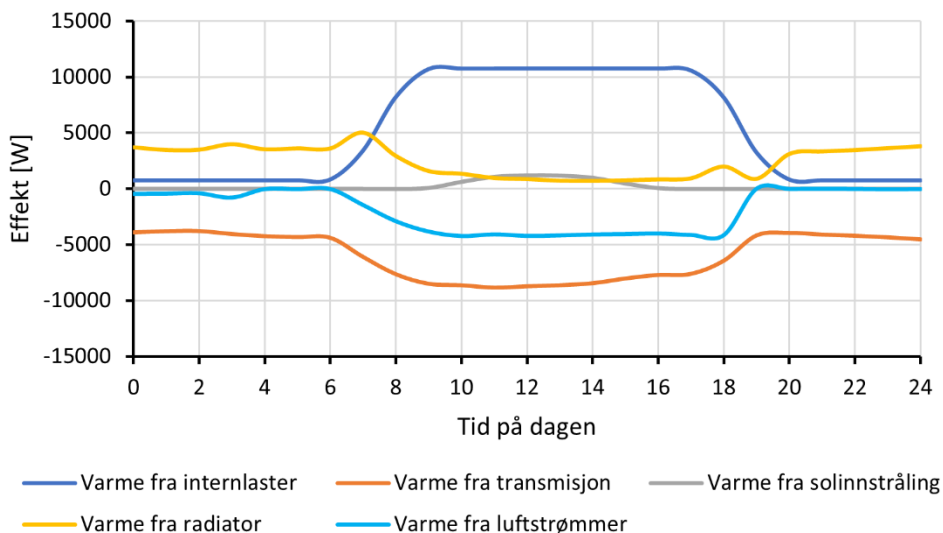
### 5.4 Analyse av varmebalanse i referansebygget

For å identifisere potensialet for reduksjon av energi- og effektforbruk må varmebalansen analyseres. For å avgrense analysen er kontorsonen valgt. Denne sonen har en høy arealandel i bygget, et forutsigbart bruksmønster og yttervegger til uoppvarmet sone, samt innervegger til oppvarmet sone. Kontor 1 og 4 er valgt, da varmebalansen er forventet å variere avhengig av om taket eller gulvet i sonen grenser til uoppvarmet sone eller etasjeskiller. Varmebalansen i sonen forventes også å variere med sesong. Derfor er varmebalanse for kontor 1 og kontor 4 den 27. januar presentert i henholdsvis Figur 5.30 og Figur 5.31.

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG



Figur 5.30: Varmebalanse i kontor 1, 27. januar referansebygg.

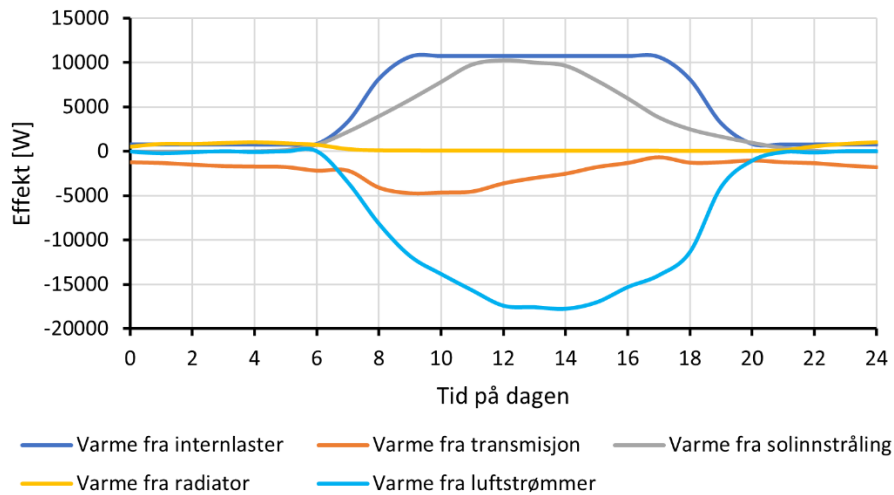


Figur 5.31: Varmebalanse i kontor 4, 27. januar referansebygg.

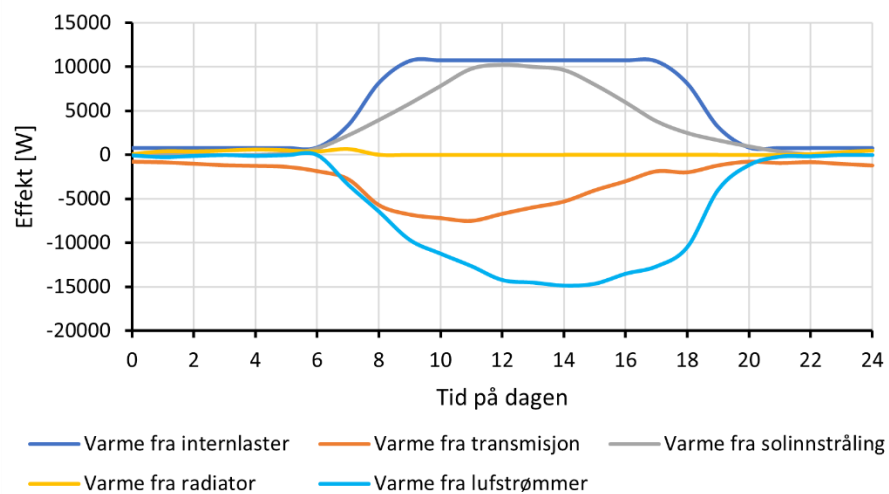
Felles for begge kontorsonene er at internlastene står for mesteparten av varmetilskuddet i driftstid, mens transmisjon og luftstrømmer står for varmetapet, som vist i Figur 5.30 og Figur 5.31. Varmetap fra transmisjon er størst i 4. etasje, som forventet grunnet taket med høy U-verdi mot uteluft. Varmetilskudd fra solinnstråling er lavt i januar for begge sonene, dette er forventet da begge soner har like mange vinduer på samme fasader. Siden varmetilskuddet fra solinnstråling er så lite, har det liten påvirkning på varmebalansen i rommet. Reguleringen av radiatorvarme er sterkt knyttet til tilstedeværelse i sonen. De høye internlastene fører til at radiatorer leverer

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

minimalt med varme i driftstid selv i januar. Utenfor driftstid leverer radiatorene varme for å opprettholde settpunkttemperaturen i rommet, dette kan være unødvendig da det ikke er brukere i sonen. Et forbedringspotensial er identifisert, tiltak for å unngå unødvendig oppvarming på nattetid skal undersøkes. Varmebalanse for kontor 1 og 4 25. mai 2016 er presentert i henholdsvis Figur 5.32 og Figur 5.33.



Figur 5.32: Varmebalanse for kontor 1, 25. mai referansebygg.



Figur 5.33: Varmebalanse for kontor 4, 25. mai referansebygg.

## KAPITTEL 5: RESULTATER OG ANALYSE AV REFERANSEBYGG

Som vist i Figur 5.32 og Figur 5.33 er det ingen store forskjeller i varmebalansen mellom etasjene. Det er en reduksjon i varmetap fra transmisjon sammenlignet med januar, som følge av høyere utetemperatur. Utenfor driftstid er transmisjonstapet minimalt grunnet lav forskjell i inne- og utetemperatur. Dette fører til at radiatorene nærmest ikke er i bruk denne delen av året. I motsetning til varmebalansen fra januar er nå varmetilskuddet fra solinnstråling nærmest like stort som internlastene midt på dagen. Dette fører til at vinduer åpnes, slik at varmetapet fra luftstrømmer øker. Transmisjonsvarmetapet øker ettersom varmetilskuddet fra solinnstråling øker. Dette er fordi temperaturen i sonen stiger slik at temperaturforskjellene mellom inne og ute øker. Transmisjonstapet er større i kontor 4 enn i kontor 1. Grunnen til dette er den høye U-verdien til taket.

## **6 Resultater og analyse for tiltak 1-5**

I dette kapitlet skal resultatene fra simulering av tiltak presenteres i hvert sitt delkapittel. Resultatene som presenteres inkluderer årlig energibehov og maksimum effektuttak, for både elektrisitet og fjernvarme, relevante inneklimateparametere, lønnsomhetsanalyse med netto nåverdi og tilbakebetalingstid, samt beregning av reduksjon i klimafotavtrykk. Nærmere analyse av komponenter eller soner er også inkludert der det er nødvendig.

Resultater til følgende tiltak blir presentert:

- Tiltak 1 – ventilasjonsaggregat
- Tiltak 2 – nattsinking
- Tiltak 3 – kontroll av avtrekkstemperatur
- Tiltak 4 – VAV
- Tiltak 5 – delvis oppvarming via ventilasjon

### **6.1 Resultater og analyse tiltak 1 – ventilasjonsaggregat**

I dette tiltaket ble alle ventilasjonsaggregat i bygget skiftet ut med nye aggregat med mer effektive vifter og varmegjenvinnere. Varmegjenvinningsgraden ble økt fra 0,56 til 0,8. Viftevirkningsgraden ble økt fra 0,6 til 0,8. Det er forventet en betydelig reduksjon i fjernvarmeforbruk på grunn av varmeveksleren og en moderat reduksjon i elektrisitetsforbruk på grunn av viftene. Tiltaket endrer hverken på luftmengder eller settpunkttemperaturer. Derfor vil ikke varmebalanse og inneklimateparametere som luftens alder være relevant å analysere for dette tiltaket. For å vurdere tiltaket tilstrekkelig skal resultater for energi og effekt, termisk inneklimate, klimafotavtrykk og lønnsomhet presenteres i dette kapitlet.

#### **6.1.1 Resultater for energi og effekt – tiltak 1**

Resultater for elektrisitetsforbruk, fjernvarmeforbruk, maksimum levert effekt til elektrisitet og fjernvarme og brukstid er presentert i Tabell 6.1.

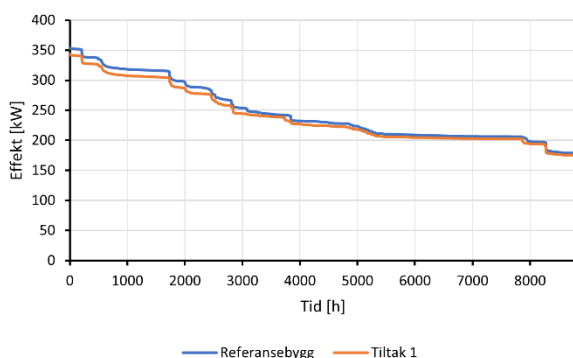


## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

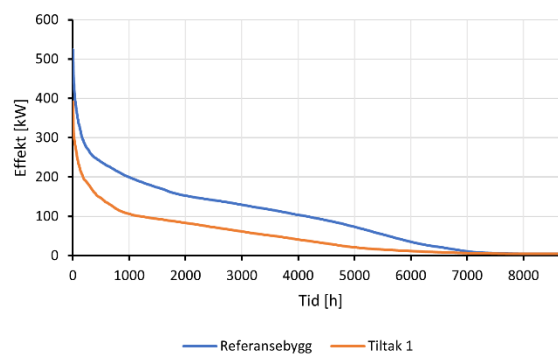
Tabell 6.1: Energi og effekt for tiltak 1.

	Elektrisitetsforbruk [kWh/m <sup>2</sup> ]	Fjernvarmeforbruk [kWh/m <sup>2</sup> ]	Maks effekt EL [kW]	Maks effekt FV [kW]	Brukstid FV [h]
Tiltak 1	294,5	62,2	343,4	391,4	1139
Differanse fra referansebygg	-2,6 %	-49 %	-3,1 %	-25 %	- 31 %

Som vist i Tabell 6.1 reduseres det årlige fjernvarmeforbruket med 49 % ved å skifte ut ventilasjonsaggregatet. Elektrisitetsforbruket har en noe mer beskjeden besparelse på 2,6 %. Med tanke på at store deler at elektrisitetsforbruket er knyttet til store elektriske laster på lab, er reduksjonen på 8 kWh/m<sup>2</sup> sammenliknet med referansebygget likevel signifikant. Tiltaket medfører i tillegg en reduksjon i topplasten for både elektrisitet og fjernvarme på henholdsvis 3,1% og 25 %. Reduksjonen i topplasten for fjernvarme er ikke i samme størrelsesorden som reduksjonen i det årlige fjernvarmeforbruket. Dette medfører at brukstiden reduseres med 31 % sammenliknet med referansebygget. Dette er illustrert i varighetskurven for fjernvarme, Figur 6.2. Varighetskurven for elektrisitet er presentert i Figur 6.1.



Figur 6.1: Varighetskurve EL for tiltak 1.



Figur 6.2: Varighetskurve FV for tiltak 1.

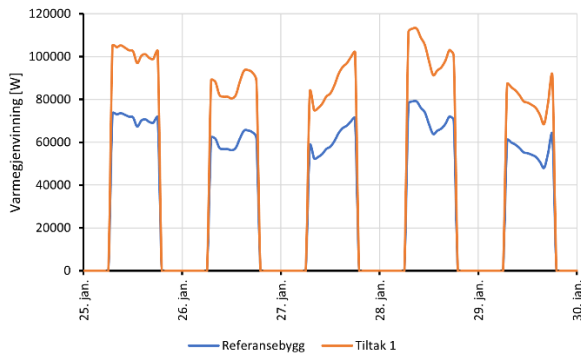
Varighetskurven for elektrisitet, Figur 6.1, viser reduksjonen i både topplasten for elektrisitet og det samlede elektrisitetsbehovet gjennom året ved at kurven for tiltak 1 alltid ligger under kurven for referansebygget. Ellers følger kurvene samme trend. Nedgangen i elektrisk effektuttak er størst i timene hvor effektuttaket i referansebygget var størst. Dette er fordi viftevirkningsgraden er økt prosentvis slik at besparelsene blir størst ved høyere effektuttak. Samtidig er ventilasjonen

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

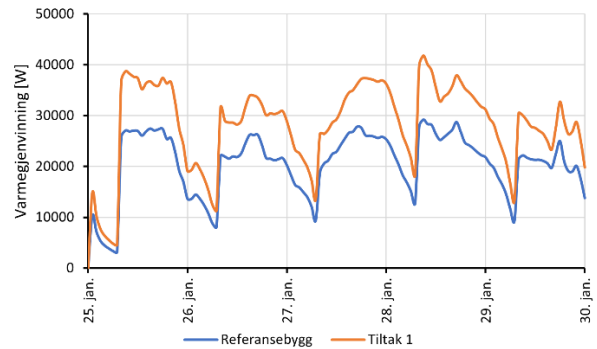
avskrudd utenfor driftstid i enkelte soner, og det vil da heller ikke være noen reduksjon i elektrisitetsforbruket.

Varighetskurven for fjernvarme, vist i Figur 6.2, viser tydelig nedgang i effektuttak ved implementering av tiltak 1. Varighetskurven viser også at hyppigheten av effektuttak på over 100 kW er redusert med omtrent 3000 timer i løpet av året. Dette medfører en reduksjon i massestrømmen til fjernvarme, og fjernvarmenettet som bygget er tilkoblet opplever mindre belastning.

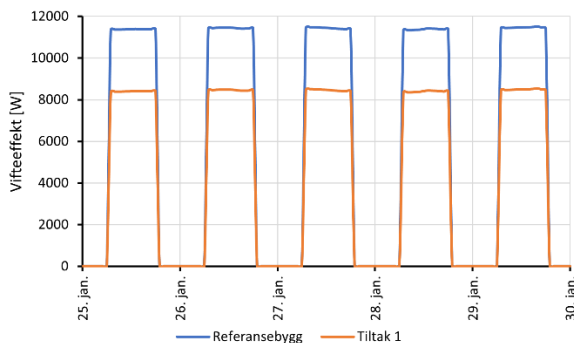
Tiltak 1 påvirker som nevnt varmegjenvinning og vifteeffekt. Dette er analysert for siste uken i januar 2016. Varmegjenvinningen i ventilasjonsaggregatene i kontor- og forelesningssonen er presentert i henholdsvis Figur 6.3 og Figur 6.4. Vifteeffekten i ventilasjonsaggregatene i kontor- og forelesningssonen er presentert i henholdsvis Figur 6.5 og Figur 6.6.



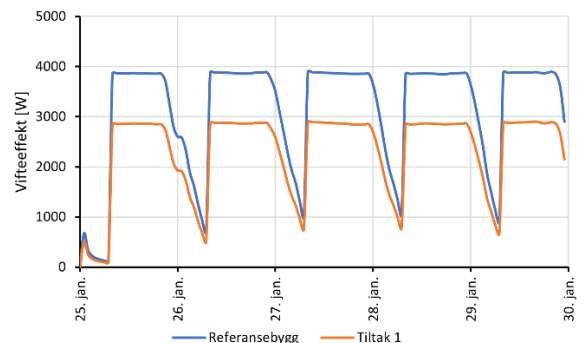
Figur 6.3: Varmegjenvinning referansebygg og tiltak 1 en uke i januar i ventilasjonsaggregat kontorsonene.



Figur 6.4: Varmegjenvinning referansebygg og tiltak 1 en uke i januar i ventilasjonsaggregat forelesningssone.



Figur 6.5: Vifteeffekt referansebygg og tiltak 1 en uke i januar i ventilasjonsaggregatet for kontorsonene.



Figur 6.6: Vifteeffekt referansebygg og tiltak 1 en uke i januar i ventilasjonsaggregatet for forelesningssonene.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

Som vist i Figur 6.3 øker varmegjenvinningen ved implementering av tiltak 1. Varmegjenvinningen i ventilasjonsaggregatet for kontorsonene varierer likt for referansebygget og etter implementering av tiltak 1. Forskjellen ligger i størrelsen på varmegjenvinningen. Variasjonene i løpet av dagen skyldes variasjon i temperaturen til avtrekksluften i kontorsonene. Generelt er varmegjenvinningen størst på starten og slutten av arbeidsdagen. Dette skyldes hovedsakelig variasjon i avtrekkstemperatur i sonen og utetemperatur.

Varmegjenvinningen i ventilasjonsaggregatet for forelesningssonene varierer i stor grad i løpet av siste uken i januar 2016, som vist i Figur 6.4. VAV er ventilasjonsstyringsstrategien i forelesningssonene og driftstiden er alltid på. Varmegjenvinningen etter tiltaket varierer tilnærmet likt som før tiltaket. Siden ventilasjonen alltid er på i forelesningssonene er det til enhver tid en viss varmegjenvinning.

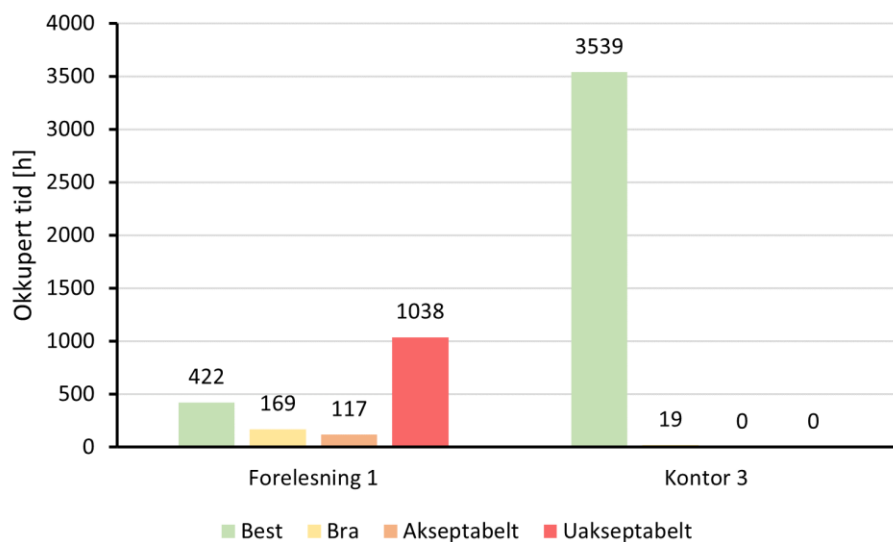
Vifteeffekten i ventilasjonsaggregatet til kontorsonene er som forventet redusert ved implementering av tiltak 1, dette er vist i Figur 6.5. Vifteeffekten er konstant i driftstid, dette skyldes at ventilasjonsstyringsstrategien er CAV i kontorsonene. Effektive vifter medfører en besparelse i effektuttak på omtrent 3000 W i driftstiden i kontorsonene.

Som vist i Figur 6.6 er besparelsen for vifteeffekt for forelesning som følge av tiltak 1 størst i driftstid når vifteeffekten er maks. Dette er forventet ettersom viftens effektivitet er gitt i prosent, og reduksjonene blir derfor større jo høyere effektuttaket er. Høyere effektivitet på vifter medfører en besparelse i effektuttak på omtrent 1000 W i driftstiden i forelesningssonene. Det kommer også frem fra figuren at viftene i ventilasjonsaggregatet som forsyner forelesningssonene er påskrudd hele døgnet i ukedagene. Dette er på grunn av de høye internlastene i sonene. Ventilasjonssystemet jobber derfor døgnet rundt for å holde temperatur- og CO<sub>2</sub>-nivået innenfor settpunkt. Dette vil bli diskutert videre i kapittel 0.

### 6.1.2 Inneklima – tiltak 1

I Figur 6.7 er resultater for adaptiv termisk komfortmodell i forelesning 1 og kontor 3 presentert.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5



Figur 6.7: Adaptiv komfortmodell for forelesning 1 og kontor 3 - tiltak 1.

Adaptiv termisk komfortmodell etter implementering av tiltak 1 viser at tiltaket har minimal påvirkning på termisk komfort. Dette er forventet da tiltaket kun endrer på virkningsgraden til komponenter, og ikke luftmengder eller settpunkttemperaturer. Forelesning 1 har fortsatt et utilfredsstillende termisk inneklima med omtrent 60 % av okkuperte timer i den uakseptable kategorien, som vist i Figur 6.7. Tiltaket bør derfor kombineres med andre tiltak for å bedre det termiske inneklimaet i forelesning.

### 6.1.3 Klimafotavtrykk – tiltak 1

Årlig klimafotavtrykk, gitt i CO<sub>2</sub>-ekvivalenter, fra energibruk etter implementering av tiltak 1 er presentert i Tabell 6.2.

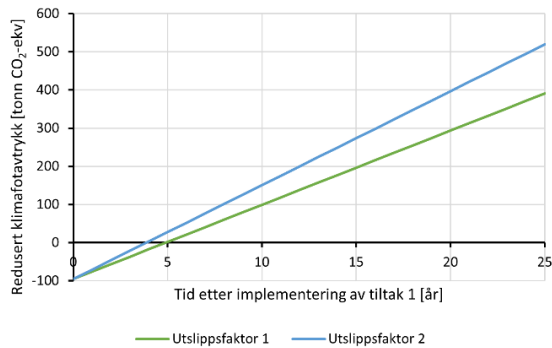
Tabell 6.2: Årlig klimafotavtrykk fra energibruk og iboende utslipp for tiltak 1.

Utslippsfaktor	Iboende utslipp [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Utslipp FV [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Utslipp EL [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Totalt årlig utslipp [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Årlig utslippsbesparelse [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
1	95 500	19 860	21 084	40 944	19 444
2	95 500	19 860	210 838	230 698	24 598

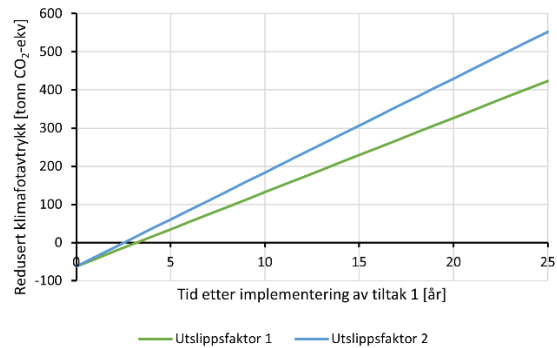
Ettersom den største energibesparelsen som følge av tiltak 1 er fjernvarmebesparelse, er også mesteparten av årlig utslippsbesparelse være knyttet til fjernvarme. Utslippsfaktor 1 resulterer i årlig utslippsbesparelse på 19,4 tonn CO<sub>2</sub>-ekv, mens utslippsfaktor 2 resulterer i årlig

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

utslippsbesparelse på 24,6 tonn CO<sub>2</sub>-ekv. Antall år før besparelsen gjør opp for iboende utslipp fra tiltaket er vist i Figur 6.8. Dersom utslipp ved avfallshåndtering og spart utslipp ved gjenvinning av materialer for de eksisterende ventilasjonsaggregatene er medberegnet, blir antall år før besparelsen går i null endret. Dette er presentert i Figur 6.9.



Figur 6.8: Redusert klimafotavtrykk etter implementering av tiltak 1.



Figur 6.9: Redusert klimafotavtrykk etter implementering av tiltak 1 medberegnet avfallshåndtering og gjenvinning av eksisterende ventilasjonsaggregat.

Som vist i Figur 6.8 vil det avhengig av utslippsfaktoren ta mellom 4 og 5 år før klimafotavtrykket er null etter implementering av tiltak 1. Utslippsfaktor 2 resulterer i kortest tid, da utslippsintensiteten til elektrisitet er høyere for denne utslippsfaktoren enn for utslippsfaktor 1. Siden det er stor usikkerhet i utslippsintensiteten til elektrisitet er det rimelig å anta at den faktiske utslippsfaktoren ligger mellom utslippsfaktor 1 og 2.

Figur 6.9 viser at det totale klimafotavtrykket til tiltaket reduseres, dersom gjenvinning og avfallshåndtering av eksisterende aggregat inkluderes. Dette medfører at tiden før klimafotavtrykket til tiltak 1 er null reduseres. Dette er fordi gjenvinningen av eksisterende ventilasjonsaggregat gir en utslippsbesparelse som er større enn utslippet fra avfallshåndteringen av eksisterende ventilasjonsaggregat. Det vil ta mellom 2 og 3 år før reduksjonen i utslipp som følge av energibesparelser i tiltak 1 og gjenvinning, utligner iboende utslipp, samt avfallshåndtering.

### 6.1.4 Lønnsomhet – tiltak 1

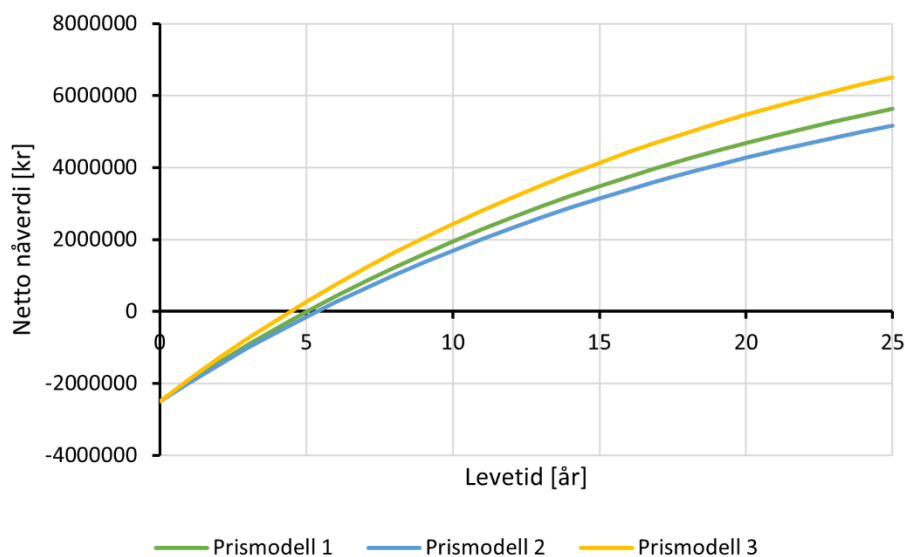
Lønnsomhetsanalyse for tiltak 1 med prismodell 1, 2 og 3 er presentert i Tabell 6.3.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

Tabell 6.3: Lønnsomhetsanalyse for tiltak 1.

Prismodell	Investeringskostnad [kr]	Årlig energipris [kr]	Årlige besparelser [kr]	Levetid [år]	Tilbakebetalingstid [år]	Netto nåverdi [kr]
1	2 500 000	3 064 424	576 459	25	5,0	5 624 578
2	2 500 000	2 799 601	543 165	25	5,4	5 155 342
3	2 500 000	3 310 338	639 242	25	4,5	6 509 438

Tiltak 1 er lønnsomt ettersom netto nåverdien er over 5 millioner kroner uavhengig av prismodell, som vist i Tabell 6.3. Tilbakebetalingstiden varierer mellom 4,5 år og 5,4 år. Lønnsomheten til tiltaket ligger altså på grensen til hva som er satt som maksimum ønskelig tilbakebetalingstid, 5 år. Dersom energiprisene forblir på dagens høye nivå, vil tilbakebetalingstiden reduseres ytterligere. Maksimum investeringskostnad dersom tilbakebetalingstiden skal være 5 år for prismodell 1, 2, og 3 er henholdsvis 2 495 765 kr, 2 351 622 kr og 2 767 582 kr. Det er altså lite rom før økning av budsjettet til investeringskostnad dersom tilbakebetalingstiden skal holdes under 5 år. Investeringskostnaden er derimot meget realistisk da den baseres på et overslag gjort av en salgsingeniør i systemair, se vedlegg A.5. Netto nåverdi som funksjon av levetid er presentert i Figur 6.10.



Figur 6.10: Netto nåverdi som funksjon av levetid for tiltak 1.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

Som vist i Figur 6.10 gir prismodell 3 størst netto nåverdi gjennom hele levetiden til tiltaket. Dette er fordi denne prismodellen har høyest energipris, samt inkluderer effektpris. Da blir kostnadsbesparelsen størst blant prismodellene, som resulterer i størst netto nåverdi. Forskjellen i netto nåverdi med de ulike prismodellene øker ettersom levetiden øker.

### 6.2 Resultater og analyse tiltak 2 - Nattsenking

I tiltak 2 er nattsenking innført i alle soner. Settpunkttemperaturene i sonene er blitt redusert utenfor driftstid for å unngå unødvendig oppvarming av bygget. Nattsenking på 16 °C, 17 °C, 18 °C og 19 °C er testet. For å unngå unødvendig høy effekttopp økes settpunkttemperaturen gradvis mellom 05-08. Mellom 08-17 er settpunkttemperaturen i sonene 21 °C. Nattsenkingen skjer altså mellom 17:00 og 08:00. For å vurdere tiltaket tilstrekkelig skal resultater for energi og effekt, inneklimate, klimafotavtrykk og lønnsomhet presenteres i dette kapitlet.

#### 6.2.1 Resultater for energi og effekt – tiltak 2

Resultater for elektrisitetsforbruk, fjernvarmeforbruk, maksimum levert effekt til elektrisitet og fjernvarme og brukstid for fjernvarme er presentert i Tabell 6.4.

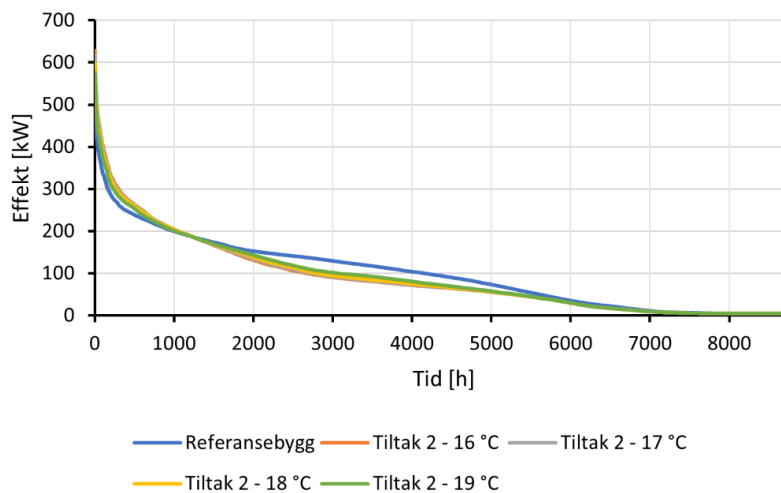
Tabell 6.4: Energi og effekt for tiltak 2.

	<b>Elektrisitetsforbruk [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Fjernvarmeforbruk [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Maks effekt EL [kW]</b>	<b>Maks effekt FV [kW]</b>	<b>Brukstid FV [h]</b>
Tiltak 2 – 16 °C	302,4	108,1	352,6	628,4	1232
Differanse fra referansebygg	- 0,0 %	- 10,9 %	-	+ 19,8 %	- 25,6 %
Tiltak 2 – 17 °C	302,4	108,6	352,6	617,4	1260
Differanse fra referansebygg	- 0,0 %	- 10,5 %	-	+ 17,7 %	- 24,0 %
Tiltak 2 – 18 °C	302,4	109,4	352,6	598,6	1308
Differanse fra referansebygg	- 0,0 %	- 9,8 %	-	+ 14,3 %	- 21,1 %
Tiltak 2 – 19 °C	302,4	111,0	352,6	576,2	1380
Differanse fra referansebygg	- 0,0 %	- 8,5 %	-	+ 9,9 %	- 16,7 %

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

Nattsinking medfører som forventet reduksjon i fjernvarmeforbruk for samtlige nattsenkingsalternativer. Tabell 6.4 viser at elektrisitetsforbruket har tilsvarende null differanse fra referansebygget og er likt for alle alternativer. Det er heller ingen endring i topplasten for elektrisitet. Av denne grunn blir ikke varighetskurven for elektrisitet presentert, da denne er tilnærmet identisk med varighetskurven for referansebygget.

Som vist i Tabell 6.4 er besparelsen størst for nattsinkingen med 16 °C mellom 17-08, dette alternativet medfører også størst økning i topplast for fjernvarme på 19,8 %, samt størst reduksjon i brukstid. Alternativet med lavest økning i topplasten for fjernvarme og lavest reduksjon i brukstid er 19 °C nattsinking. Dette er alternativet med lavest fjernvarmebesparelse på 8,5 %. 17 °C nattsinking gir fjernvarmebesparelse på 10,5 %, men økning i topplast på 17,7 %, mens 18 °C nattsinking reduserer det årlige fjernvarmeforbruket med 9,8 %, men øker topplasten for fjernvarme med 14,3 %. For samtlige alternativer er det dermed en avveining for hva som er viktigst av energiforbruk og effekttopp. Varighetskurven for fjernvarme for samtlige alternativer i tiltak 2 er presentert i Figur 6.11.

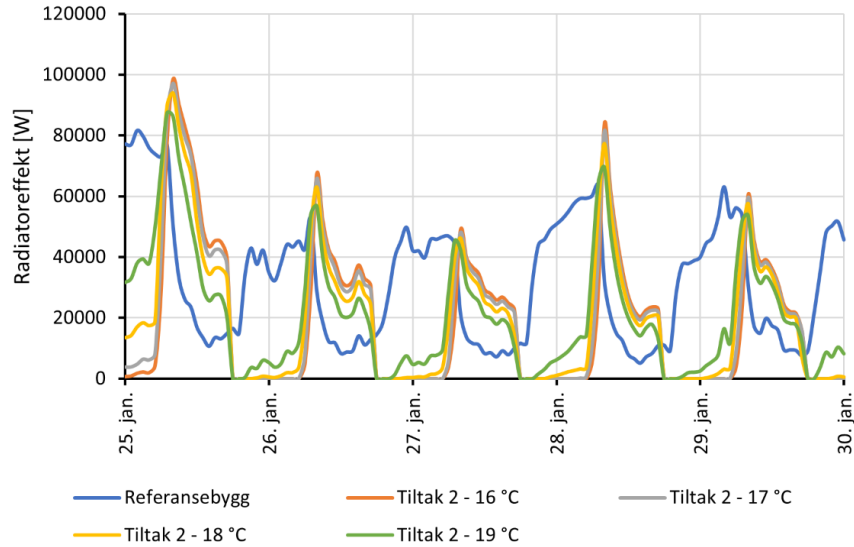


Figur 6.11: Varighetskurve FV tiltak 2.

Som vist i Figur 6.11 er effektuttaket for fjernvarme i tiltak 2 høyere enn referansebygget omtrent 1000 timer i året. Resterende timer ligger effektuttaket med tiltak 2 lavere eller likt med referansebygget. Lavest ligger alternativet med 16 °C nattsinking, dette er alternativet med størst fjernvarmebesparelse, men høyest topplast. For å se nærmere på hvordan effektuttaket til radiatorene påvirkes av nattsinking er radiatoreffekten siste uken i januar presentert i Figur 6.12.

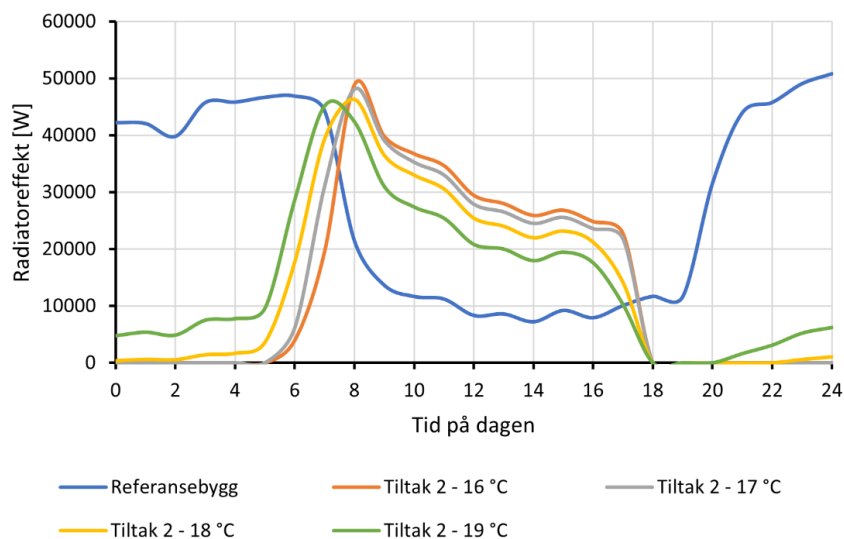


## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5



Figur 6.12: Total levert effekt til samtlige radiatorer en uke i januar tiltak 2.

Som vist i Figur 6.12 forflyttes topplasten til byggets radiatoreffekt ved innføring av nattsenkning. Nattsenkingen fører til at radiatoreffekten er omtrent null på nattestid for alternativene 16 °C, 17 °C og 18 °C. Den daglige effekttoppen er høyere med nattsenkning enn for referansebygget. Dette er lite gunstig da det økte effektbehovet krever høyere massestrøm fra fjernvarmenettet i morgentimene, som er tidspunkt med høy belastning på nettet fra før. For å undersøke mer detaljert hvordan levert effekt til radiator blir påvirket av de ulike nattsenkingsalternativene, blir radiatoreffekt for hver time 27. januar presentert i Figur 6.13.



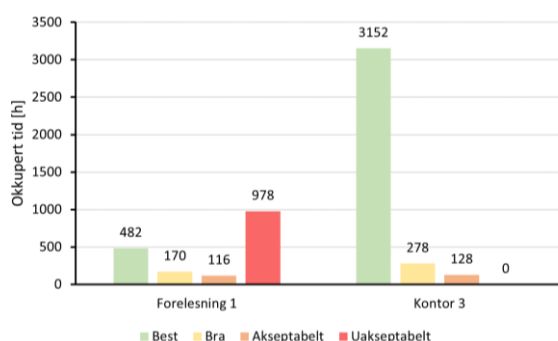
Figur 6.13: Totalt levert effekt til samtlige radiatorer, 27. januar tiltak 2.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

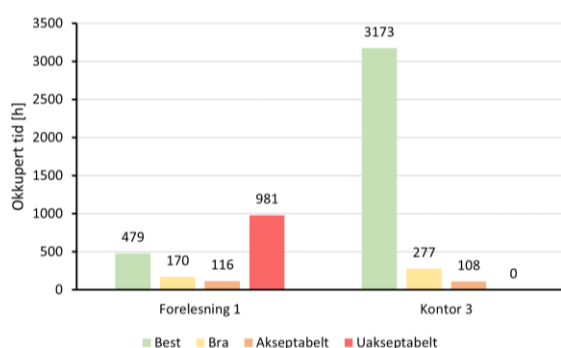
Effekttoppen til varme fra radiator som følge av at settpunkttemperaturen økes i morgentimene er i samme størrelsesorden for samtlige nattsenkingsalternativ. Forskjellen på nattsenkingsalternativene er tidspunktet toppen inntreffer. Dette illustreres i Figur 6.13. Effekttoppen for levert effekt til radiator oppstår tidligere ettersom nattsinkingstemperaturen øker. Dette skjer på grunn av måten settpunkttemperaturen øker mellom kl 05-08. Alle alternativene er satt til å lineært øke temperaturen fra settpunkt for nattsinking til 21 °C i dette tidsrommet. At effekttoppen kommer senere for nattsenkingsalternativene med lavere temperaturer, tyder på at rommet aldri blir like kaldt som nattsinkingstemperatur. Radiator begynner derfor ikke å varme rommet så tidlig som antatt. Dette vil bli videre undersøkt i delkapittel 6.2.2. Effekt til radiator påvirker levert fjernvarme til bygget direkte. Derfor er det ønskelig at effekttoppen er utenfor de tradisjonelle effekttoppene i fjernvarmenettet.

### 6.2.2 Inneklima – tiltak 2

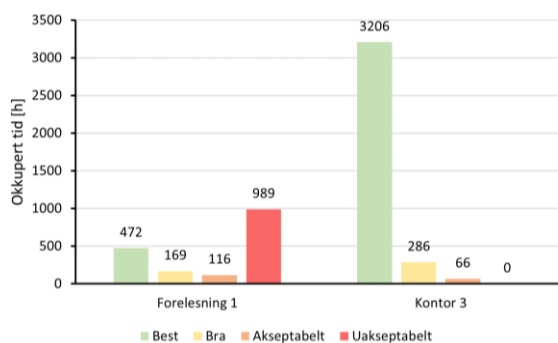
Resultater for adaptiv termisk komformodell for forelesning 1 og kontor 3 med nattsinking 16 °C, 17 °C, 18 °C og 19 °C er presentert i henholdsvis Figur 6.14, Figur 6.15, Figur 6.16, og Figur 6.17.



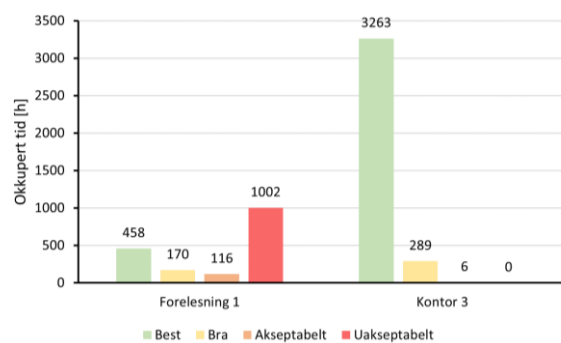
Figur 6.14: Adaptiv komfortmodell for forelesning 1 og kontor 3 - tiltak 2 (16 °C).



Figur 6.15: Adaptiv komfortmodell for forelesning 1 og kontor 3 - tiltak 2 (17 °C).



Figur 6.16: Adaptiv komfortmodell for forelesning 1 og kontor 3 - tiltak 2 (18 °C).

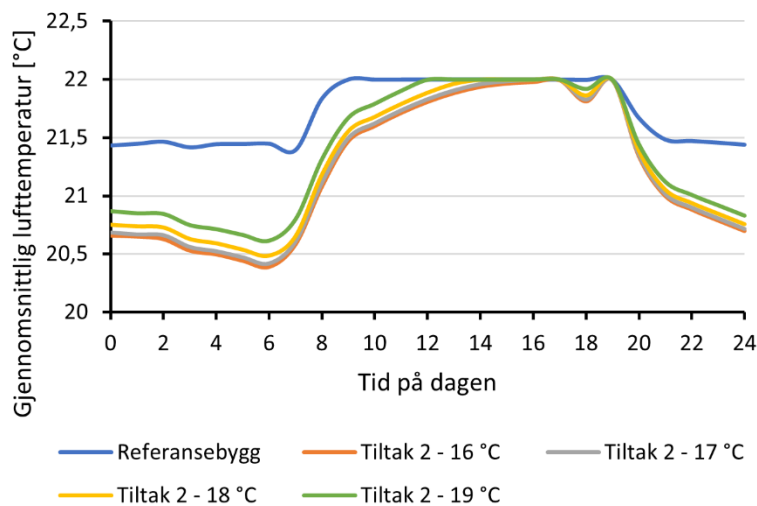


Figur 6.17: Adaptiv komfortmodell for forelesning 1 og kontor 3 - tiltak 2 (19 °C).

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

Adaptiv termisk komfortmodell viser at det termiske inneklimaet i forelesning 1 bedres med lav nattsinkingstemperatur. Likevel er ikke det termiske inneklimaet i denne sonen tilfredstillende. I det beste alternativet, 16 °C nattsinking, er 56 % av okkuperte timer innenfor den uakseptable komfortkategorien, som vist i Figur 6.14. Trenden er motsatt for kontorsonen, best termisk inneklima nås ved 19 °C nattsinking i denne sonen, som vist i Figur 6.17. Generelt er inneklimaet tilfredstillende for samtlige alternativer for nattsinking i kontorsonen og nattsinking medfører ingen timer innenfor den uakseptable komfortkategorien, som vist i Figur 6.14, Figur 6.15, Figur 6.16 og Figur 6.17. Generelt er forelesning 1 fortsatt den sonen med dårligst termisk inneklima, mens kontor 3 fortsatt er sonen med best termisk inneklima. Resultatene viser at nattsinking bør tilpasses sonens egenskaper, som internlast, tilknytning til yttervegg og mengde vinduer, etc.

Gjennomsnittlig lufttemperatur påvirkes av nattsinking, dette er presentert for kontor 3 27. januar 2016 i Figur 6.18.



Figur 6.18: Gjennomsnittlig lufttemperatur i kontor 3 27. januar tiltak 2.

Figur 6.18 viser at nattsinking fører til at den gjennomsnittlige lufttemperaturen i kontorsonen ved starten på arbeidstiden er omtrent 1 °C lavere enn for referansebygget. Temperaturen i sonen øker hyppig klokken 06 for alle nattsenkingsalternativene. Dette er på grunn av økt radiatoreffekt samt økte internlast i sonen når kontoret blir okkupert. Lufttemperaturen i sonen går ikke under 20 °C uavhengig av nattsinkingstemperatur. Dette forklarer hvorfor effekttoppene til radiator oppstår på ulik tid for de ulike nattsenkingsalternativene. At temperaturen aldri blir like lav som settpunkt

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

for nattsenkning kan tyde på at bygget har betydelig termisk kapasitet. Dette er en egenskap som ofte ikke er forenelig med nattsenkning, da tregheten i bygget kan gjøre det vanskelig å regulere temperaturen i arbeidstiden. Dessuten kan brukere oppleve termisk ubehag på grunn av lav temperaturen i sonen helt i starten av arbeidstiden med nattsenkning.

For å velge hvilket nattsenkingsalternativ som er mest kompatibelt for bygningskohorten er resultater for energi og effekt, samt inneklimate analysert. Selv om alternativet med 16 °C nattsenkning gir størst energibesparelse medfører dette at effekttoppen for fjernvarme økes og flyttes til ugunstig tid på døgnet sammenliknet med referansebygget. Dessuten reduserer dette alternativet termisk komfort i kontorsonen. 18 °C nattsenkning reduserer årlig fjernvarmeforbruk med 9,8 %, som er noe høyere enn for 19 °C-alternativet. Selv om alternativet øker effekttoppen for fjernvarme, er effekttoppen nærmere referansebyggets effekttopp enn alternativene 16 °C og 17 °C. Dette alternativet opprettholder det gode termiske inneklimate i kontorsonen og unngår at det er kjølig ved starten av arbeidstiden. Nattsenkningstemperatur 18 °C vurderes derfor som alternativet med størst potensiale. Klimafotavtrykk og lønnsomhetsanalyse vil derfor kun bli presentert for dette alternativet.

### 6.2.3 Klimafotavtrykk – tiltak 2

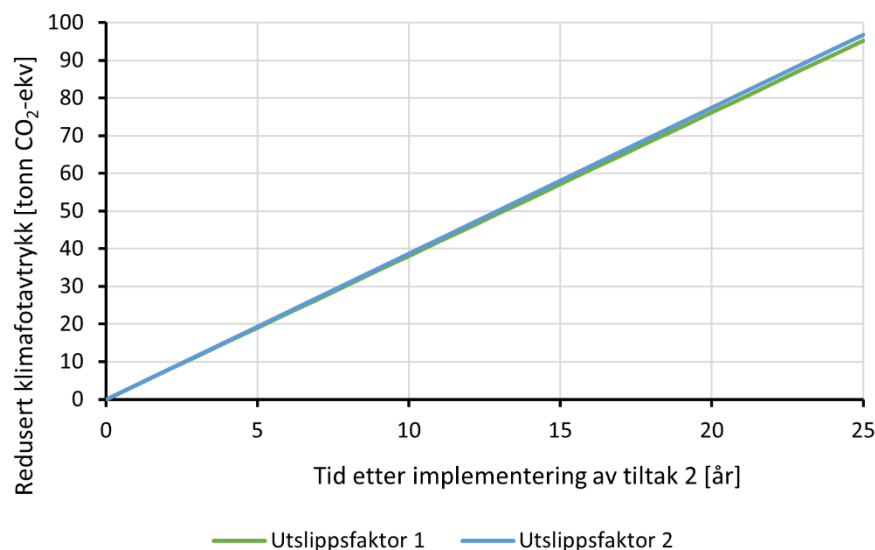
En analyse av årlig klimafotavtrykk og iboende utslipp etter implementering av tiltak 2 med 18 °C nattsenkning er presentert i Tabell 6.5

Tabell 6.5: Årlig klimafotavtrykk fra energibruk og iboende utslipp for tiltak 2.

Utslippsfaktor	Iboende utslipp [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Utslipp FV [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Utslipp EL [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Totalt årlig utslipp [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Årlig utslippsbesparelse [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
1	0	34 931	21 649	56 580	3807
2	0	34 931	216 494	251 425	3872

Årlig utslippsbesparelse er omtrent lik for de to utslippsfaktorene, som vist i Tabell 6.5. Dette er fordi reduksjonen i elektrisitetsforbruk er minimal, og utslippsintensiteten for fjernvarme er den samme for begge utslippsfaktorer. Redusert CO<sub>2</sub>-utslipp som funksjon av tid etter implementering av tiltak 2 er presentert i Figur 6.19.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5



Figur 6.19: Redusert klimafotavtrykk etter implementering av tiltak 2.

Som vist i Figur 6.19 følger utslippsfaktor 1 og 2 omtrent samme summerte reduksjon i CO<sub>2</sub>-utslipp. Påvirkningen av forskjell i utslippsintensitet for elektrisitet i utslippsfaktor 1 og 2 blir først synlig etter omtrent 15 år. Tiltak 2 vil kontinuerlig spare CO<sub>2</sub>-utslipp i forhold til referansebygget ettersom tiltaket medfører reduksjon i fjernvarmeforbruk.

### 6.2.4 Lønnsomhet – tiltak 2

Lønnsomhetsanalyse for tiltak 2 med 18 °C nattsenkning er presentert i Tabell 6.6.

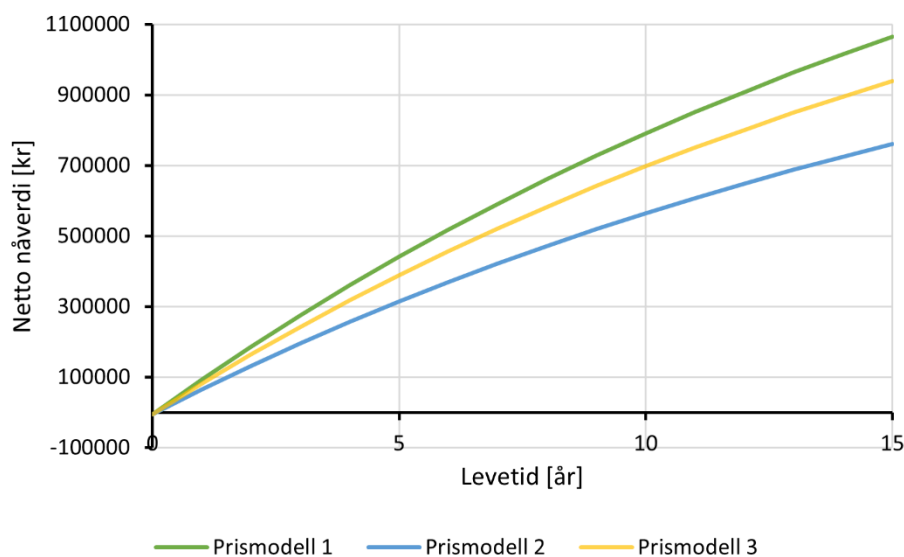
Tabell 6.6: Lønnsomhetsanalyse for tiltak 2 (18 °C).

Pris-modell	Investerings-kostnad [kr]	Årlig energipris [kr]	Årlige besparelser [kr]	Levetid [år]	Tilbakebetalings-tid [år]	Netto nåverdi [kr]
1	5000	3 537 790	103 092	15	0,05	1 065 065
2	5000	3 268 986	73 781	15	0,07	760 826
3	5000	3 858 617	90 963	15	0,06	939 170

Tiltak 2 er lønnsomt for samtlige prismodeller med netto nåverdi som varierer mellom 760 826 kr og 1 065 065 kr, som vist i Tabell 6.6. Tilbakebetalingstiden er svært lav, dette skyldes at investeringskostnaden er lav. Det knyttes usikkerhet til investeringskostnaden, da det er utfordrende å sette en pris på en slik liten justering i settpunkttemperatur. Tiltakets maksimum investeringskostnad for prismodell 1, 2, 3 dersom tilbakebetalingstiden ikke skal overskride 5 år,

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

er henholdsvis 446 336 kr, 319 434 kr og 393 824 kr. Maksimum investeringskostnad er høyest for prismodell 1, dette er fordi denne prismodellen ikke tar hensyn til effektpris og har en høy energipris. Prismodell 2 og 3 er dermed mer passende for dette tiltaket, i og med at effekttoppene økes mens energiforbruket reduseres. Det knyttes stor usikkerhet til levetiden, da det ikke innebærer utskifting av utstyr. Det er også usikkert hvor lang gjenstående levetid er for eksisterende utstyr. Netto nåverdi som en funksjon av levetid er derfor presentert i Figur 6.20.



Figur 6.20: Netto nåverdi som funksjon av levetid for tiltak 2 (18 °C).

Som vist i Figur 6.20 er tiltak 2 lønnsomt for omtrent hele levetiden. Forskjellen mellom prismodellene blir tydeligere når levetiden øker. Siden prismodell 1 ikke inkluderer noen effektpris er det rimelig å anta at den reelle netto nåverdikurven ligger et sted mellom prismodell 2 og 3.

### 6.3 Resultater og analyse tiltak 3 – Kontroll av avtrekkstemperatur

For å forbedre termisk komfort og redusere energiforbruket i rom med høye temperaturer, kan kontroll av avtrekkstemperatur være et godt tiltak. I referansebygget styres temperaturen på tilluften i ventilasjonssystemet etter utetemperaturen. Ved kontroll av avtrekkstemperaturen kan derimot tilluftstemperaturen reguleres etter den faktiske temperaturen i rommet. Tiltaket vil bli testet i alle sonene i modellen. I dette delkapittelet vil energi og effekt, inn klima, klimafotavtrykk og lønnsomhet bli presentert for tiltak 3.

### 6.3.1 Energi og effekt – tiltak 3

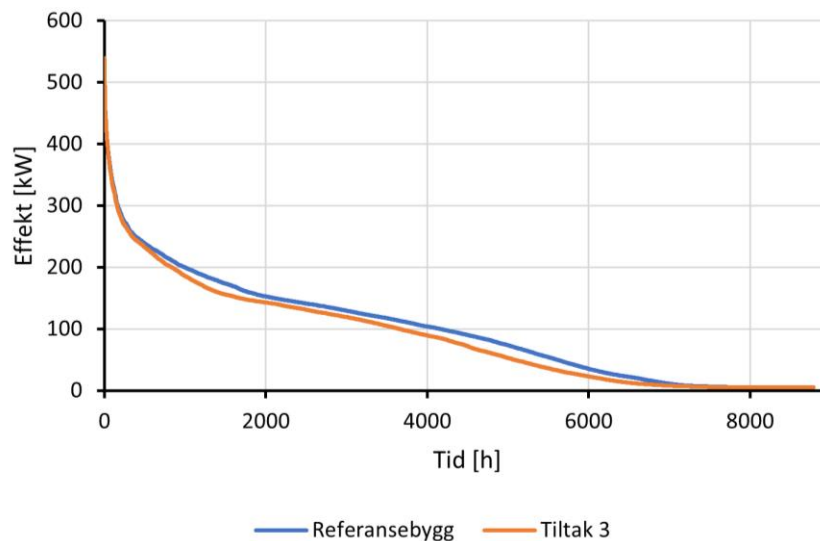
Resultater for elektrisitetsforbruk, fjernvarmeforbruk, maksimum levert effekt til elektrisitet og fjernvarme og brukstid for fjernvarme er presentert i Tabell 6.7.

Tabell 6.7: Energi og effekt for tiltak 3.

	Elektrisitetsforbruk [kWh/m <sup>2</sup> ]	Fjernvarmeforbruk [kWh/m <sup>2</sup> ]	Maks effekt EL [kW]	Maks effekt FV [kW]	Brukstid FV [h]
Tiltak 3	302,0	108,7	353,4	538,9	1444
Differanse fra referansebygg	-0,17 %	-10,4 %	- 0,05 %	+2,9 %	-14,8 %

Tabell 6.7 Resultater for elektrisitetsforbruk, fjernvarmeforbruk, maksimum levert effekt til elektrisitet og fjernvarme og brukstid for fjernvarme er presentert i Tabell 6.7.

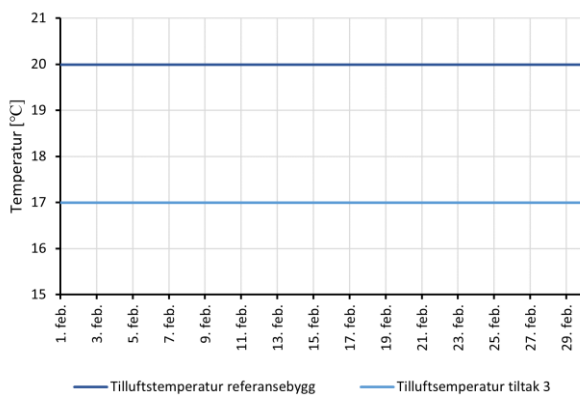
Tabell 6.7 viser en tydelig reduksjon i fjernvarmeforbruket og brukstid for tiltak 3, sammenlignet med referansebygget. Resterende effekt- og energieresultater er tilnærmet uendret, men det er en liten økning i maksimum levert effekt fra fjernvarme. Etersom endringen i elektrisitetsforbruket er minima, vil ikke varighetskurven for elektrisitet bli presentert. Reduksjonen av fjernvarmeforbruket illustreres godt ved sammenligning av varighetskurven før og etter tiltaket er innført, som er presentert i Figur 6.21.



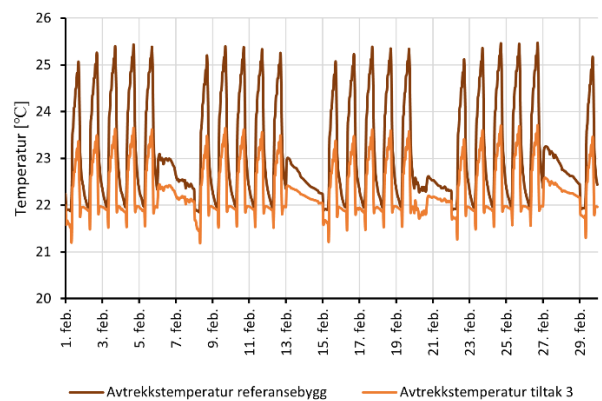
Figur 6.21: Varighetskurve FV for tiltak 3.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

Figur 6.21 presenterer hvordan varighetskurven til tiltak 3 stort sett ligger lavere enn varighetskurven til referansebygget. Det er likevel en minimal endring i maksimum levert effekt, som resulterer i at brukstiden synker med nesten 15 %. Dette viser tydelig at tiltaket reduserer fjernvarmeforbruket jevnt over året, med unntak av de kaldeste dagene hvor levert effekt er uendret. For å finne ut mer om hvorfor energiforbruket endrer seg slik som det gjør, er det gunstig å analysere endring av temperatur på tilluft og avtrekk. I Figur 6.22 og Figur 6.23 er henholdsvis tilluftstemperatur og avtrekkstemperatur for ventilasjonsaggregatet til forelesning presentert. Alle resultatene er presentert for måneden februar.



Figur 6.22: Tilluftstemperatur til forelesningssonene i februar tiltak 3.

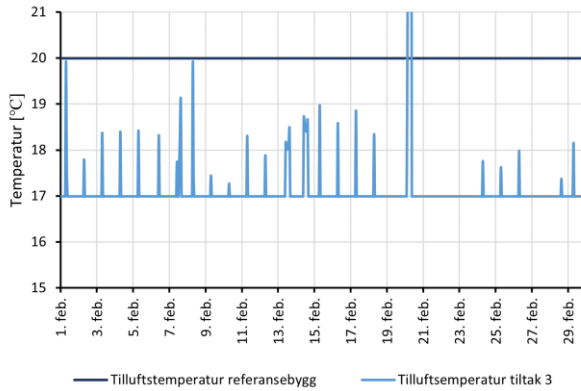


Figur 6.23: Avtrekkstemperatur fra forelesningssonene i februar tiltak 3.

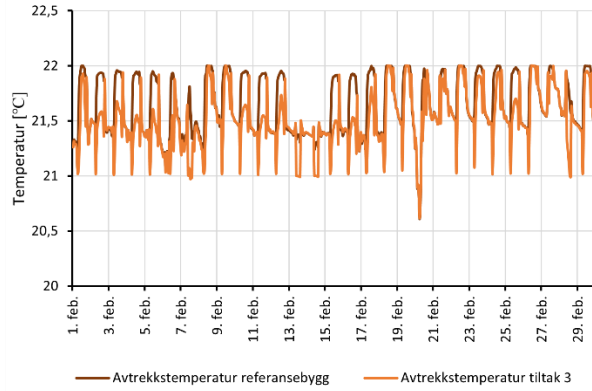
I Figur 6.23 er det illustrert hvordan avtrekkstemperaturen i forelesning for referansebygget er veldig høy, og at den forbedres etter tiltak 3 er innført. Maksimum avtrekkstemperatur i forelesning reduseres med omtrent 2 °C, og forskjellen mellom minimum og maksimum temperatur i løpet av dagen er også redusert. Grunnen til dette er illustrert i Figur 6.22. Her kommer det frem at tilluftstemperaturen i forelesning er redusert fra 20 °C til 17 °C. Når tilluftstemperaturen er lavere er det behov for mindre levert energi i varmebatteriet i ventilasjonsaggregatet for å varme opp tilluften. Det er likevel viktig å påpeke at temperaturen i forelesning fortsatt er over settpunkttemperaturen på 21 °C store deler av dagen, og at tilluftstemperaturen derfor kunne vært lavere. Dette kunne også resultert i en høyere reduksjon i fjernvarmeforbruket. I Figur 6.24 og Figur 6.25 er henholdsvis tilluftstemperatur og avtrekkstemperatur for ventilasjonsaggregatet til kontor presentert.



## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5



Figur 6.24: Tilluftstemperatur til kontorsonene i februar tiltak 3.

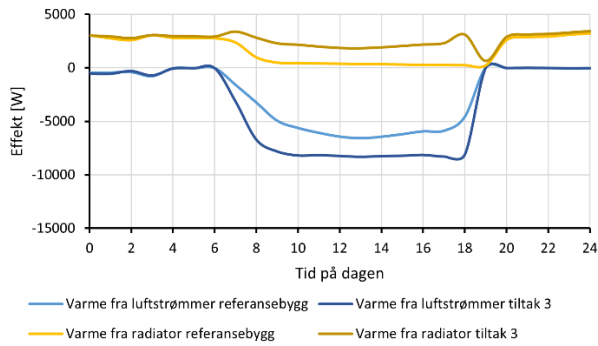


Figur 6.25: Avtrekkstemperatur fra kontorsonene i februar tiltak 3.

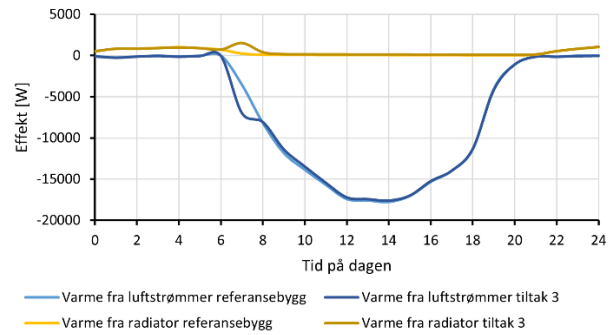
Tilluftstemperatur og avtrekkstemperatur for kontor sitt ventilasjonsaggregat, presentert i henholdsvis Figur 6.24 og Figur 6.25, illustrer også endringer fra referansebygget og etter innføring av tiltak 3. Både avtrekks- og tilluftstemperaturen varierer mer enn for referansebygget, og har fått lavere minimumstemperaturer enn tidligere. Det er spesielt tilluftstemperaturen som varierer mye og holder seg som oftest mellom 17 °C og 20 °C. Dette har også påvirket reduksjonen i fjernvarmeforbruket, og tyder på at behovet for temperatur til tilluft varierer mye fra dag til dag. Avtrekkstemperaturen for kontor er redusert noe og er oftere nære 21 °C, men reduksjonen er ikke like stor som for forelesning.

Reduksjon i tilluftstemperaturen vil påvirke varmebalansen i rommet. Internlaster, solinnstråling og transmisjon vil ha ingen eller liten endring, og det er hovedsakelig luftstrømmer og radiator som vil være endret fra referansebygget. I Figur 6.26 og Figur 6.27 er endring i varmetap fra luftstrømmer og varmegevinst fra radiator i kontor 1 presentert for henholdsvis 27. januar og 25. mai. I Figur 6.28 og Figur 6.29 er tilsvarende presentert for forelesning 4.

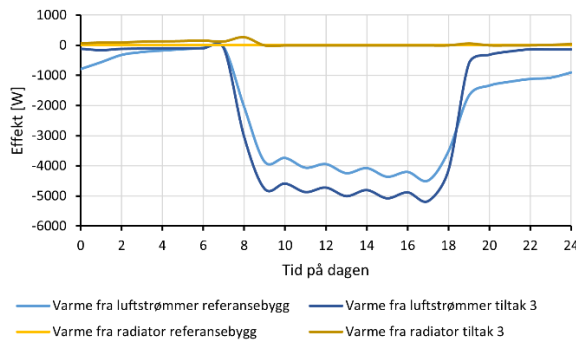
## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5



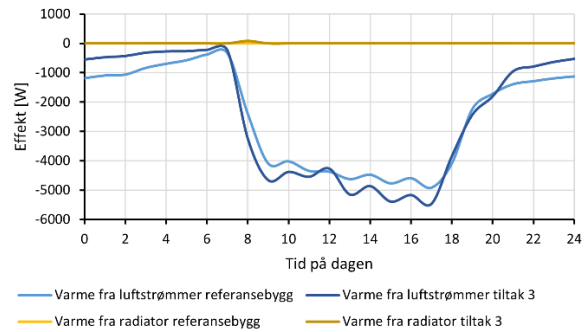
Figur 6.26: Varme fra radiator og luftstrømmer kontor 1, 27. jan tiltak 3.



Figur 6.27: Varme fra radiator og luftstrømmer kontor 1, 25. mai tiltak 3.



Figur 6.28: Varme fra radiator og luftstrømmer forelesning 4, 27. jan tiltak 3.



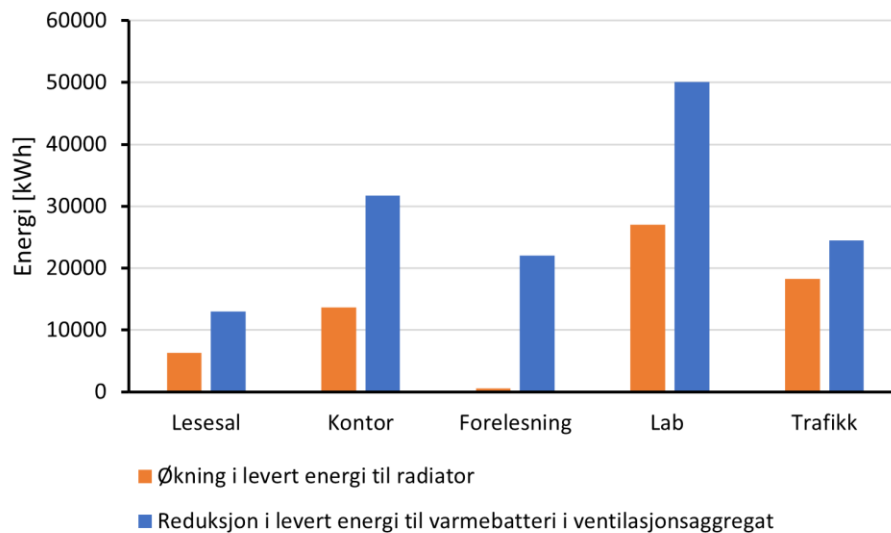
Figur 6.29: Varme fra radiator og luftstrømmer forelesning 4, 25. mai tiltak 3.

Grafen for luftstrømmer og radiator i forelesning og kontor, illustrert i Figur 6.26, Figur 6.27, Figur 6.28 og Figur 6.29, viser alle at luftstrømmer gir mer varmetap for tiltak 3 enn for referansebygget, spesielt i januar. Det kommer også frem at radiator må levere mer energi etter innføring av tiltak 3. I forelesning er det liten økning i levert radiatoreffekt, men i kontor er økningen betydelig større. Figur 6.26 og Figur 6.27 illustrer hvordan levert effekt fra radiator er veldig lik for tiltak 3 og referansebygget når det mekaniske ventilasjonssystemet ikke er på. I løpet av dagen, når varmetap fra luftstrømmene er redusert, er varmegevinst fra radiator økt. Det er også en tydelig økning i effekttopper ved start og slutt av arbeidsdagen, som mest sannsynlig er grunnen til den minimale økningen i maksimum levert effekt fra fjernvarme. Selv om man sparer energi ved oppvarming av tilluft vil økning i levert effekt fra radiator være med å øke energiforbruket og dermed virke mot hensikten av tiltaket.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

At levert effekt fra radiator øker på kontor ved innføring av kontroll av avtrekkstemperatur, tyder på at tiltak ikke fungerer optimalt. Ventilasjonssystemet sine sensorer oppfatter temperaturen i rommet som for høy og senker derfor tilluftstemperaturen. Dette gjør at radiatorene oppfatter temperaturen i rommet som for lav og leverer derfor mer varme. Systemene jobber derfor ikke godt sammen og det kan tyde på at tiltaket fungerer best i rom med høye internlaster hvor det er et problem med for høye temperaturer.

For å evaluere hvilke soner hvor tiltaket fungerer, bør reduksjon i levert energi til oppvarming av tilluft og økt energi til oppvarming via radiator sammenlignes. Dette presenteres i Figur 6.30. Energi er presentert som totalt for hele år 2016.

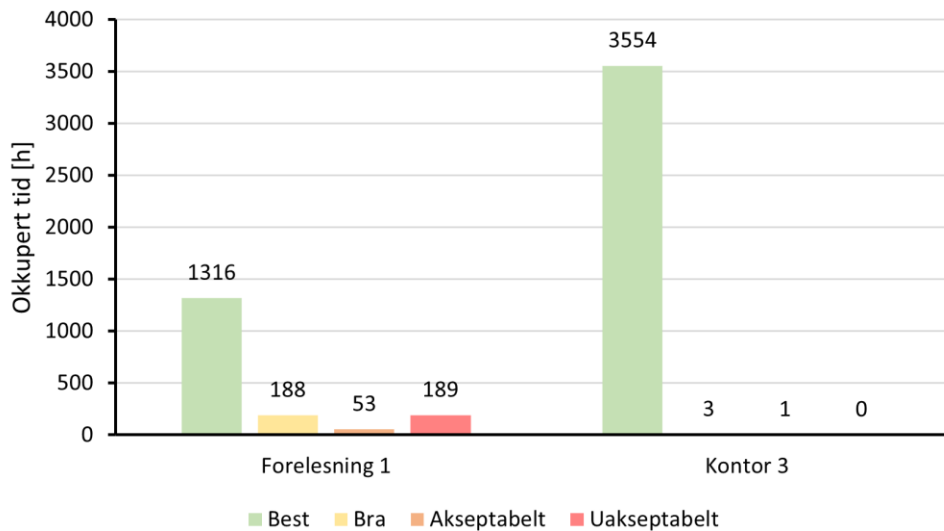


Figur 6.30: Økning i levert energi til radiator og reduksjon i levert energi til varmebatteri i ventilasjonsaggregat for alle soner tiltak 3.

Figur 6.30 viser at alle soner har økning i levert energi til radiator og reduksjon i levert energi til varmebatteri i ventilasjonsaggregat. Alle sonene har også større reduksjon i levert energi til varmebatteri enn økning til radiator. Dette betyr at tiltaket reduserer energiforbruket i alle soner, men kunne blitt utført på en mer effektiv måte. I teorien er det ønsket null økning i levert effekt fra radiator. Dette kan for eksempel løses ved å innføre PI-regulatorer på radiatorene, eller sette ulike settpunkt for avtrekkstemperatur og settpunkt i rommet.

### 6.3.2 Inneklima – tiltak 3

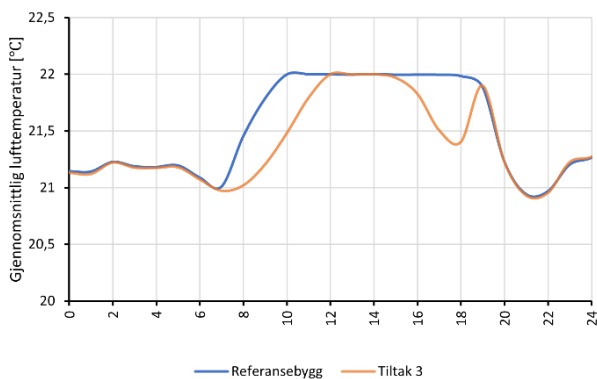
Å regulere tilluftstemperatur etter avtrekkstemperatur skal ikke bare resultere i energibesparelser, men forbedre inneklima i sonene. For å avgjøre om tiltaket klarer nettopp dette er det essensielt å analysere den termiske komforten i rommet, ettersom det i hovedsak er temperaturene i rommet som blir påvirket. I Figur 6.31 presenteres adaptiv komfortmodell for forelesning 1 og kontor 3 etter innføring av tiltak 3.



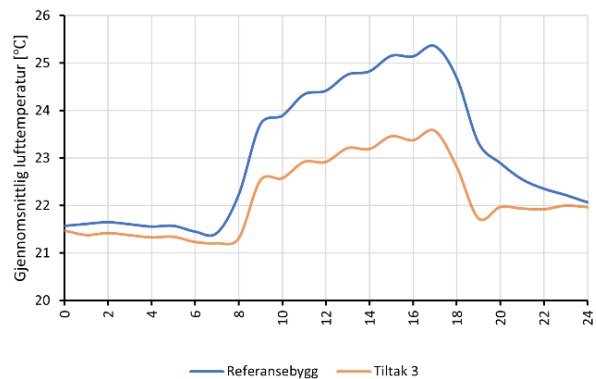
Figur 6.31: Adaptiv komfortmodell for forelesning 1 og kontor 3 - tiltak 3.

Figur 6.31 viser en tydelig forbedring i termisk komfort i forelesning hvor antall timer innenfor kategorien best har økt fra 421 til 1316 timer. På kontor er termisk komfort tilsvarende uendret. Forbedringen i forelesning skyldes reduksjonen i tilluftstemperaturen og dermed også temperaturen i rommet. Det er viktig å påpeke forelesning sin termiske komfort mulig ikke er like dårlig for referansebygget som antatt, og at temperaturene ikke er like høye. Dette er fordi volumet til forelesning i referansebygget er lavt i forhold til mange av forelesningssalene på NTNU. Om dette er tilfellet vil man heller ikke spare like mye energi, ettersom tilluftstemperaturen ikke bør være så lav. For å bedre kunne evaluere termisk komfort i de to sonene, blir gjennomsnittlig lufttemperatur en dag i februar presentert for kontor 1 og forelesning 1 i henholdsvis Figur 6.32 og Figur 6.33.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5



Figur 6.32: Gjennomsnittlig lufttemperatur på kontor 1, 1. feb tiltak 3.



Figur 6.33: Gjennomsnittlig lufttemperatur i forelesning 1, 1. feb tiltak 3.

I Figur 6.32 og Figur 6.33 har gjennomsnittlig lufttemperatur i rommet endret seg for begge soner etter innføring av tiltak 3. På kontor varierer gjennomsnittlig lufttemperatur mellom 21 °C og 22 °C, både for referansebygget og tiltak 3. Det som skiller temperaturen fra før og etter innføring av tiltak 3, er hvordan den varierer i løpet av dagen. Før tiltaket økte temperaturen fra 21 °C til 22 °C tidlig på morgenen, holdt seg stabil innenfor arbeidstiden, og sank ned til 21 °C igjen mot kvelden. Etter innføring av tiltaket øker temperaturen langsomt på morgenen, synker i 15-tiden og øker igjen rett før den reduserer som tidligere. Dette er hovedsakelig grunnet den minimale forskjellen mellom settpunkttemperatur for oppvarming og kjøling, og at tilluftstemperaturen varierer mer i løpet av dagen enn tidligere.

I forelesning følger temperaturen den samme trenden som tidligere, men temperaturen er redusert og hele grafen er flyttet nedover. Tidligere varierte temperaturen mellom 23 °C og 26 °C, men nå er den redusert til å variere mellom 22 °C og 24 °C. Det er altså fortsatt for varmt i forelesning, men å redusere tilluftstemperaturen ytterligere vil ikke være realistisk for ventilasjonssystemet, ettersom den allerede er veldig lav.

### 6.3.3 Klimafotavtrykk – tiltak 3

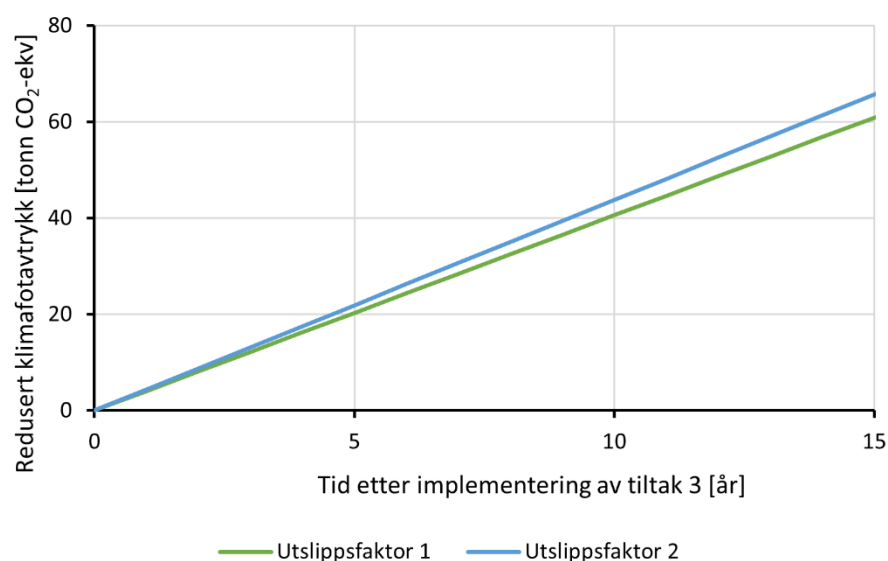
Styring av tilluftstemperatur ved kontroll av avtrekkstemperatur har vist seg å både redusere energiforbruket og forbedre termisk komfort. Nå vil det undersøkes om tiltaket også reduserer klimafotavtrykket til bygget. I Tabell 6.8 presenteres iboende utslipp, utslipp fra fjernvarme, elektrisitet og totalt utslipp, samt årlig utslippsbesparelser sammenlignet med referansebygget. Resultatene er presentert for både utslippsfaktor 1 og 2.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

Tabell 6.8: Årlig klimafotavtrykk fra energibruk og iboende utslipp for tiltak 3.

Utslippsfaktor	Iboende utslipp [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Utslipp FV [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Utslipp EL [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Totalt årlig utslipp [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Årlig utslippsbesparelse [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
1	0	34 708	21 621	56 329	4 059
2	0	34 708	216 208	250 916	4 381

Ettersom det er antatt at iboende utslipp er 0 kg og tiltaket sparer energi, er det som forventet at tiltaket også reduserer klimagassutslippet. De årlige besparelsene ligger på 4059 kg CO<sub>2</sub>-ekv og 4381 kg CO<sub>2</sub>-ekv for utslippsfaktor 1 og 2, som vist i Tabell 6.8. I Figur 6.34 presenteres redusert utslipp, i tonn CO<sub>2</sub>-ekv, som funksjon av tid etter implementering av tiltaket.



Figur 6.34: Redusert klimafotavtrykk etter implementering av tiltak 3.

Figur 6.34 illustrerer de minimale forskjellene mellom utslippsfaktor 1 og utslippsfaktor 2. Dette er fordi det ikke er store endringer i elektrisitetsforbruket fra referansebygget og tiltak 3. I løpet av levetiden til tiltak 3 sparer tiltaket rundt 60 tonn CO<sub>2</sub>-ekv. Besparelsene er ikke veldig ulike for de to faktorene og valg av utslippsfaktor vil derfor ikke ha veldig stor innvirkning på resultatene. Dersom et nøyaktig tall for iboende utslipp hadde blitt inkludert, fremfor å forenkle til 0 kg, ville det mest sannsynlig ikke gitt store innvirkninger på den totale utslippsbesparelsen.

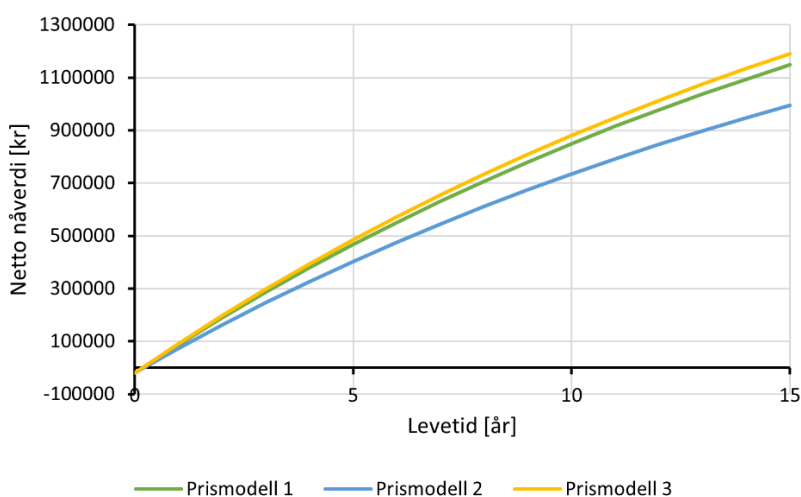
### 6.3.4 Lønnsomhet – tiltak 3

Tabell 6.9 presenterer de ulike parameterne brukt i beregning av lønnsomhet, samt resultater for tilbakebetalingstid og netto nåverdi. I tabellen presenteres alle tre prismodeller.

Tabell 6.9: Lønnsomhetsanalyse for tiltak 3.

Pris-modell	Investerings-kostnad [kr]	Årlig energipris [kr]	Årlige besparelser [kr]	Levetid [år]	Tilbakebetalings-tid [år]	Netto nåverdi [kr]
1	20 000	3 528 340	112 543	15	0,18	1 148 154
2	20 000	3 245 051	97 715	15	0,21	994 254
3	20 000	3 833 018	116 563	15	0,18	1 189 880

Netto nåverdi er beregnet til å være positiv for alle de tre prismodellene, som vist i Tabell 6.9. Prismodell 3 har den høyeste netto nåverdien på nesten 1,2 millioner, etterfulgt av prismodell 1 på 1,15 million og til slutt prismodell 2 med cirka 1 million i netto nåverdi. Grunnen til at netto nåverdi er lavest for prismodell 2 er at energiprisen er lavere, og man har derfor lavere årlige besparelser. Netto nåverdi for prismodell 1 og 3 er veldig like, selv om energiprisen i prismodell 3 også inkluderer effektpris. Dette er grunnet de minimale endringene i maksimum levert effekt hver måned. Tilbakebetalingstiden er veldig lav på under 1 år for alle prismodellene, og er derfor innenfor kravet til NTNU på 5 år. I Figur 6.35 illustreres netto nåverdi som funksjon av levetid for alle tre prismodeller.



Figur 6.35: Netto nåverdi som funksjon av levetid for tiltak 3.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

Figur 6.35 illustrerer hvordan netto nåverdi blir positiv raskt og gradvis øker for alle prismodellene. Figuren illustrerer også hvordan prismodell 1 og 3 har veldig lik netto nåverdi, og at grafen for prismodell 2 alltid ligger lavere. Dersom tilbakebetalingstiden skal være mindre enn 5 år, kan maksimum investeringskostnad være 487 251 kr, 432 057 kr og 504 655 kr for henholdsvis prismodell 1, 2 og 3. Dette er omtrent 25 ganger mer enn antatt investeringskostnad. Selv om det er usikkerheter knyttet til investeringskostnad og årlige energipriser er det stor sannsynlighet for at tiltaket er lønnsomt.

### 6.4 Resultater og analyse tiltak 4 – VAV

I tiltak 4 er VAV med CO<sub>2</sub>- og temperaturkontroll testet i alle soner. Maksimum settpunkt for CO<sub>2</sub>-konsentrasjon er satt til 800 ppm i alle soner og minimum og maksimum temperatur er henholdsvis 21°C og 22 °C. Samtidig ble operasjon av vifter endret slik at alle soner har ventilasjon som kun står på mellom 6 og 18. I dette delkapittelet vil energi og effekt, inneklimate, klimafotavtrykk og lønnsomhet bli presentert for tiltak 4 – VAV.

#### 6.4.1 Energi og effekt – tiltak 4

Ved implementering av VAV i alle soner og endring av driftstid er det forventet at levert luftmengde reduseres. Dette vil igjen redusere levert vifteeffekt og oppvarmingsbehovet til tilluft. Det er også forventet at den reduserte luftmengden vil bidra til mindre varmetap i sonene, og resultere i at radiatorene ikke trenger å levere like mye varme som i referansebygget. Det er derfor forventet at både energi- og effektbehovet vil redusere ved innføring av tiltak 4. Resultater for elektrisitetsforbruk, fjernvarmeforbruk, maksimum levert effekt til elektrisitet og fjernvarme og brukstid for fjernvarme er presentert i Tabell 6.10.

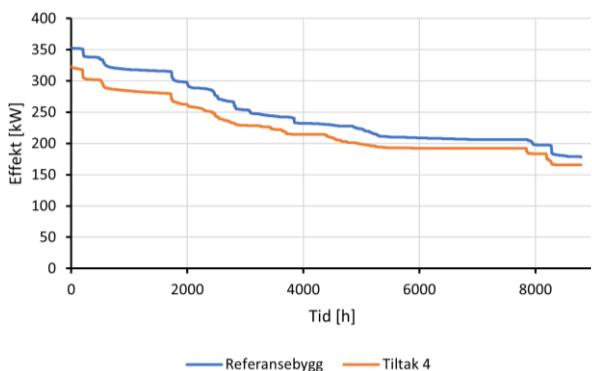
Tabell 6.10: Energi og effekt for tiltak 4.

	<b>Elektrisitetsforbruk [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Fjernvarmeforbruk [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Maks effekt EL [kW]</b>	<b>Maks effekt FV [kW]</b>	<b>Brukstid FV [h]</b>
Tiltak 4	274,3	49,0	323,6	245,1	1431
Differanse fra referansebygg	-9,3 %	-59,6 %	-8,5 %	-53,3 %	-13,7 %

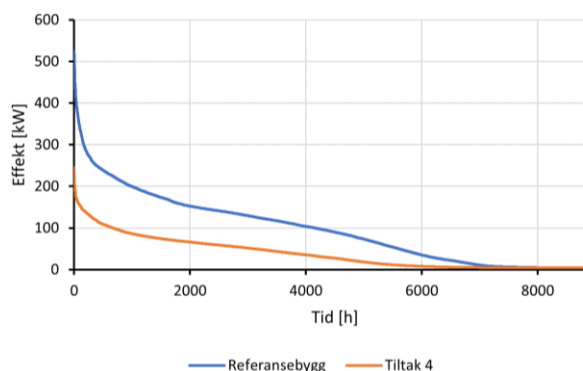


## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

Tabell 6.10 viser at det er en stor reduksjon i energi og effektforbruk etter innføring av VAV. Det er spesielt energiforbruket og maksimum effektuttak knyttet til fjernvarme som er drastisk redusert med henholdsvis 59,6 % og 53,3 %. I Figur 6.36 og Figur 6.37 er denne reduksjonen illustrert i form av varighetskurver før og etter tiltaket, både for elektrisitet og fjernvarme.

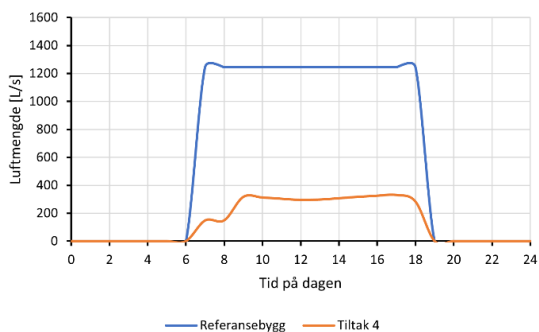


Figur 6.36: Varighetskurve EL tiltak 4.

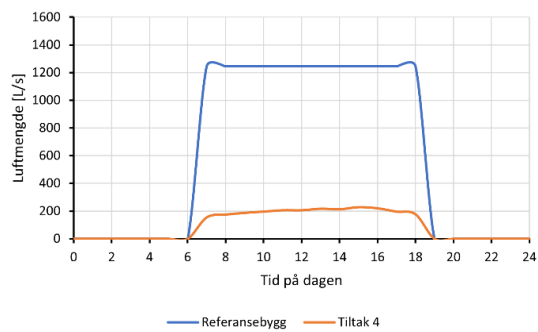


Figur 6.37: Varighetskurve FV tiltak 4.

Figur 6.36 og Figur 6.37 viser tydelig at varighetskurven til tiltak 4 ligger lavere enn referansebygget for elektrisitet og fjernvarme. Varighetskurvene følger samme trend som tidligere og det er en jevn reduksjon av levert effekt i løpet av året. For å kunne bekrefte hvorfor energi- og effektbehovet reduseres er det essensielt å analysere luftmengden som tilføres bygget før og etter tiltaket. I Figur 6.38 og Figur 6.39 presenteres levert luftmengde i kontor 4 for henholdsvis 27. januar og 25. mai.



Figur 6.38: Levert luftmengde kontor 4, 27. jan tiltak 4.

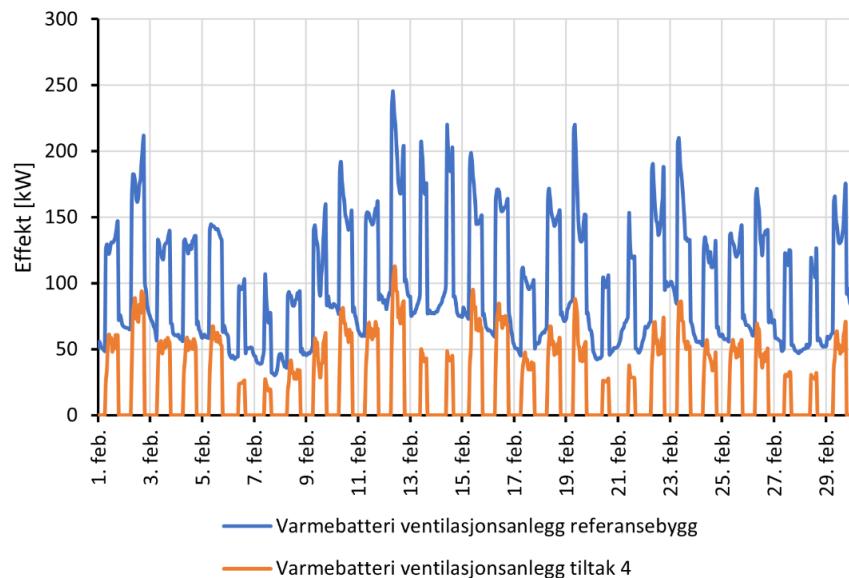


Figur 6.39: Levert luftmengde kontor 4, 25. mai tiltak 4.

I kontor 4 er det en drastisk reduksjon i levert luftmengde, hvor referansebygget leverte over 1200 L/s og tiltak 4 leverer rundt 200 og 300 L/s, avhengig av tid på året. Dette er illustrert i Figur 6.38

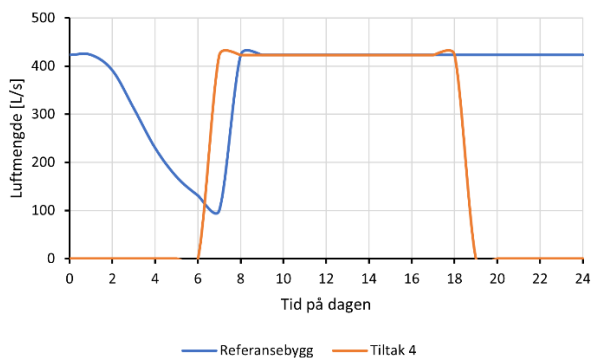
## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

og Figur 6.39. Reduksjonen i luftmengde resulterer i at viftene i ventilasjonsanlegget transporterer mindre luft, og det er derfor reduksjon i effekt og energi knyttet til elektrisitet. Når mindre luft tilføres sonen er det også mindre kjølig uteluft som må varmes opp og fjernvarmebehovet reduseres. Dette illustreres i Figur 6.40, hvor levert effekt til varmebatteriet i ventilasjonsanlegget presenteres, før og etter tiltak 3.

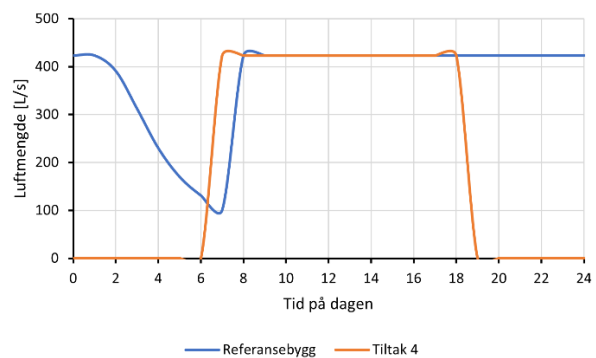


Figur 6.40: Levert effekt til varmebatteri i ventilasjonsaggregat i februar tiltak 4.

Total levert effekt til varmebatteriet er betydelig redusert, som vist i Figur 6.40. Maksimum levert effekt til varmebatteriet etter tiltak 4 er like lave som minimum levert effekt for referansebygget. Det er likevel ikke slik at alle soner har bidratt like mye til denne reduksjonen som kontor. I Figur 6.41 og Figur 6.42 presenteres endring i levert luftmengde i forelesning 1, for henholdsvis 27. januar og 25. mai.



Figur 6.41: Levert luftmengde forelesning 1, 27. jan tiltak 4.

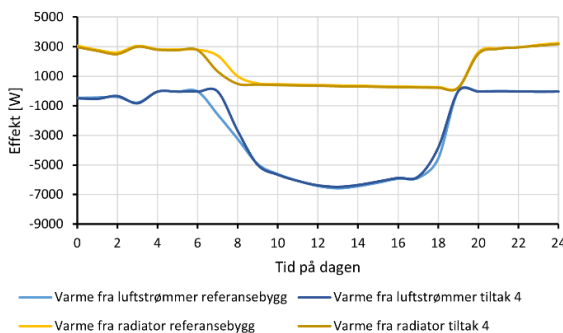


Figur 6.42: Levert luftmengde forelesning 1, 25. mai tiltak 4.

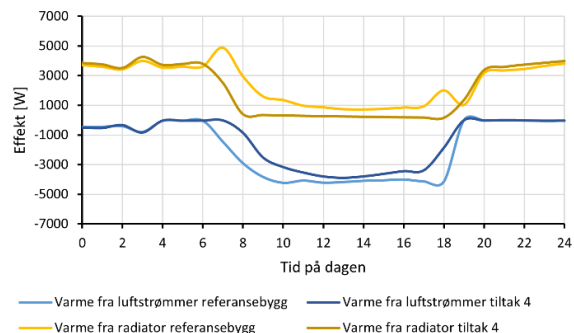
## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

Figur 6.41 og Figur 6.42 viser at VAV ikke har hatt samme innvirkning på luftmengden i forelesning som i kontor. I forelesning har luftmengden kun blitt redusert utenfor driftstid, fordi ventilasjonen da er skrudd av. Luftmengden som leveres på dagen er tilsvarende helt lik før og etter tiltaket og er på 423 L/s, som tilsvarer 6 L/s per kvadratmeter. Dette er maksimum tillatt levert luftmengde i sonen. Inneklima i forelesning før tiltaket var preget av høye temperaturer og høye CO<sub>2</sub>-konsentrasjoner. Samtidig var total levert luftmengde i løpet av dagen større, og det kan derfor forventes at inneklima har blitt verre. Det er spart energi ved å innføre VAV i forelesning, men det har mest sannsynlig hatt negativt innvirkning på inneklima. Dette vil bli analysert videre i delkapittel 6.4.2.

I tillegg til reduksjon i levert energi til oppvarming av luft er det forventet mindre varmetap fra luftstrømmer i sonene når luftmengden reduseres. Dette kan resultere i at radiatorene leverer mindre varme og dermed reduserer fjernvarmeforbruket ytterligere. For å se nærmere på om dette er tilfellet presenteres varme fra luftstrømmer og radiator 27. januar for kontor 1 og kontor 4, i henholdsvis Figur 6.43 og Figur 6.44.



Figur 6.43: Varme fra radiator og luftstrømmer i kontor 1, 27. jan tiltak 4.

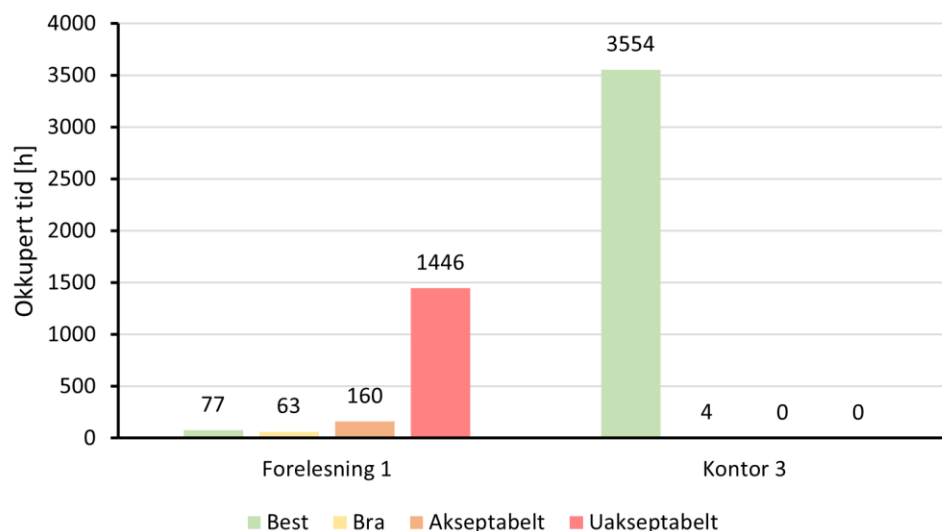


Figur 6.44: Varme fra radiator og luftstrømmer i kontor 4, 27. jan tiltak 4.

Leverte varme fra luftstrømmer og radiator i Figur 6.43 og Figur 6.44 viser som forventet at det er redusert varmetap fra luftstrømmer og redusert varmegevinst fra radiator. I kontor 1 er ikke denne reduksjonen veldig stor, men i kontor 4 er det en betydelig forskjell fra referansebygget og tiltak 4. Både levert energi og maksimum effekttopp i løpet av dagen er redusert, men utenfor arbeidstid er det liten endring i levert luftmengde og derfor også liten endring i levert varme fra radiator. Det kan konkluderes med at det reduserte energi- og effektforbruket skyldes både reduksjon i oppvarming av tilluft og reduksjon i levert effekt fra radiator.

### 6.4.2 Inneklima – tiltak 4

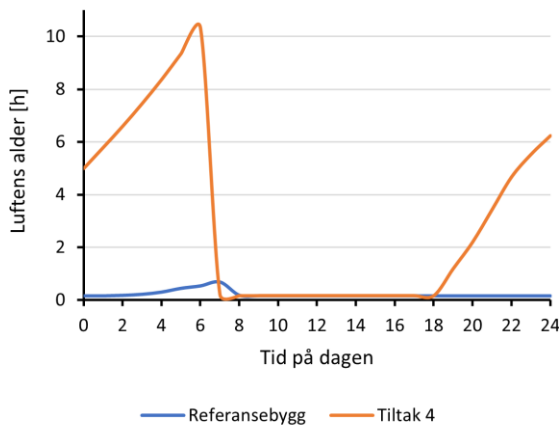
Ved implementering av VAV ønskes det å opprettholde et godt inneklima samtidig som man sparer energi. Det ønskes nå å undersøke om inneklima er forbedret eller uendret. I Figur 6.45 presenteres termisk inneklima med adaptiv komfortmodell for forelesning 1 og kontor 3.



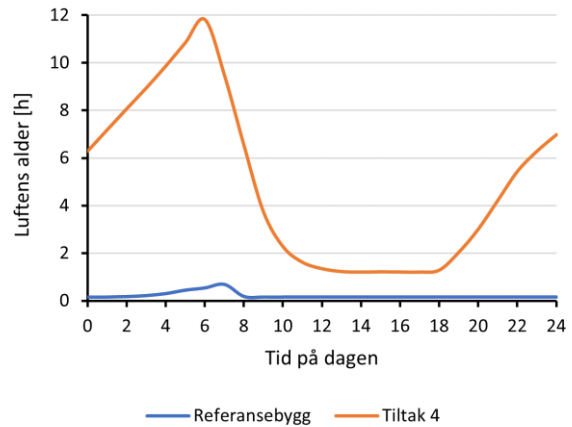
Figur 6.45: Adaptiv komfortmodell for forelesning 1 og kontor 3 - tiltak 4.

I Figur 6.45 kommer det frem at termisk komfort i forelesning er forverret. Antall timer i kategorien best er redusert fra 421 til 77 timer, og antall timer i kategorien uakseptabelt er økt fra 1038 til 1446 timer. Dette er fordi ventilasjonen ikke står på før klokken 06 og etter klokken 18, med unntak fra referansebygget hvor ventilasjonen står på hele tiden. Da leveres heller ikke like høye luftmengder utenfor driftstid og rommet blir ikke kjølt ned når det ikke er i bruk. Figuren viser at kontor 3 har veldig bra termisk komfort med 3554 timer i kategorien «best», som er en økning på 15 timer fra referansebygget. De reduserte luftmengdene fører til redusert fare for termisk ubehag grunnet trekk. Etersom luftmengdene, samt driftstid til viftene er endret, vil luftens alder bli påvirket. I Figur 6.46 og Figur 6.47 presenteres luftens alder for henholdsvis forelesning 1 og kontor 4, 27. januar, både før og etter innføring av tiltak 4.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

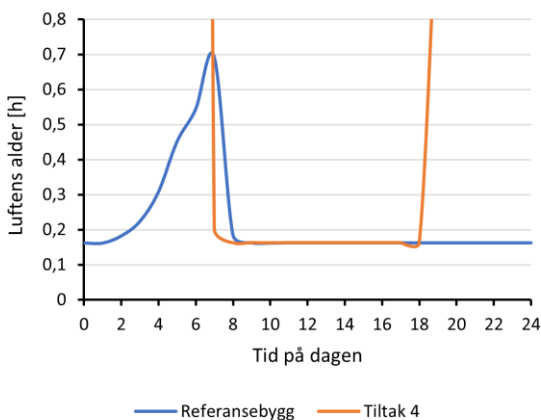


Figur 6.46: Luftens alder i forelesning 1, 27. jan tiltak 4.

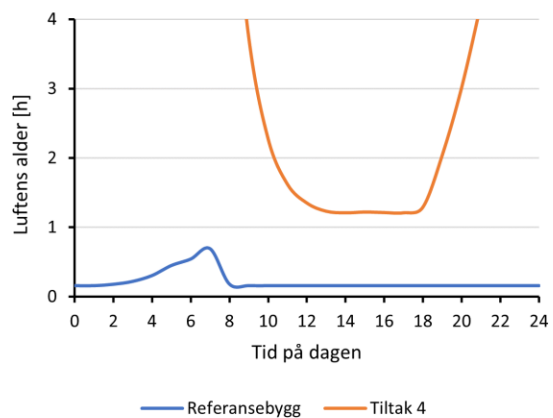


Figur 6.47: Luftens alder i kontor 4, 27. jan tiltak 4.

Figur 6.46 og Figur 6.47 viser at det er en tydelig økning i luftens alder utenfor driftstid for både forelesning og kontor. Innenfor driftstid, når ventilasjonen står på, ser det ut som luftens alder i forelesning er relativt lik før og etter innføringen av VAV. Dette er ikke tilfellet for kontorsonen, hvor luftalderen er høyere etter innføring av VAV. Dette illustreres bedre i Figur 6.48 og Figur 6.49, hvor diagramområdet til Figur 6.46 og Figur 6.47 er begrenset for å vise luftens alder for tiltak 4 innenfor driftstid.



Figur 6.48: Luftens alder i forelesning 1, begrenset til verdier innenfor driftstid, 27. jan tiltak 4.

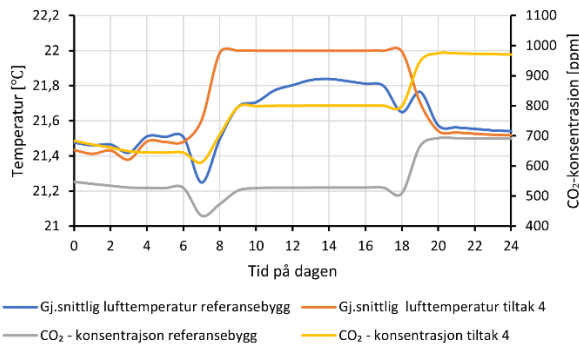


Figur 6.49: Luftens alder i kontor 4, begrenset til verdier innenfor driftstid, 27. jan tiltak 4.

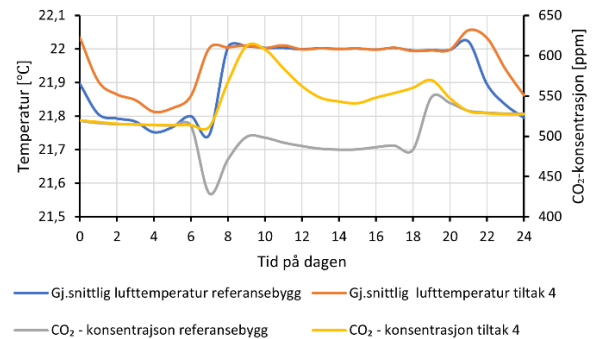
Luftens alder i Figur 6.48 reduseres hyppig når ventilasjonssystemet blir satt på. Dette er grunnet de høye temperaturene og CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i rommet, som gjør at maksimum luftmengde tilføres hele tiden. Som nevnt er det ikke behov for like høy luftmengde i kontorsonen for å holde

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

temperatur- og CO<sub>2</sub>-nivået innenfor akseptable grenser. Dette resulterer i at luftens alder øker, som er vist i Figur 6.49. Selv om luftens alder er høy betyr det ikke at kvaliteten på luften i rommet er dårlig, og det må undersøkes nærmere både CO<sub>2</sub>-nivå og temperatur i sonene. I Figur 6.50 og Figur 6.51 presenteres CO<sub>2</sub>-konsentrasjon og gjennomsnittlig lufttemperatur i kontor 4, for henholdsvis 27. januar og 25. mai.



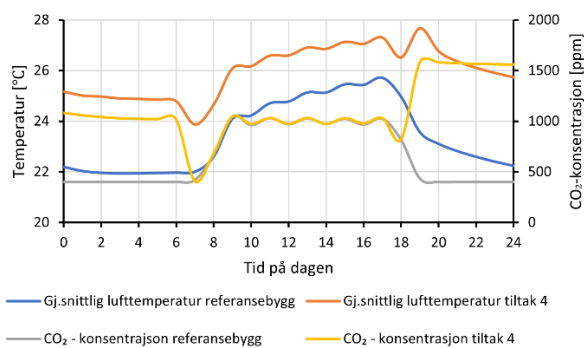
Figur 6.50: Gjennomsnittlig lufttemperatur og CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i kontor 4, 27. jan tiltak 4.



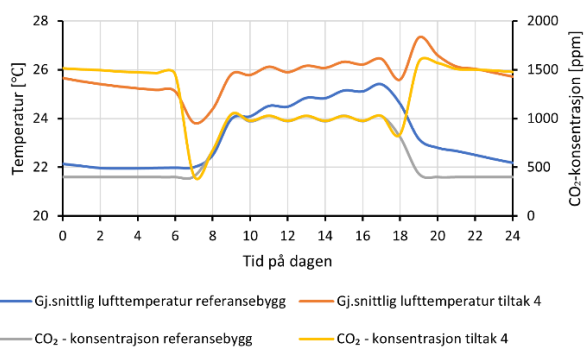
Figur 6.51: Gjennomsnittlig lufttemperatur og CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i kontor 4, 25. mai tiltak 4.

Figur 6.50 viser at både temperaturen og CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i rommet har økt i januar. Når kontoret er i bruk er begge parameterne på sitt maksimum settpunkt på 22 °C og 800 ppm. Det betyr at tilført luftmengde reguleres etter både temperatur- og CO<sub>2</sub>-nivået i rommet. Dette er ikke tilfellet for mai hvor CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen er mellom 500 og 600 ppm, og temperaturen er hele tiden 22 °C, som vist i Figur 6.51. Derfor er levert luftmengde hovedsakelig styrt etter temperatur. Temperaturen i kontor er tilsvarende lik i driftstid for tiltak 4 og referansebygget, men CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen har økt. Økningen i CO<sub>2</sub>-nivået er grunnet redusert luftmengde. I mai er det også mulig at vinduer åpnes og kan påvirke at temperaturen holdes under settpunkt for kjøling, selv om tilført luftmengde er redusert. I Figur 6.52 og Figur 6.53 presenteres CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen og gjennomsnittlig lufttemperatur i forelesning 1, for henholdsvis 27. januar og 25. mai.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5



Figur 6.52: Gjennomsnittlig lufttemperatur og CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i forelesning 1, 27. jan tiltak 4.

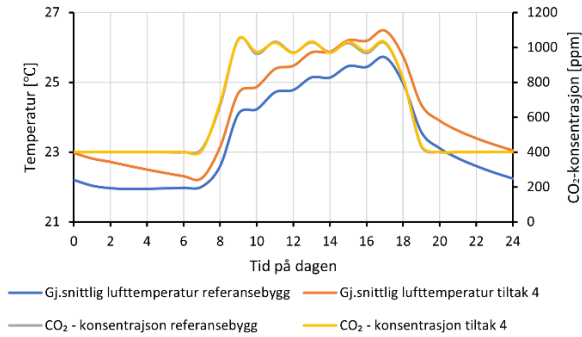


Figur 6.53: Gjennomsnittlig lufttemperatur og CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i forelesning 1, 25. mai tiltak 4.

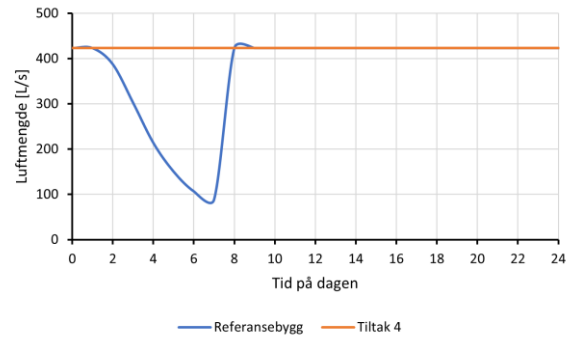
Figur 6.52 og Figur 6.53 presenterer at inn klima i forelesning ikke er tilstrekkelig. Gjennomsnittlig lufttemperatur og CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i rommet er over maksimum sett punkt, både i januar og mai. Gjennomsnittlig lufttemperatur har økt fra rundt 24 °C til 26 °C innenfor driftstid og CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen er 1000 ppm, likt som for referansebygget. Den største forskjellen fra referansebygget og innføring av tiltak 4 ligger likevel utenfor driftstid. Tidligere, da ventilasjonen sto på hele tiden, klarte tilluften å både kjøle ned rommet og senke CO<sub>2</sub>-nivået når rommet ikke var okkupert. Dette er ikke lenger tilfellet etter driftstiden er endret, og inn klima er forverret. Ettersom det leveres maksimum tillatt luftmengde når ventilasjonen er på i forelesning, er det ikke mulig å forbedre inn klima uten å gjøre endringer på driftstid eller maksimum tilført luftmengde. Å øke luftmengden vil ikke være aktuelt, da dette krever en større utskiftning av kanalnett.

En oppdatert modell ble simulert, hvor ventilasjonen i forelesningen sto på hele tiden og maksimum CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i sonen ble satt til 500 ppm. Det var ønsket at denne endringen tillot ventilasjonen å kjøle forelesningssonen på kvelden, og dermed forbedre inn klima. Gjennomsnittlig lufttemperatur og CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i forelesning 1, 27. januar, presenteres i Figur 6.54. Levert luftmengde i forelesning presenteres i Figur 6.55 for samme dag.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5



Figur 6.54: Gjennomsnittlig lufttemperatur og CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i forelesning 1, 27. jan tiltak 4.



Figur 6.55: Levert luftmengde forelesning 4, 27. jan tiltak 4.

Figur 6.54 viser at gjennomsnittlig lufttemperatur er redusert, men fortsatt høyere enn for referansebygget. CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen er tilnærmet uendret. Figur 6.55 viser at levert luftmengde er på maksimum hele tiden, og det leveres derfor totalt mer luft enn i referansebygget. Grunnen til den økte temperaturen i forelesning er derfor de reduserte luftmengdene i omliggende soner. At levert luftmengde alltid er på maksimum, er ikke energieffektivt. Det er også usikkerheter knyttet til resultatene for inneklimate i forelesning, og det er gode muligheter for at inneklimate er bedre enn presentert her. Dette blir som nevnt videre diskutert i kapittel 8.1.

Det er både fordeler og ulemper med å ha ventilasjonssystemet på hele tiden, eller la det stå på fra 06 til 18. Ettersom alle soner, med unntak av forelesning, klarer å opprettholde et godt inneklimate ved at ventilasjonen står på kun i driftstid, vil det være unødvendig å ha ventilasjonen på hele tiden. Det er også stor sannsynlighet for at inneklimate i forelesning er bedre enn resultatene viser. Ulempen med å begrense driftstid er at det i virkeligheten kan være soner som er okkupert når som helst, og inneklimate kan da være uakseptabelt. Dersom ventilasjonen er på hele tiden vil det brukes unødvendig energi for å holde temperatur og CO<sub>2</sub>-nivåene på et akseptabelt nivå, selv når det ikke er noen til stede. En løsning på dette kan være å innføre bevegelsessensorer i sonene som kan kontrollere om de er i bruk eller ikke, og tilføre frisk luft kun når det er nødvendig. For videre analyse av klimagass og lønnsomhet velges det å fortsette med det opprinnelige tiltaket med VAV i alle soner og driftstid fra 06 til 18.



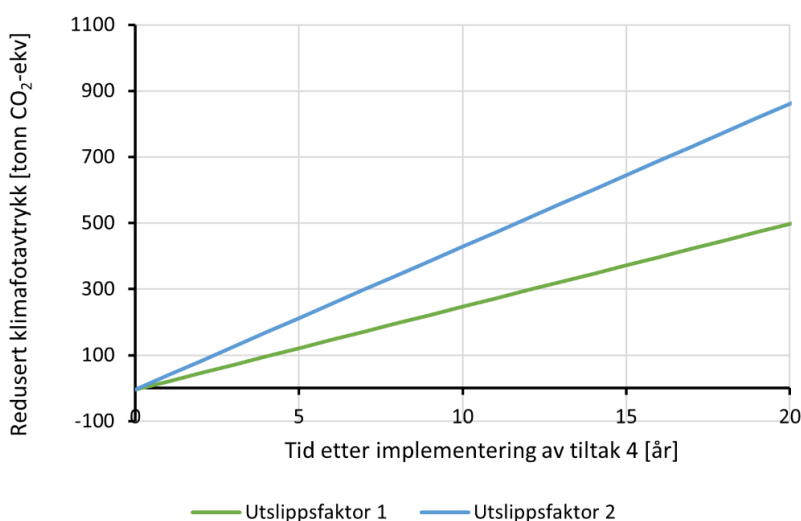
### 6.4.3 Klimafotavtrykk – tiltak 4

I Tabell 6.11 presenteres iboende utslipp og årlig utslipp fra fjernvarme og elektrisitet for tiltak 4, samt totalt utslipp og årlig utslippsbesparelse. Alle utslipp er presentert som CO<sub>2</sub>-ekvivalenter.

Tabell 6.11: Årlig klimafotavtrykk fra energibruk og iboende utslipp for tiltak 4.

Utslippsfaktor	Iboende utslipp [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Utslipp FV [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Utslipp EL [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Totalt årlig utslipp [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Årlig utslippsbesparelse [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
1	4 500	15 646	19 638	35 284	25 104
2	4 500	15 646	196 377	212 023	43 274

Fra Tabell 6.11 kommer det frem at de årlige besparelsene for de to utslippsfaktorene er 25 104 kg CO<sub>2</sub>-ekv og 43 274 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Utslippsfaktor 1 har derfor en årlig besparelse på cirka 42 % mindre enn utslippsfaktor 2. Dette er grunnet de ulike utslippsfaktorene for elektrisitet, og at tiltak 4 har en relativt stor innvirkning på elektrisitetsforbruket. De iboende utslippene er rundt 18 % og 10 % av de årlige besparelsene for de to utslippsfaktorene. Det er likevel viktig å se på de iboende utslippene i samsvar med totale utslippsbesparelser i løpet av hele levetiden til tiltaket. I Figur 6.56 presenteres utslippsbesparelsen som funksjon av tiden som er gått etter implementering av tiltaket.



Figur 6.56: Redusert klimafotavtrykk etter implementering av tiltak 4.

Grafene i Figur 6.56 illustrerer at de iboende utslippene er minimale i forhold til de totale utslippsbesparelsene i bruksfasen, og tiltaket gir totalt et høyt redusert klimafotavtrykk. For utslippsfaktor 1 havner det totale reduserte utslippet ved endt levetid på rundt 500 tonn CO<sub>2</sub>-ekv,

og for utslippsfaktor 2 havner det på rundt 900 tonn CO<sub>2</sub>-ekv. Utslippsfaktoren som benyttes har derfor betydelig påvirkning på det totale reduserte klimagassutslippet. Uavhengig av utslippsfaktor, reduseres likevel det totale klimafotavtrykket til bygget.

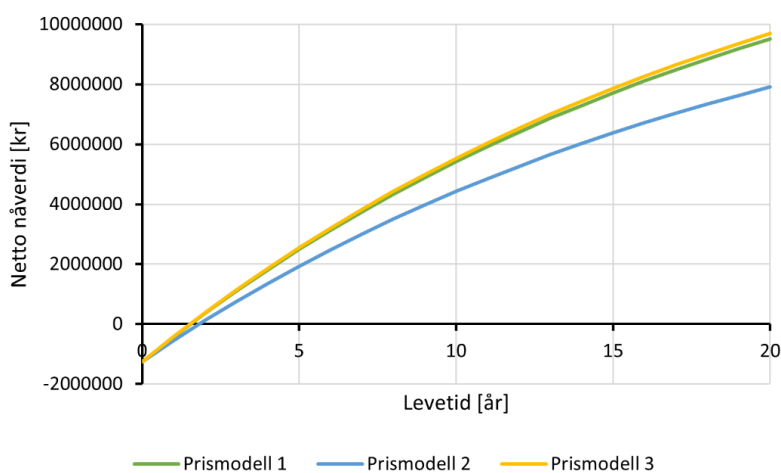
#### 6.4.4 Lønnsomhet – tiltak 4

I Tabell 6.12 presenteres parametere brukt i beregning av lønnsomhet, samt resultat for tilbakebetalingstid og netto nåverdi. I tabellen presenteres alle tre prismodeller.

Tabell 6.12: Lønnsomhetsanalyse for tiltak 4.

Pris-modell	Investerings-kostnad [kr]	Årlig energipris [kr]	Årlige besparelser [kr]	Levetid [år]	Tilbakebetalings-tid [år]	Netto nåverdi [kr]
1	1 250 000	2 777 483	863 400	20	1,54	9 509 866
2	1 250 000	2 608 185	734 582	20	1,82	7 904 509
3	1 250 000	3 071 815	877 766	20	1,51	9 688 899

Tabell 6.12 viser at alle prismodellene har en positiv netto nåverdi og en lav tilbakebetalingstid på under 5 år. Netto nåverdien er høyest og tilbakebetalingstiden er lavest for prismodell 3, etterfulgt av prismodell 1 og til slutt prismodell 2. Dette er fordi prismodell 3 både har høy energipris og inkluderer et effektledd og har derfor de høyeste energikostnadene. Prismodell 1 har veldig lik nettonåverdi og tilbakebetalingstid som prismodell 3. Dette viser at effektprisen ikke har stor innvirkning på beregnet netto nåverdi. I Figur 6.57 presenteres netto nåverdi som funksjon av levetid for alle tre prismodeller.



Figur 6.57: Netto nåverdi som funksjon av levetid for tiltak 4.

Figur 6.57 illustrerer den lave tilbakebetalingstiden og høye netto nåverdier til tiltak 4. Prismodell 1 og prismodell 3 er veldig like, grafen for prismodell 2 ligger noe lavere i diagramområdet. Det er beregnet at investeringskostnaden kan være 3 738 068 kr, 3 180 354 kr og 3 800 265 kr for henholdsvis prismodell 1,2 og 3, dersom tilbakebetalingstiden skal være 5 år. Dette er rundt tre ganger så mye som antatt investeringskostnad, som igjen understreker hvor lønnsomt tiltaket er.

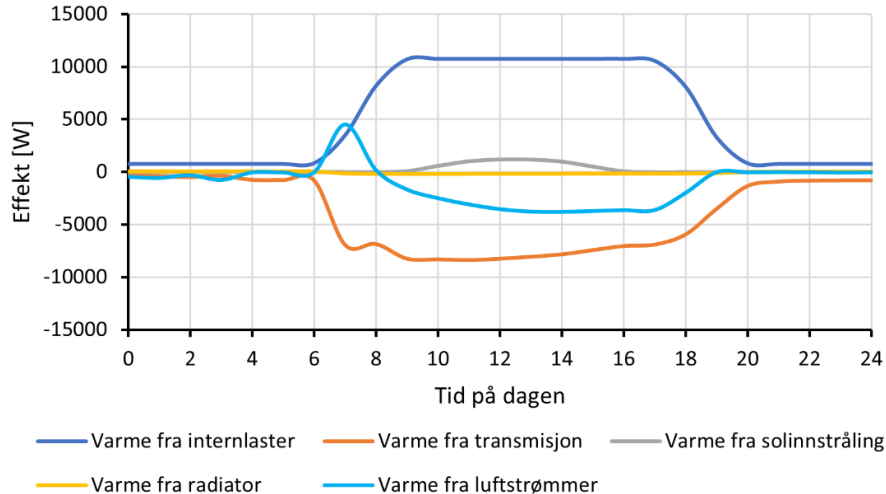
### **6.5 Resultater tiltak 5 – Delvis oppvarming via ventilasjon**

I tiltak 5 testes det om oppvarmingsbehovet reduseres ved å øke tilluftstemperaturen slik at ventilasjon delvis står for oppvarming. Økt tilluftstemperatur vil redusere levert effekt til radiatorene, uten å eliminere radiatorene helt.

Da tiltak 5 ble testet i IDA ICE ble det først forsøkt å sette et eget temperatursettpunkt for radiatorene. Dette ble gjort ved å lage en ny regulator for alle radiatorer i bygget. Regulatoren var PI-kontrollert og signaliserte at radiatoren skulle levere varme for å opprettholde et gitt settpunkt i rommet. Det ble testet settpunkttemperaturer mellom 17 °C og 20 °C. Samtidig ble tilluftstemperaturen økt til mellom 20 °C og 26 °C og VAV med temperatur- og CO<sub>2</sub> kontroll ble implementert i alle soner. Med dette var det ønskelig at radiatoren skulle varme opp rommet til gitt settpunkt på mellom 17 °C og 20 °C, og la tilluft stå for resten av oppvarmingen.

Forsøket viste seg å ikke være gunstig. Det ble for kaldt i mange rom og maksimum levert effekt fra fjernvarme økte betraktelig. Det viste seg at radiatorene aldri leverte varme med mindre temperaturen i rommet ble lavere enn settpunktet satt for den nye regulatoren. De høye tilluftstemperaturene klarte som regel å opprettholde temperaturen i rommet over settpunkt for radiator, men leverte ikke nok varme til å opprettholde virkelig settpunkttemperatur i sonene. I Figur 6.58 presenteres varmebalanse fra kontor 1 27. Januar.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

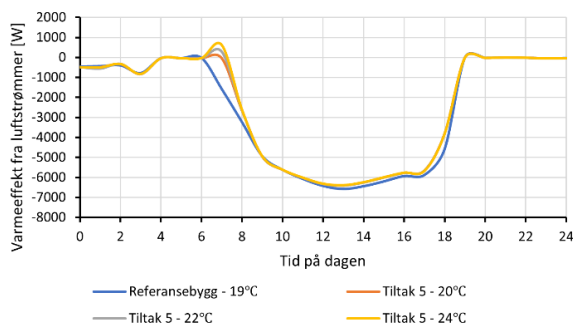


Figur 6.58: Varmebalanse i kontor 1, 27. jan tiltak 5.

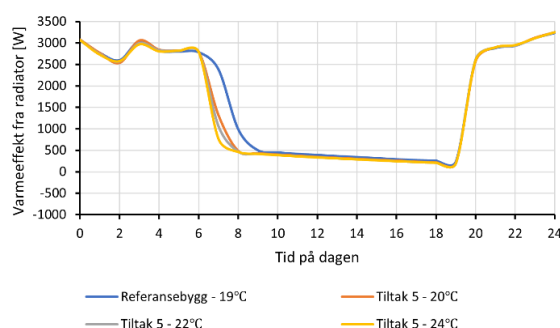
Varmebalansen i Figur 6.58 bekrefter at radiatorene leverer tilsvarende null varme, samtidig som varme fra luftstrømmer står for mye mindre varmetap enn tidligere. Den høye effekttoppen fra varme fra luftstrømmer på starten av arbeidsdagen illustrerer hvorfor maksimum levert effekt har økt. Tiltaket reduserte fjernvarmeforbruket, men det er ikke tilstrekkelig så lenge det ikke klarer å opprettholde settpunkttemperatur i sonen.

Videre ble det testet å ikke gjøre noen endringer på radiatorene, men heller gjøre det mulig for tilluftstemperaturen å øke. VAV med temperatur- og CO<sub>2</sub>-kontroll ble innført i alle rom og tilluftstemperaturen ble økt fra maksimum 19 °C til maksimum 20 °C, 22 °C og 24 °C. Dette ble ikke gjort i forelesning, hvor oppvarmingsbehovet fra radiator er tilsvarende null. Det viste seg at IDA ICE først og fremst benytter seg av radiatorene for oppvarming, og VAV-styringen klarte ikke selv å øke tilluftstemperaturen med mindre radiatorene ikke leverte nok varme. I Figur 6.59 og Figur 6.60 presenteres levert varmeeffekt fra henholdsvis radiator og luftstrømmer for de ulike tilluftstemperaturene.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5



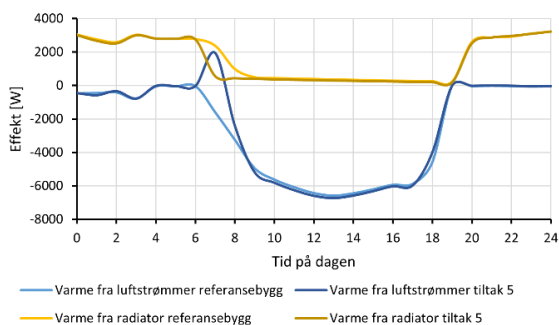
Figur 6.59: Varmeeffekt fra luftstrømmer i kontor 1, 27. jan tiltak 5.



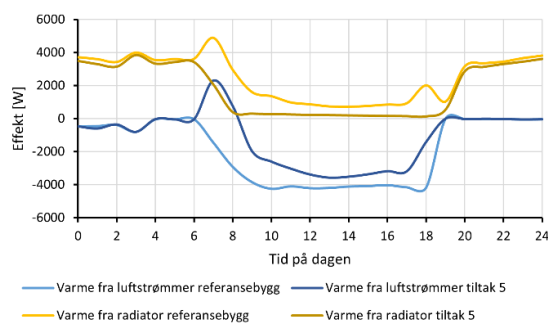
Figur 6.60: Varmeeffekt fra radiator i kontor 1, 27. jan tiltak 5.

Figur 6.59 og Figur 6.60 viser at både varmetap fra luftstrømmer og varmegevinst fra radiator er relativt likt for referansebygget og alle versjonene av tiltaket. Det betyr at forholdet mellom levert varme fra luftstrømmer og radiator fortsatt er tilsvarende likt som før, og det ikke oppnådd reduksjon av varmetap fra luftstrømmer og levert effekt til radiator. Tiltaket sparte energi, men det var kun grunnet innføring av VAV.

Til slutt ble det forsøkt å øke tilluftstemperaturen i alle soner, med unntak av forelesning, men uten å innføre VAV-styring. Det ble heller ikke gjort noen endringer på radiator. Maksimum tilluftstemperaturer på 20 °C, 22 °C og 24 °C ble testet. Varmebalanse for luftstrømmer og radiator, før og etter tiltak 5, med maksimum tilluft på 22 °C presenteres i Figur 6.61 og Figur 6.62. Varmebalansen er for henholdsvis kontor 1 og kontor 4, 27. januar.



Figur 6.61: Varme fra luftstrømmer og radiator i kontor 1, 27. jan tiltak 5.



Figur 6.62: Varme fra luftstrømmer og radiator i kontor 4, 27. jan tiltak 5.

Varmebalansen for kontor 1 i Figur 6.61 viser at store deler av dagen har liten endring i levert varme fra luftstrømmer og radiator. Hovedforskjellen er ved oppstart av ventilasjon hvor levert varme fra luftstrømmer har økt betraktelig mye, og varme fra radiator reduseres tidligere enn for

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

referansebygget. Ettersom man vet at tilluftstemperaturen er høyere for tiltaket enn for referansebygget, samtidig som varmetap og varmegevinst fra luftstrømmer og radiator er relativt likt for tiltak 5 og referansebygg, tyder det på at temperaturen er noe høyere i rommet enn før. Varmebalansen for kontor 4 i Figur 6.62 viser derimot en tydelig reduksjon i både varmetap fra luftstrømmer og varmegevinst fra radiator, noe som tyder på at tiltaket har fungert etter sin hensikt i 4.etasje. Dette er fordi det er mer varmetap fra transmisjon i 4.etasje, og det er potensiale for reduksjon i levert effekt til radiator. Resultatet for energi og effekt for tiltak 5 presenteres i Tabell 6.13.

Tabell 6.13: Energi og effekt for tiltak 5.

<b>Maks tilluftstemperatur [°C]</b>	<b>Elektrisitetsforbruk [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Fjernvarmeforbruk [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Maks effekt EL [kW]</b>	<b>Maks effekt FV [kW]</b>	<b>Brukstid FV [h]</b>
20	302,1	124,3	353,9	524,3	1697
Differanse fra referansebygg	-0,13 %	+2,5 %	+0,08 %	+0,09 %	+2,4 %
22	302,4	136,0	354,4	522,5	1863
Differanse fra referansebygg	-0,03 %	+12,1 %	+0,22 %	-0,25 %	+12,4 %
24	303,3	152,1	354,5	520,7	2091
Differanse fra referansebygg	+0,26 %	+25,4 %	+0,25 %	-0,60 %	+26,1 %

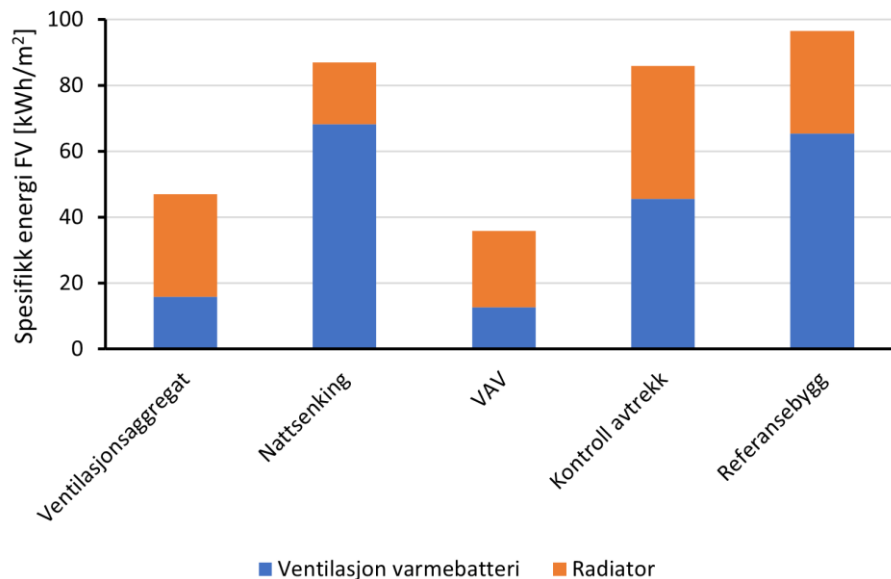
Tabell 6.13 viser at fjernvarmeforbruket øker for alle alternativene, samtidig som det er minimale endringer i maksimum levert effekt og elektrisitetsforbruket. Dette betyr at den økte energien som må til for å varme opp tilluften er høyere enn energien man sparer ved at radiatorene kan levere mindre varme. Det konkluderes derfor med at tiltaket ikke er en gunstig løsning, og det vil ikke bli gjort videre analyser av tiltak 5 - oppvarming via ventilasjon.

## 6.6 Oppsummering

I dette delkapittelet skal en oppsummering av tiltakene presenteres. I tillegg skal tiltakenes potensial for å være en del av en anbefalt tiltakspakke vurderes. Av tiltakene som er testet og presentert, resulterte omtrent alle tiltakene i energibesparelse for bygget. Unntaket er tiltak 5 – delvis oppvarming via ventilasjon, hvor energiforbruket økte. Tiltak 5 er derfor forkastet og vil ikke bli vurdert til å være en del av anbefalt tiltakspakke.

### 6.6.1 Energi og effekt – oppsummering

Alle tiltakene har påvirket fjernvarmeforbruket til bygget. Fjernvarmeforbruket går til varmebatteriet i ventilasjonsaggregatet, radiatorer og tappevann. Tiltakene påvirker ikke fjernvarmeforbruket til tappevann, og det er derfor ikke nødvendig å sammenligne levert energi til tappevann. Årlig fjernvarmeforbruk til varmebatteri og radiatorer for samtlige tiltak og referansebygget er presentert i Figur 6.63.



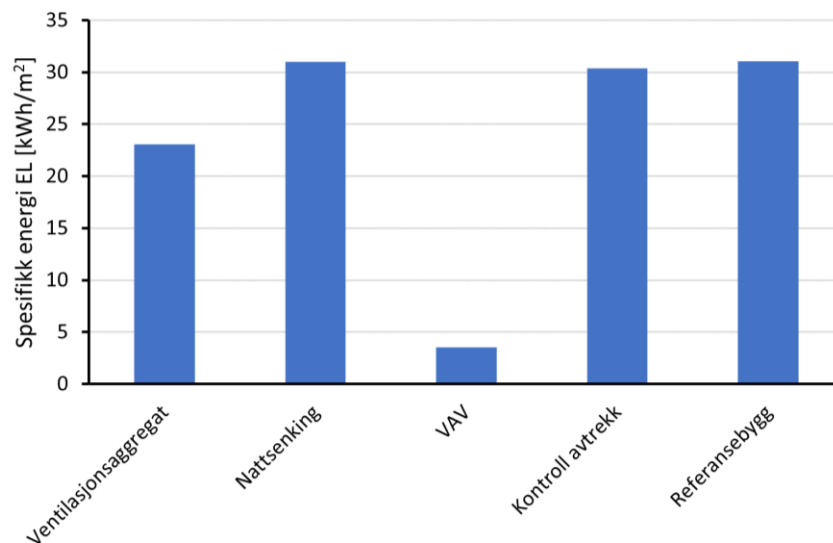
Figur 6.63: Sammenlikning av årlig fjernvarmeforbruk tiltak og referansebygg.

Som vist i Figur 6.63 medfører samtlige tiltak reduksjon i fjernvarmeforbruk sammenliknet med referansebygget. VAV har størst fjernvarmebesparelse, der særlig fjernvarmebehovet til varmebatteriet er betydelig redusert. VAV har også noe reduksjon i fjernvarmebehovet til radiatorer. Dette skyldes at ventilasjonen reguleres etter lufttemperaturen og CO<sub>2</sub>-nivået i sonene, unødvendig luft blir derfor ikke tilført. Dette fører til at varmetap fra luftstrømmer og behovet for

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

radiatorvarme reduseres. Tiltak 1 ventilasjonsaggregat har stor reduksjon i fjernvarmebehov til varmebatteriet, men radiatorene har omtrent samme fjernvarmebehov som referansebygget. Nattsenking reduserer fjernvarmebehovet til radiatorene, men siden det blir kjøligere i sonene reduseres varmegjenvinningen i ventilasjonsaggregatet, noe som øker fjernvarmebehovet til varmebatteriet. Kontroll avtrekk derimot reduserer fjernvarmeforbruket til varmebatteriet ved å regulere tilluftstemperaturen etter avtrekkstemperaturen. Generelt leveres det kjøligere luft til sonene med dette tiltaket, som fører til at radiatorene leverer mer varme enn i referansebygget.

Noen av tiltakene har ført til en reduksjon i elektrisitetsforbruk. Elektrisitetsforbruket består av belysning, utstyr, oppvarmingssystem og luftbehandling, samt kjøling. Tiltakene har kun påvirket oppvarmingssystem og luftbehandling. En sammenlikning av elektrisitetsforbruk til oppvarmingssystem og luftbehandling for tiltakene og referansebygget er presentert i Figur 6.64.



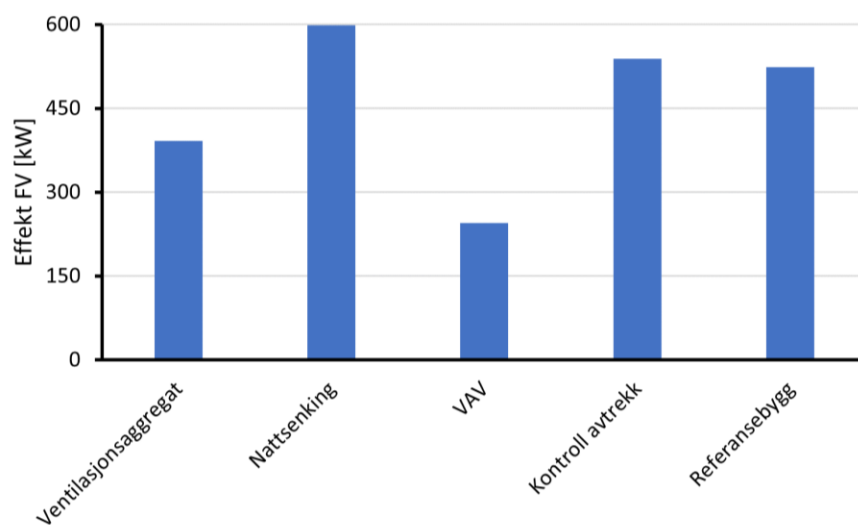
Figur 6.64: Sammenlikning av årlig elektrisitetsforbruk til oppvarmingssystem og luftbehandling tiltak og referansebygg.

Som vist i Figur 6.64 påvirker tiltakene elektrisitetsforbruket i svært varierende grad sammenliknet med referansebygget. Nattsenking og kontroll avtrekk har omtrent samme elektrisitetsforbruk som referansebygget. Dette er forventet, da tiltakene endrer settpunkttemperaturer som er direkte knyttet til fjernvarmeforbruket. Ved utskiftning av ventilasjonsaggregat ble viftevirkningsgraden økt, som reduserte elektrisitetsforbruket med 8 kWh/m<sup>2</sup>. VAV er tiltaket med størst elektrisitetsbesparelse. Denne styringsstrategien for ventilasjon medfører stor reduksjon for luftmengdene tilført i de fleste soner, som reduserer elektrisitetsforbruket til luftbehandling.



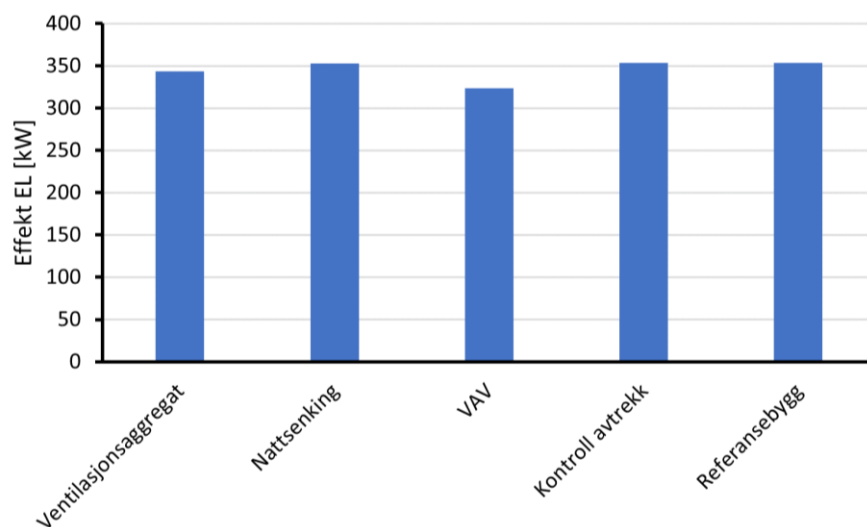
## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

Et av formålene med ved å implementere tiltak er å redusere effekttoppene til både fjernvarme og elektrisitet. En sammenlikning av maksimum effektuttak for fjernvarme i løpet av et år for tiltakene og referansebygget er presentert i Figur 6.65. En sammenlikning av maksimum effektuttak for elektrisitet i løpet av et år for tiltakene og referansebygget er presentert i Figur 6.66.



Figur 6.65: Sammenlikning av effekttopp for FV tiltak og referansebygg.

Som vist i Figur 6.65 medfører VAV og ventilasjonsaggregat reduksjon i maksimum effektuttak for fjernvarme, hvor VAV nærmest halverer effekttoppen. Nattsinking og kontroll avtrekk øker effekttoppen. Økningen er minimal for kontroll avtrekk, mens nattsinking har betydelig økning. I tillegg er det kjent at nattsinking flytter effekttoppen til ugunstig tid på døgnet. Dette er hovedproblemet med nattsinking og gjør at tiltaket mulig ikke bør anbefales for bygningskohorten.



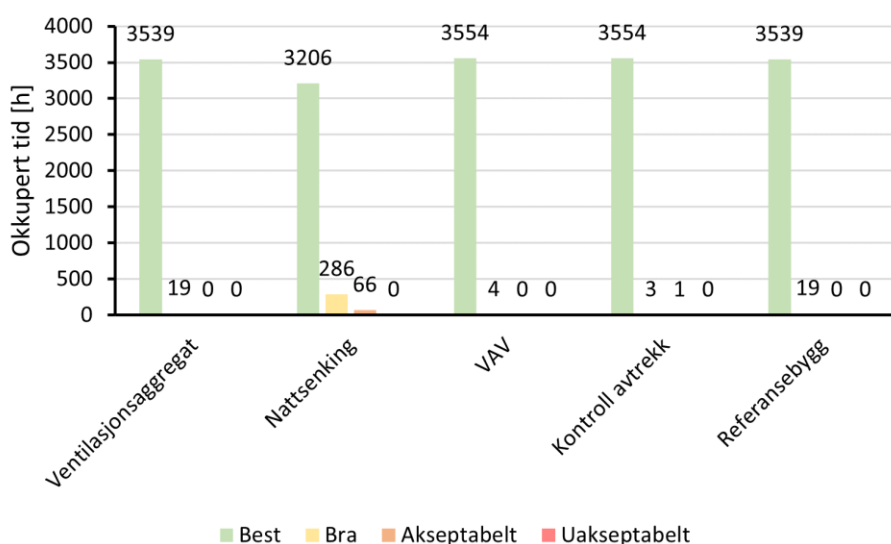
Figur 6.66: Sammenlikning av effekttopp for EL tiltak og referansebygg.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

Nattsenking og kontroll avtrekk har liten eller ingen reduksjon i maksimum effektuttak til elektrisitet sammenliknet med referansebygget, vist i Figur 6.66. Ventilasjonsaggregat og VAV har noe reduksjon i maksimum effektuttak til elektrisitet sammenliknet med referansebygget. Dette er forventet da begge tiltakene påvirker viftene i ventilasjonsaggregatet. Reduksjonen er ikke i samme størrelsesorden som reduksjonen i effekttoppen til fjernvarme, da elektrisitetsforbruket hovedsakelig består av utstyrslaster som ikke blir påvirket av tiltakene.

### 6.6.2 Inneklima – oppsummering

En viktig del av å evaluere tiltak, er å sørge for at det termiske inneklimaet helst forbedres eller uendret. En sammenlikning av termisk inneklima med adaptiv komfortmodell i kontor 3 for tiltakene og referansebygget er presentert i Figur 6.67.



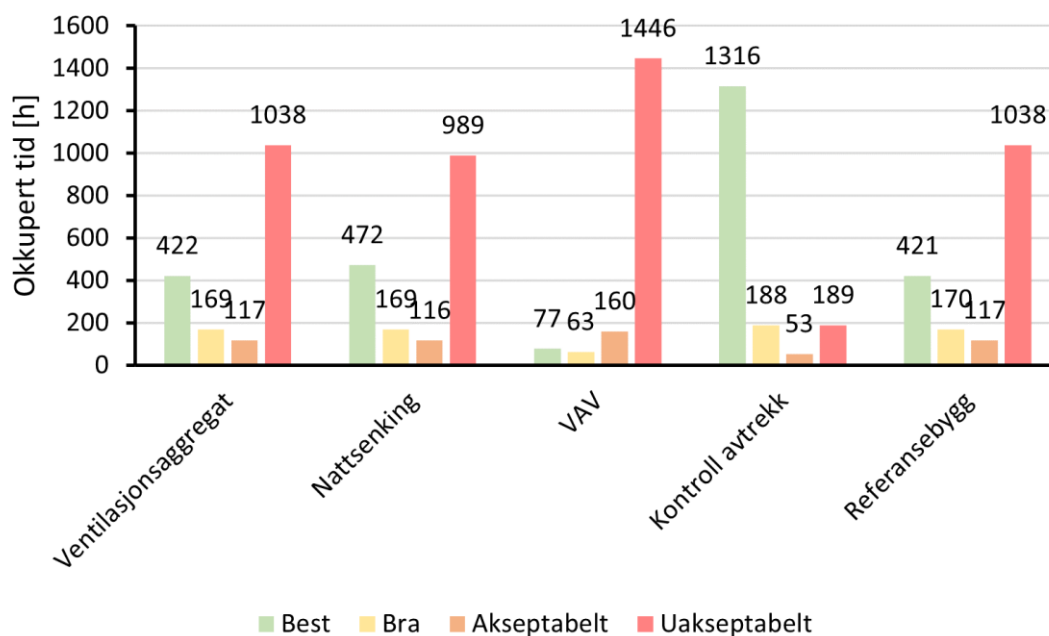
Figur 6.67: Adaptiv komfortmodell i kontor 3 tiltak og referansebygg.

Kontor 3 har et tilfredsstillende termisk inneklima ifølge adaptiv komfortmodell for samtlige tiltak og referansebygg, som vist i Figur 6.67. Det er likevel noen forskjeller etter implementering av tiltak. Nattsenking fører til at det termiske inneklimaet forverres, det blir kjøligere i begynnelsen av driftstid. VAV og kontroll avtrekk bedrer det termiske inneklimaet noe, mens ventilasjonsaggregat fører ikke til noen endring i forhold til referansebygget.

Forelesning 1 er den sonen i referansebygget med dårligst termisk inneklima. Det er noen usikkerheter rundt hvor godt sonen er modellert. Sonen har realistisk personbelastning etter

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5

gjennomsnittlig kapasitet på forelesningssaler på Gløshaugen, men volumet i forelesningssalene er ikke hensyntatt. En sammenlikning av termisk inneklimate med adaptiv komfortmodell for forelesning 1 for tiltakene og referansebygget er presentert i Figur 6.68.



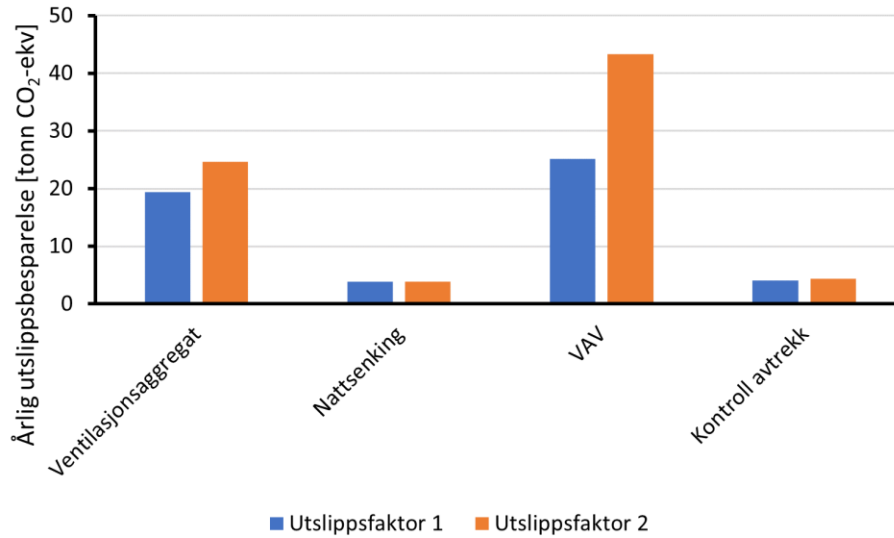
Figur 6.68: Adaptiv komfortmodell i forelesning 1 tiltak og referansebygg.

Kontroll avtrekk er det eneste tiltaket som bedrer det termiske inneklimate i forelesning 1 betydelig, dette er vist i Figur 6.68. Likevel er det 189 timer innenfor den uakseptable komfortkategorien. VAV forverrer det termiske inneklimate, mens ventilasjonsaggregat og nattsinking har liten eller ingen endring fra referansebygget. Det er ikke lagt mye vekt på tiltakenes påvirkning på det termiske inneklimate i forelesning 1, da det stilles spørsmål ved kredibiliteten til disse resultatene.

### 6.6.3 Klimafotavtrykk – oppsummering

Analysen av tiltakene avdekket at samtlige tiltak reduserer klimafotavtrykket. En sammenlikning av årlig redusert klimafotavtrykk med utslippsfaktor 1 og 2 for tiltakene er presentert i Figur 6.69.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5



Figur 6.69: Sammenlikning av redusert klimafotavtrykk for tiltak.

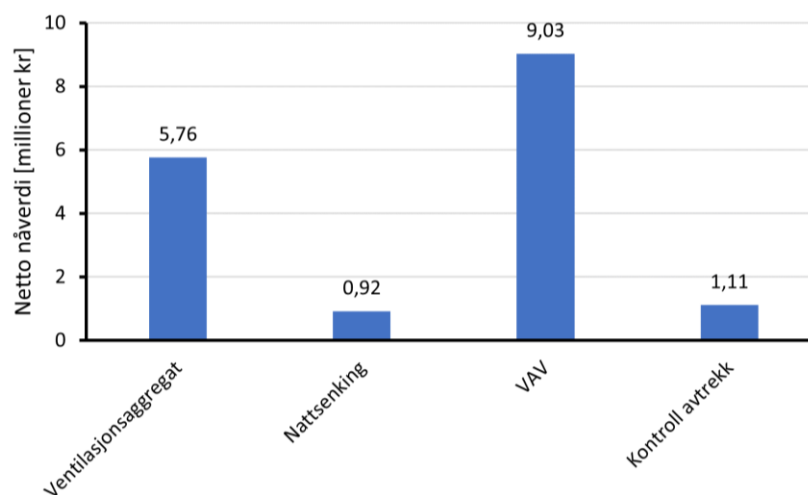
VAV har størst reduksjon i klimafotavtrykk for begge utslippsfaktorer av samtlige tiltak, som vist i Figur 6.69. Dette er et tiltak med moderat iboende utslipp, så utslippsbesparelsen gjør raskt opp for de iboende utslippene til tiltaket. Nattsenking og kontroll avtrekk har omtrent samme utslippsbesparelse, og er begge tiltak med minimale iboende utslipp. Ventilasjonsaggregatet har høye årlige utslippsbesparelser, men medfører betydelig iboende utslipp ved investering i nye ventilasjonsaggregat. Det tar derfor noen år før iboende utslipp er kompensert for med årlige utslippsbesparelser.

På bakgrunn av resultatene for alle tiltakene blir det valgt å videre anbefale tiltak 1 – ventilasjonsaggregat, tiltak 3 – kontroll avtrekk og tiltak 4 – VAV. Tiltak 2 – nattsenking blir forkastet hovedsakelig grunnet økning i maksimum effektuttak. Det er viktig å påpeke at nattsenking kunne fungert i kombinasjon med de andre tiltakene når det kommer til effektuttak, men nattsenking forverrer termisk inn klima og er derfor ikke optimalt.

Alle tiltakene som anbefales innebærer en endring i ventilasjonssystemet. Dette gir et godt utgangspunkt for å kombinere tiltakene. Det må likevel analyseres om tiltakene er lønnsomme kombinert sammen, og om det faktisk går å kombinere de.

#### 6.6.4 Lønnsomhet – oppsummering

Like viktig som at tiltakene reduserer energiforbruk og effekttopper, samt opprettholder akseptabelt innneklima, er lønnsomhet essensielt for at et tiltak skal være aktuelt. Lønnsomhet er analysert med 3 ulike prismodeller. Gjennomsnittlig netto nåverdi for de tre prismodellene for tiltakene er presentert i Figur 6.70.

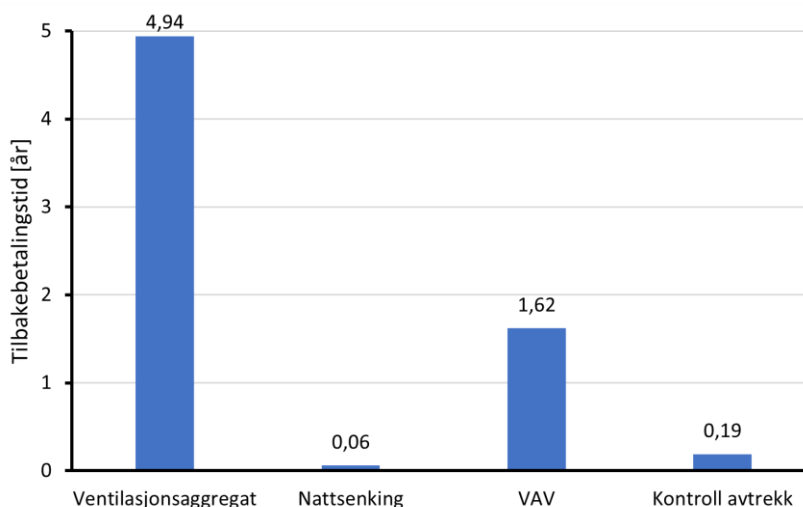


Figur 6.70: Sammenlikning av gjennomsnittlig netto nåverdi for tiltak.

Samtlige av tiltakene er lønnsomme med netto nåverdi over null kr, som vist i Figur 6.70. Netto nåverdien er proporsjonal med energibesparelsen, da høy kostnadsbesparelse fører til høy netto nåverdi. VAV har størst energibesparelse, og derfor størst gjennomsnittlig netto nåverdi. Kontroll avtrekk og nattsinking har moderat energibesparelse, men på grunn av lav investeringskostnad er tiltakene lønnsomme. Ventilasjonsaggregat har høy gjennomsnittlig netto nåverdi på omtrent 5,76 millioner kroner.

Et krav i NTNUs miljøutviklingsplan er at ENØK-tiltak med tilbakebetalingstid under 5 år som hovedregel skal implementeres. Gjennomsnittlig tilbakebetalingstid for de tre prismodellene for tiltakene er presentert i Figur 6.71.

## KAPITTEL 6: RESULTATER OG ANALYSE TILTAK 1-5



Figur 6.71: Sammenlikning av gjennomsnittlig tilbakebetalingstid for tiltak.

Som vist i Figur 6.71 har ventilasjonsaggregat størst tilbakebetalingstid på omtrent 5 år. Tiltaket har høy investeringskostnad, men med høy energibesparelse overskrider ikke tilbakebetalingstiden den øvre grensen på 5 år. Dersom dagens høye energipris blir vedvarende, kan tilbakebetalingstiden til tiltaket reduseres ytterligere. Selv om VAV har høy investeringskostnad er tilbakebetalingstiden kort med 1,62 år. Kontroll avtrekk og nattsenkning har svært lav tilbakebetalingstid på grunn av lav investeringskostnad for tiltak som ikke krever utskiftning av utstyr.

## 7 Resultater og analyse av anbefalt tiltakspakke

På bakgrunn av resultatene i kapittel 6 er en ny anbefalt tiltakspakke simulert i IDA ICE. Den anbefalte tiltakspakken består av tiltak 1 – ventilasjonsaggregat, tiltak 3 – kontroll av avtrekk og tiltak 4 – VAV. Selv om alle tiltakene i den anbefalte tiltakspakken fungerer godt når man evaluerer de individuelt, er det mulig de ikke spiller på lag når de kombineres sammen i en tiltakspakke. I dette kapittelet vil energi- og effektforbruket for den anbefalte tiltakspakken analyseres, etterfulgt av resultater for inneklimate, klimafotavtrykk og lønnsomhetsanalyse.

### 7.1 Energi og effekt – anbefalt tiltakspakke

Når forskjellige ENØK-tiltak forventes det en økning i energi- og effektbesparelser. Det er likevel ikke slik at alle reduksjonene i energi og effekt fra hvert individuelle tiltak kan adderes. Når et tiltak er innført reduseres potensiale for energi- og effektbesparelser. Da vil neste innførte tiltak ikke gi like høye besparelser som det opprinnelig hadde. Det er derfor essensielt å analysere tiltakene som en helhet før man evaluerer om de er lønnsomme sammen. I Tabell 7.1 presenteres energi, maks effektforbruk, og brukstid for fjernvarme, for den anbefalte tiltaksmodellen.

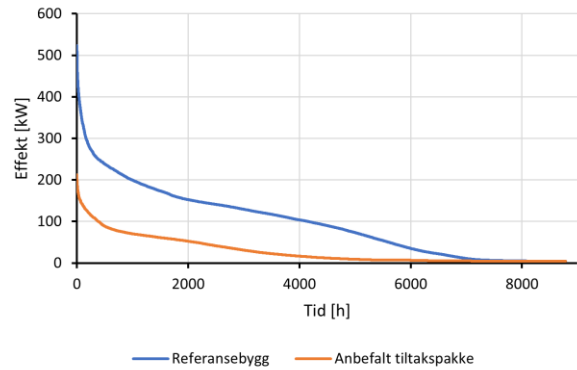
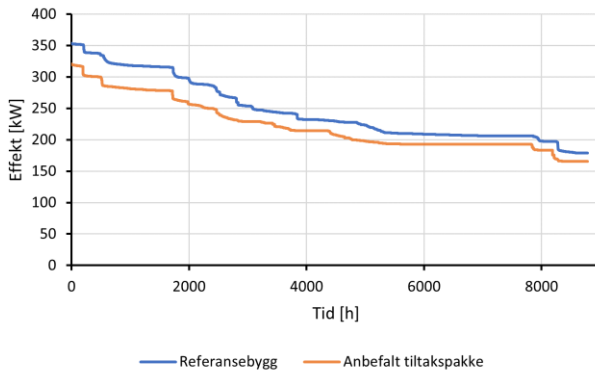
Tabell 7.1: Energi og effekt for anbefalt tiltakspakke.

	<b>Elektrisitetsforbruk [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Fjernvarmeforbruk [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Maks effekt EL [kW]</b>	<b>Maks effekt FV [kW]</b>	<b>Brukstid FV [h]</b>
Anbefalt tiltakspakke	273,0	36,5	320,6	212,9	1227
Differanse fra referansebygg	-9,8 %	-69,9 %	-9,3 %	-59,6 %	-26 %

Tabell 7.1 viser betydelige reduksjoner i energi- og effektforbruket fra referansebygget til den anbefalte tiltakspakken, både for elektrisitet og fjernvarme. Reduksjonene er tydeligst for fjernvarme, hvor energiforbruket er redusert med 69,9 % og maksimum levert effekt med 59,6 %. For elektrisitet er ikke reduksjonene like store med energibesparelser på 9,8 % og reduksjon i maksimum levert effekt på 9,3 %. Dette er grunnet det ekstremt høye elektrisitetsforbruket til utstyr i referansebygget som det ikke er mulig å gjøre noe med. Om man kun ser på de delene av elektrisitetsforbruket som det faktisk er mulig å gjøre noe med, er reduksjonen stor. Dette kommer også tydeligere frem senere i delkapittelet.

## KAPITTEL 7: RESULTATER OG ANALYSE ANBEFALT TILTAKSPAKKE

I tillegg til energi og maksimum levert effekt er også brukstiden redusert. Dette er fordi energibesparelsene er høyere enn maksimum effektbesparelser. For å få bedre oversikt over hvordan levert energi og effekt har endret seg blir varighetskurve for elektrisitet og fjernvarme presenteres i henholdsvis Figur 7.1 og Figur 7.2.



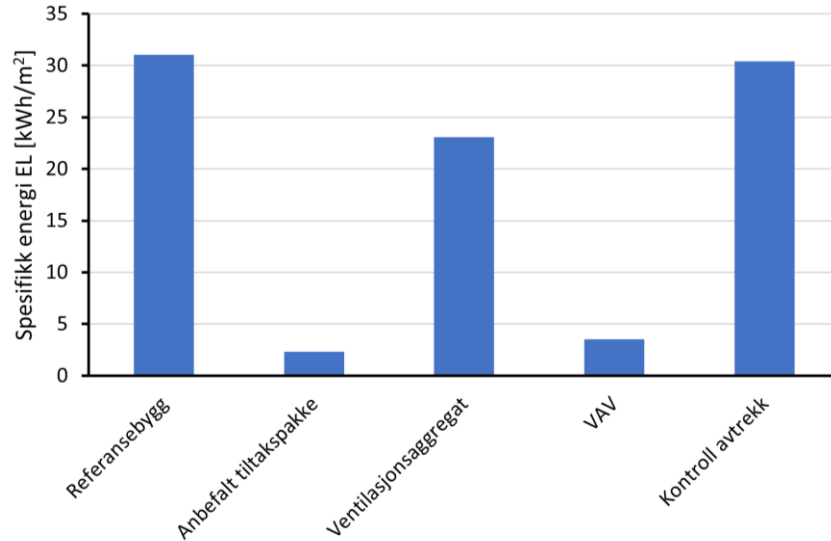
Figur 7.1: Varighetskurve EL anbefalt tiltakspakke.

Figur 7.2: Varighetskurve FV anbefalt tiltakspakke.

Varighetskurven til elektrisitet i Figur 7.1 illustrerer en jevn reduksjon i levert effekt i løpet av året. Det samme gjelder for varighetskurven til fjernvarme i Figur 7.2. For elektrisitet er dette hovedsakelig grunnet de store reduksjonene i levert luftmengde og dermed også vifteeffekt, samt økningen i virkningsgraden til viftene fra tiltak 1. For fjernvarme skyldes reduksjonen endring i levert varme fra radiatorer, mengde tilluft som må varmes, temperaturen tilluftten må varmes til, samt den økte virkningsgraden til varmegjenvinneren. Det ønskes å undersøke videre i hvilken grad den anbefalte tiltakspakken har endret seg sammenlignet med hvert individuelle tiltak. I Figur 7.3 presenteres levert elektrisitet til oppvarmingssystem og luftbehandling for referansebygget, de aktuelle tiltakene og anbefalt tiltakspakke.

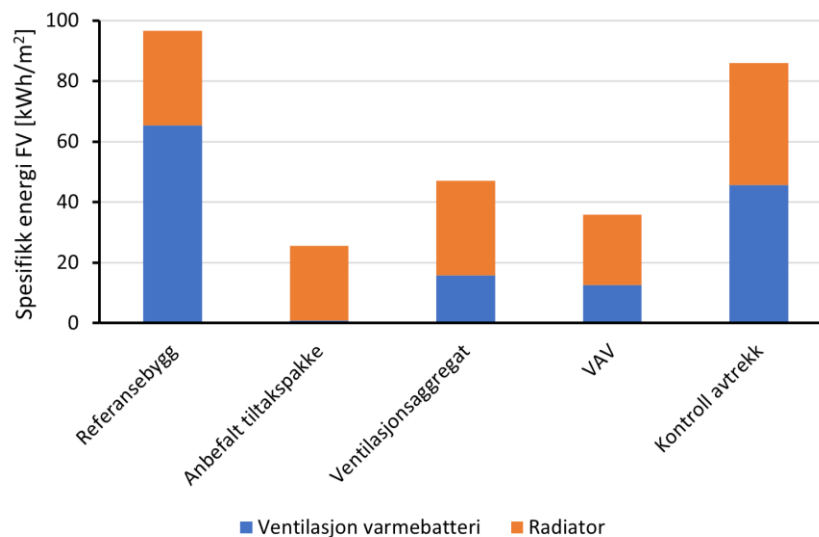


## KAPITTEL 7: RESULTATER OG ANALYSE ANBEFALT TILTAKSPAKKE



Figur 7.3: Sammenlikning av elektrisitetsforbruk til oppvarmingssystem og luftbehandling tiltak, anbefalt tiltakspakke og referansebygg.

Figur 7.3 viser at selv om det totale elektrisitetsforbruket kun er redusert med 9,8 %, er reduksjonen for elektrisitet til oppvarmingssystem og luftbehandling betydelig stor. Kontroll av avtrekkstemperatur har ikke påvirket elektrisitetsforbruket betydelig. Ventilasjonsaggregat har gitt en reduksjon på 8 kWh/m<sup>2</sup> og VAV har gitt den største reduksjonen på rundt 27 kWh/m<sup>2</sup>. Den anbefalte tiltakspakken har lavere spesifikt elektrisitetsforbruk enn VAV. Dette tyder på at VAV og utskiftning av ventilasjonsaggregat sammen reduserer elektrisitetsforbruket ytterligere. I Figur 7.4 presenteres fjernvarmeforbruket for tiltak, referansebygg og anbefalt tiltakspakke fordelt på radiator og varmebatteri i ventilasjonsanlegget.

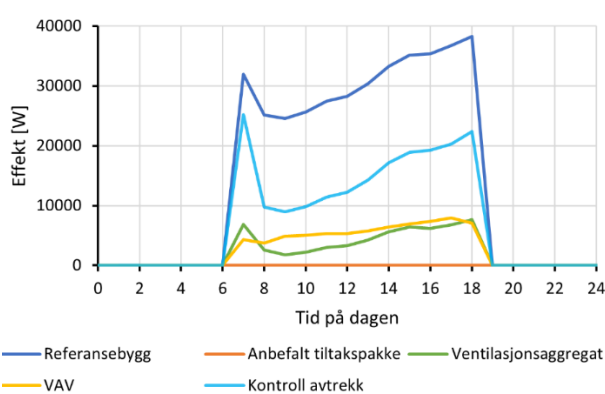


Figur 7.4: Sammenlikning av fjernvarmeforbruk tiltak, anbefalt tiltakspakke og referansebygg.

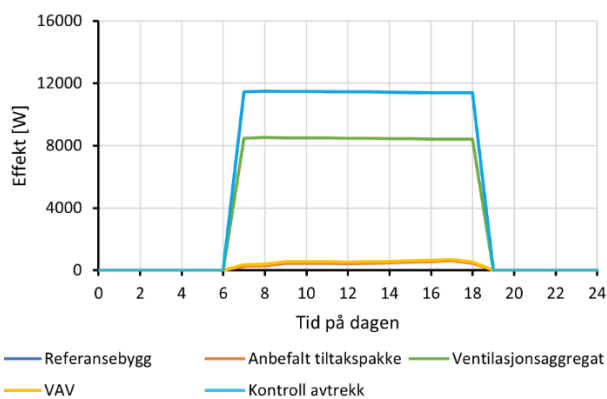
## KAPITTEL 7: RESULTATER OG ANALYSE ANBEFALT TILTAKSPAKKE

I Figur 7.4 er fjernvarmeforbruket til radiator og varmebatteri i ventilasjonsanlegget presentert. For den anbefalte tiltakspakken er forbruket til varmebatteriet nesten 0 kWh/m<sup>2</sup>. Det er hovedsakelig tiltakene VAV og ventilasjonsaggregat som har størst reduksjon i levert energi til varmebatteri, og det tyder på at disse tiltakene har redusert forbruket i den anbefalte tiltakspakken. Det er usikkert hvor stor påvirkning tiltaket kontroll avtrekk har. Den anbefalte tiltakspakken har ikke store reduksjoner i levert energi til radiator sammenlignet med referansebygget. Resultatene tyder på at tiltaket VAV har redusert levert energi noe og tiltaket kontroll avtrekk har økt forbruket.

Videre er levert effekt til elektrisitet og fjernvarme i løpet av en dag for relevante komponenter og systemer undersøkt. I Figur 7.5 og Figur 7.6 presenteres henholdsvis levert effekt til varmebatteri og vifte i ventilasjonsaggregatet. Begge figurene er for ventilasjonsaggregatet til kontor 27. januar.



Figur 7.5: Levert effekt til varmebatteri i ventilasjonsaggregat kontor, 27. jan referansebygg, utvalgte tiltak og anbefalt tiltakspakke.



Figur 7.6: Levert effekt til vifte i ventilasjonsaggregat kontor, 27. jan referansebygg, utvalgte tiltak og anbefalt tiltakspakke.

Levert effekt til varmebatteri i Figur 7.5 viser at alle tiltakene reduserer effektuttak i løpet av dagen. Som nevnt tidligere er det spesielt tiltakene VAV og ventilasjonsaggregat som reduserer forbruket, og den anbefalte tiltakspakken leverer tilsvarende null effekt til varmebatteriet. Effekttoppen ved oppstart av ventilasjonen er tydelig redusert for alle tiltakene og VAV styring har jevnet ut effektuttaket i løpet av dagen.

Figur 7.6 illustrer at VAV og den anbefalte tiltakspakkens vifteeffekt er veldig lik, men VAV har litt høyere effektuttak. Tiltaket ventilasjonsaggregat har redusert effektuttaket til viftene sammenlignet med referansebygget, men ser ut til å ha bidratt minimalt til reduksjonen i den

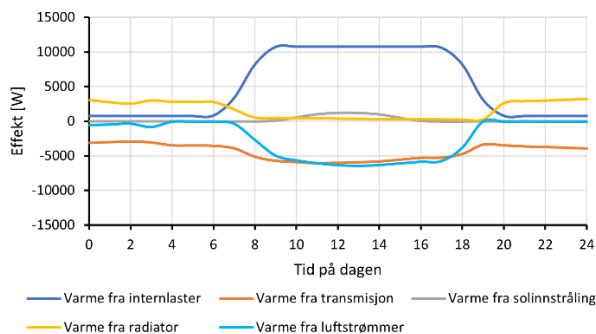
## KAPITTEL 7: RESULTATER OG ANALYSE ANBEFALT TILTAKSPAKKE

anbefalte tiltakspakken 27. januar. Referansebygget og tiltaket med kontroll av avtrekkstemperatur har identisk vifteffekt, og det er derfor grafen til referansebygget ikke er synlig i Figur 7.6. Dette kan bety at kontroll av avtrekk ikke bidrar til å redusere elektrisitetsforbruket.

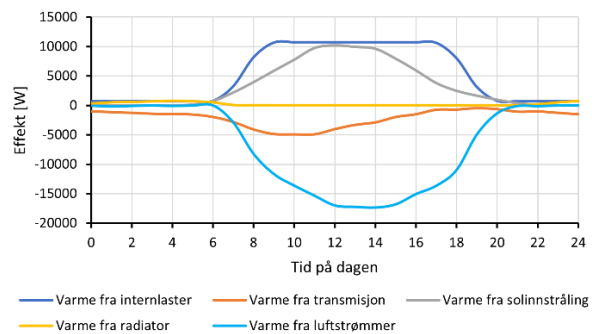
Tiltaket kontroll avtrekk har lavest besparelser, både for elektrisitet og fjernvarme. Det er usikkert i hvilken grad tiltaket påvirker energi- og effektforbruket i den anbefalte tiltakspakken. Det ble simulert en ny tiltakspakke hvor kun tiltakene VAV og ventilasjonsaggregat var inkludert. Simuleringen viste at det totale energiforbruket, både for fjernvarme og elektrisitet var tilnærmet uendret. Levert effekt til radiator reduserte, men levert effekt til varmebatteri i ventilasjonsaggregatet økte tilsvarende. Maksimum effekt for fjernvarme økte, men topplasten til elektrisitet var uendret.

Selv om tiltaket kontroll av avtrekk ikke gir betydelige besparelser for energi og maksimum effekt når det kombineres med de to andre tiltakene, ble det valgt å la tiltaket være en del av den anbefalte tiltakspakken. Dette er fordi styring av tilluftstemperatur ved kontroll av avtrekkstemperatur bidrar til bedre inneklima.

Ved å kombinere tiltakene til en tiltakspakke kan varmebalansen påvirkes. I Figur 7.7 og Figur 7.8 presenteres varmebalanse i kontor 1 for anbefalt tiltakspakke for henholdsvis 27. januar og 25. mai.



Figur 7.7: Varmebalanse i kontor 1, 27. jan anbefalt tiltakspakke.

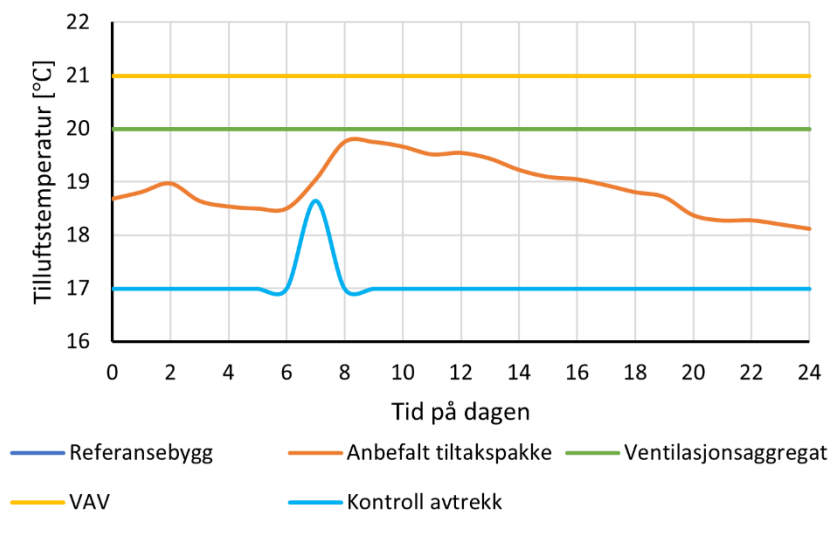


Figur 7.8: Varmebalanse i kontor 1, 25. mai anbefalt tiltakspakke.

Varmebalansen i Figur 7.7 og Figur 7.8 viser at radiatorene leverer tilsvarende null effekt mellom klokken 08 og 19 i januar og null effekt hele dagen i mai. Utenfor driftstid i januar leverer

## KAPITTEL 7: RESULTATER OG ANALYSE ANBEFALT TILTAKSPAKKE

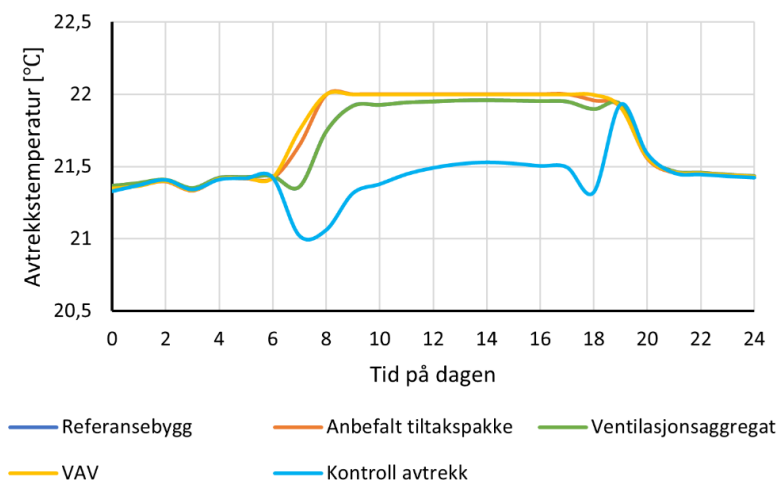
radiatorene mellom 3000 og 4000 W varmegevinst til sonen, som er tilsvarende likt som referansebygget. Varmetap fra luftstrømmer er større i mai enn i januar. Dette er fordi både kontroll av avtrekkstemperatur og VAV-styring varierer tilluftstemperatur og luftmengde for å opprettholde et godt inn klima i sonen. Videre presenteres tilluftstemperatur 27. januar for de aktuelle tiltakene, referansebygget og den anbefalte tiltakspakken i Figur 7.9.



Figur 7.9: Tilluftstemperatur til kontorsonene 27. jan, referansebygg, utvalgte tiltak og anbefalt tiltakspakke.

Figur 7.9 viser variasjon i tilluftstemperatur for de ulike tiltakene, referansebygget og den anbefalte tiltaksmodellen. Referansebygget og tiltaket ventilasjonsaggregat har helt lik tilluftstemperatur ettersom den ikke blir påvirket av at aggregatet byttes ut. Dette er grunnen til at man ikke ser grafen for tilluftstemperatur til referansebygget i figuren. Tiltaket VAV har økt tilluftstemperaturen, men kontroll av avtrekkstemperaturen og den anbefalte tiltakspakken har redusert tilluftstemperaturen. Den anbefalte tiltakspakken sin tilluftstemperatur ligger et sted mellom tiltaket VAV og kontroll av avtrekkstemperatur, og varierer i løpet av dagen. For å finne ut om tiltakene jobber godt sammen må også avtrekkstemperaturen analyseres. Avtrekkstemperaturen for de samme situasjonene for kontor 27.januar presenteres i Figur 7.10.

## KAPITTEL 7: RESULTATER OG ANALYSE ANBEFALT TILTAKSPAKKE



Figur 7.10: Avtrekkstemperatur fra kontorsonene 27. jan, referansebygg, aktuelle tiltak og anbefalt tiltakspakke.

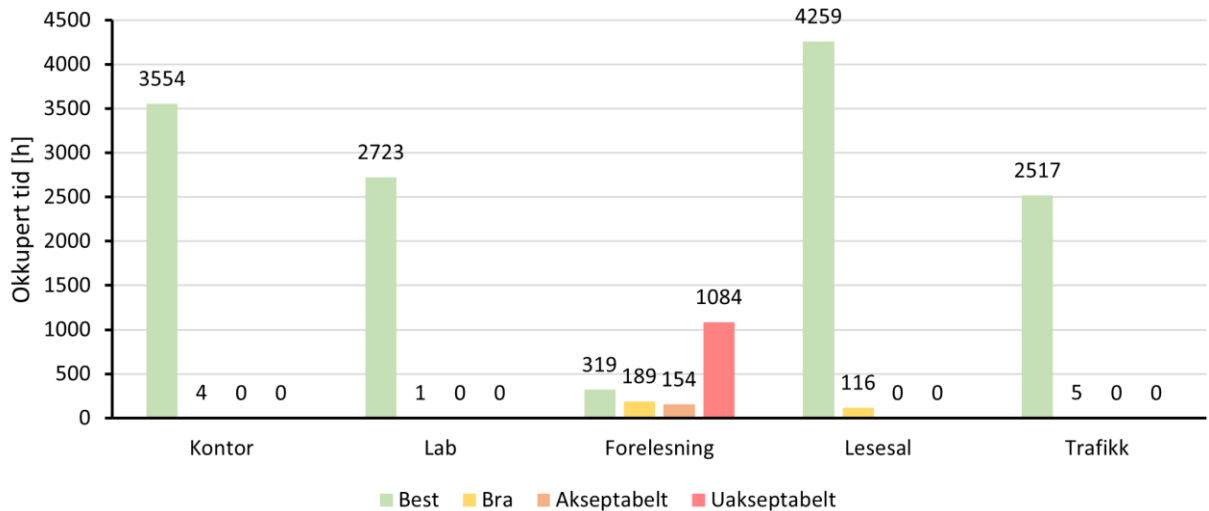
I Figur 7.10 er avtrekkstemperaturen relativt lik for alle modellene. Eneste unntak er tiltaket med kontroll av avtrekkstemperatur som ligger noe lavere. Akkurat som for tilluftstemperaturen er referansebygget og tiltaket ventilasjonsaggregat identiske. Dette er grunnen til at man ikke ser grafen til referansebygget. Den anbefalte tiltakspakken har tilsvarende lik avtrekkstemperatur som tiltaket med VAV-styring. Ved VAV-styring vil temperaturen reguleres mellom 21 °C og 22 °C, men kontroll av avtrekk regulerer tilluftstemperaturen etter settpunkt på 21 °C. Dette tyder på at tilført luftmengde til sonen er så lav at tilluftstemperaturen påvirker temperaturen i rommet i mindre grad enn tidligere.

Tilluftstemperaturen for den anbefalte tiltakspakken var lavere enn for tiltaket VAV-styring, men avtrekkstemperaturen var uendret. Dette tyder på at de to tiltakene VAV-styring og kontroll av avtrekkstemperatur jobber godt sammen. Tiltakene kombinert leverer minimale luftmengder med så lav temperatur som mulig, uten at det går utover termisk komfort i sonen og uten å unødvendig øke levert effekt fra radiator.

### 7.2 Inneklima – anbefalt tiltakspakke

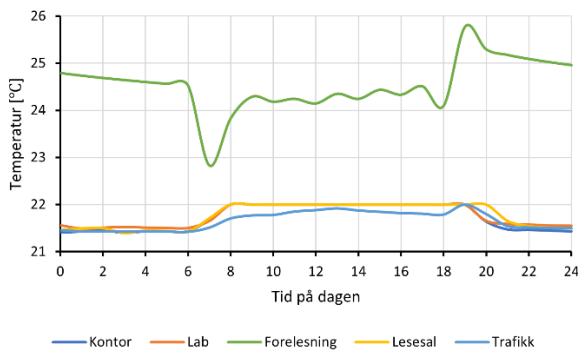
I dette delkapittelet vil resultater for inneklima i den anbefalte tiltakspakken bli presentert. Først vil en generell oppsummering av den termiske komforten i løpet av året presenteres, etterfulgt av verdier for temperatur, CO<sub>2</sub>-konsentrasjon og luftens alder i løpet av en dag. I Figur 7.11 presenteres termisk komfort med adaptiv komfortmodell for alle sonene i 3.etasje for den anbefalte tiltakspakken.

## KAPITTEL 7: RESULTATER OG ANALYSE ANBEFALT TILTAKSPAKKE

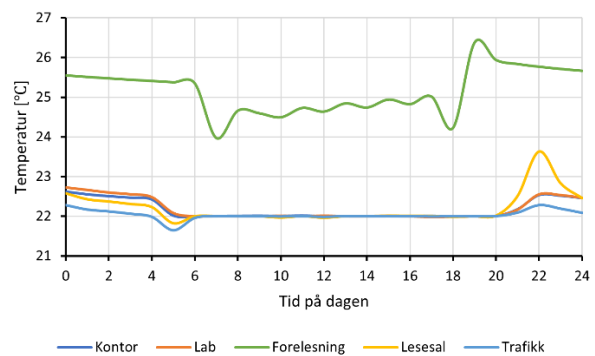


Figur 7.11: Adaptiv komfortmodell for alle soner i 3.etasje for anbefalt tiltakspakke.

Adaptiv komfortmodell i Figur 7.11 viser at de fleste soner har et godt termisk miljø med nesten alle brukstimer innenfor kategorien best. I virkeligheten vil det mest sannsynlig være færre timer innenfor denne kategorien, ettersom det er alltid er uforutsette parametere som vil påvirke inneklimate, som ikke blir hensyntatt i IDA ICE. Den eneste sonen som har forverret termisk komfort fra referansebygget er forelesning. Dette er grunnet VAV-styring som reduserer luftmengdene i omliggende soner, slik at temperaturen stiger. Videre blir gjennomsnittlig lufttemperatur for alle soner i 3. etasje, 27. januar og 25. mai presentert i henholdsvis Figur 7.12 og Figur 7.13.



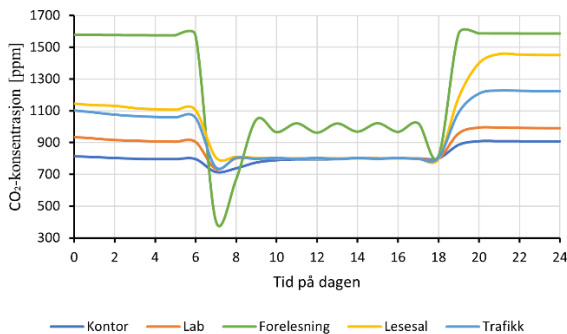
Figur 7.12: Gjennomsnittlig lufttemperatur i alle soner i 3.etasje, 27. jan anbefalt tiltakspakke.



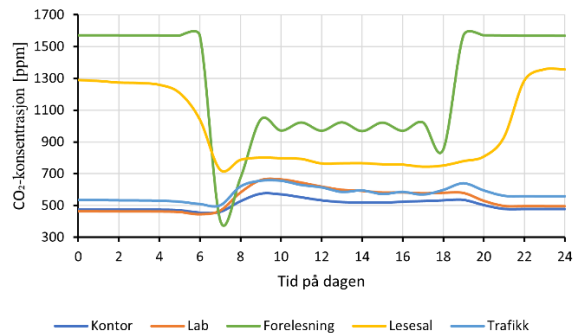
Figur 7.13: Gjennomsnittlig lufttemperatur i alle soner i 3.etasje, 25. mai anbefalt tiltakspakke.

## KAPITTEL 7: RESULTATER OG ANALYSE ANBEFALT TILTAKSPAKKE

De gjennomsnittlige lufttemperaturene i Figur 7.12 og Figur 7.13 viser at temperaturen er omtrent 22 °C når bygget er i bruk, både januar og mai. Når bygget ikke er i bruk er temperaturen noe lavere i januar enn i mai grunnet forskjellen i utetemperatur. Unntaket er igjen forelesning som har veldig høy gjennomsnittlig lufttemperatur, både i og utenfor driftstid. Temperaturen ligger mellom 24 °C og 25 °C når sonen er i bruk, og det er variasjoner i temperaturen ettersom brukere går inn og ut av sonen etter hver forelesning. Likevel er det tydelig at variasjon i levert luftmengde og tilluftstemperatur som følge av den anbefalte tiltakspakken, opprettholder et godt termisk miljø i de fleste sonene. I Figur 7.14 og Figur 7.15 presenteres CO<sub>2</sub>-konsentrasjon for samtlige soner i 3. etasje for henholdsvis 27. januar og 25. mai.



Figur 7.14: CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i alle soner i 3. etasje, 27. jan anbefalt tiltakspakke.

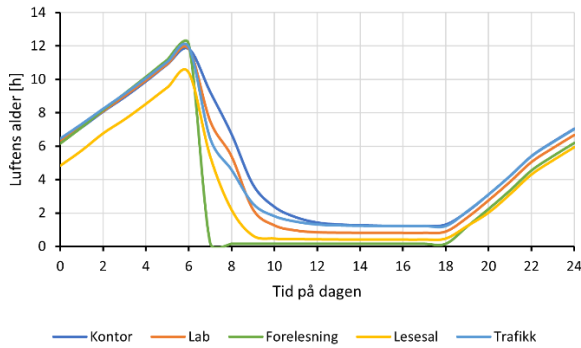


Figur 7.15: CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i alle soner i 3. etasje, 25. mai anbefalt tiltakspakke.

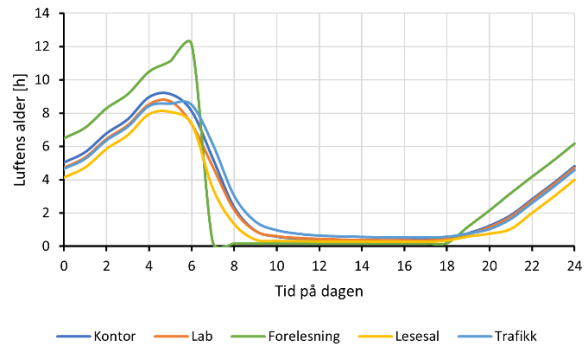
Grafene fra Figur 7.14 og Figur 7.15 viser at både CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i januar og mai er lavere enn maksimum settpunkt på 800 ppm når sonene er okkupert, med unntak av forelesning. I januar er konsentrasjonene ofte på maksimum settpunkt, men i mai er CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen rundt 600 ppm. Dette er fordi det i mai er mulighet for naturlig ventilasjon ved åpning av vinduer, samtidig som tilførte luftmengder til sonene er litt høyere enn i januar for å holde temperaturen under maksimum settpunkt på 22 °C.

CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i forelesning og lesesal avviker fra trenden. I lesesal ligger konsentrasjonen på rundt 800 ppm innenfor okkupert tid i mai. Dette er omtrent 200 ppm over de andre sonene, med unntak av forelesning. Dette er fordi det i mai er eksamensperiode, og det er derfor høyere internlaster. CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen er også høy utenfor okkupert tid, rundt 800 ppm høyere enn de resterende sonene. Dette er hovedsakelig fordi sonen har høye internlaster. For å se nærmere på hyppigheten av luftutskiftningen i sonene, blir luftens alder for alle soner 27. januar og 25. mai presentert i henholdsvis Figur 7.16 og Figur 7.17.

## KAPITTEL 7: RESULTATER OG ANALYSE ANBEFALT TILTAKSPAKKE



Figur 7.16: Luftens alder i alle soner i 3.etasje, 27. jan anbefalt tiltakspakke.



Figur 7.17: Luftens alder i alle soner i 3.etasje, 25. mai anbefalt tiltakspakke.

Figur 7.16 og Figur 7.17 viser at lesesal gjennomsnittlig er sonen med lavest verdi for luftens alder, som betyr at luften skiftes ut hyppigere enn for de andre sonene. Dette er grunnet de høye CO<sub>2</sub>-konsentrasjonene i sonen, som resulterer i høy levert luftmengde. Forelesning har lavest verdi for luftens alder under okkupert tid og ligger så vidt over 0 timer. Luftens alder er også lik for januar og mai. Dette er fordi maksimum luftmengde alltid leveres grunnet de høye temperaturene og CO<sub>2</sub>-konsentrasjonene. Utenfor okkupert tid er forelesning den sonen med høyest verdi for luftens alder i mai. Dette er fordi sonen ikke har noen vinduer og kan derfor ikke kjøle rommet ved bruk av naturlig ventilasjon.

De resterende sonene har tilsvarende like verdier for luftens alder og følger samme trend i løpet av døgnet. I mai er verdiene lavere enn i januar, grunnet åpning av vinduer og høyere leverte luftmengder grunnet kjølebehovet i sonene. Luftens alder er veldig lav i okkupert tid og ligger på mellom 0,5 timer og 2 timer i januar, og 0 timer og 1 time i mai. Utenfor okkupert tid er luftens alder veldig høy og ligger på rundt 10 timer i januar og 8 timer i mai. Dette er høye verdier og det vil ikke være komfortabelt å oppholde seg i sonene på denne tiden, ettersom luften kan virke tett med høye CO<sub>2</sub>- og temperaturnivåer.

### 7.3 Klimafotavtrykk – anbefalt tiltakspakke

Etttersom den anbefalte tiltakspakken inneholder flere tiltak, er det flere alternativer for beregning av klimafotavtrykk. Det antas at alle tiltakene blir implementert til samme tid. Iboende utslipp adderes og årlige besparelser beregnes fra resultatene til tiltakspakken. Levetiden er forskjellige for alle de tre tiltakene, og det er derfor utfordrende å konkludere med best fremgangsmåte for å



## KAPITTEL 7: RESULTATER OG ANALYSE ANBEFALT TILTAKSPAKKE

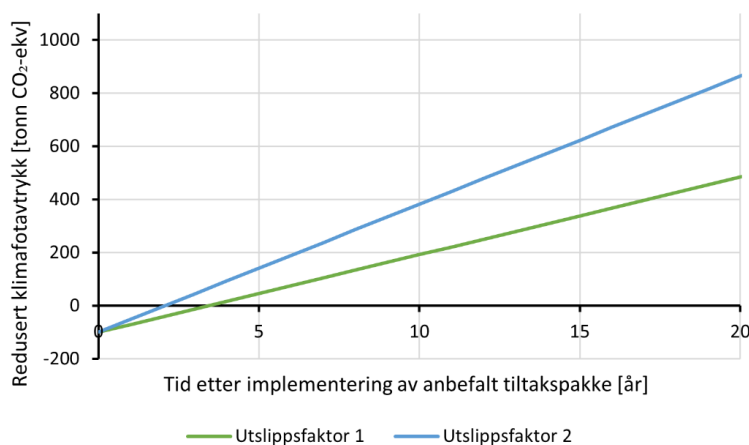
evaluere hele livsløpet til den anbefalte tiltakspakken. Man kan anta at det skjer en ny investering ved endt livstid til hvert enkelt tiltak, eller at tiltaket ikke lenger er med i tiltakspakken etter endt levetid, slik at de årlige besparelsene synker. Grunnet usikkerheten rundt hva som skjer ved endt levetid vil det her brukes en gjennomsnittlig levetid på 20 år for den anbefalte tiltakspakken.

I Tabell 7.2 presenteres iboende utslipp og årlig utslipp fra fjernvarme og elektrisitet for den anbefalte tiltaksmodellen, samt totalt utslipp og årlig utslippsbesparelse. Alle utslipp er presentert som CO<sub>2</sub>-ekvivalenter.

Tabell 7.2: Årlig klimafotavtrykk fra energibruk og iboende utslipp for anbefalt tiltakspakke.

Utslippsfaktor	Iboende utslipp [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Utslipp FV [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Utslipp EL [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Totalt årlig utslipp [kg CO <sub>2</sub> -ekv]	Årlig utslippsbesparelse [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
1	100 000	11 654	19 545	31 199	29 189
2	100 000	11 654	195 446	207 100	48 197

Tabell 7.2 viser at de totale iboende utslippene for den anbefalte tiltakspakken er 100 000 kg CO<sub>2</sub>-ekv. De årlige utslippsbesparelsene er henholdsvis 29 189 kg CO<sub>2</sub>-ekv og 48 197 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Utslippsbesparelsene øker derfor med 40 % fra utslippsfaktor 1 til utslippsfaktor 2 fordi tiltakspakken påvirker elektrisitetsbehovet i stor grad. Det kan derfor gi store avvik i resultatene om man bruker feil utslippsfaktor for elektrisitet. I Figur 7.18 presenteres redusert CO<sub>2</sub>-ekvivalent utslipp som funksjon av tid etter implementering av anbefalt tiltakspakke for både utslippsfaktor 1 og utslippsfaktor 2.



Figur 7.18: Redusert klimafotavtrykk etter implementering av anbefalt tiltakspakke.

## KAPITTEL 7: RESULTATER OG ANALYSE ANBEFALT TILTAKSPAKKE

Figur 7.18 viser at de totale reduserte utslippene etter endt levetid på 20 år ender på rundt 500 tonn CO<sub>2</sub>-ekv for utslippsfaktor 1 og 850 tonn CO<sub>2</sub>-ekv for utslippsfaktor 2. Det tar ikke mange år før de iboende utslippene er kompensert for av de årlige besparelsene. For utslippsfaktor 1 er denne tiden på rundt 4 år og for utslippsfaktor 2 er den på rundt 2 år. Om man hadde tatt høyde for at enkelte komponenter måtte byttes ut underveis grunnet levetiden på de ulike tiltakene, ville det vært noe lavere reduserte utslipp etter 20 år. Dette er grunnet utslipp knyttet til avfallshåndtering av eksisterende komponenter og iboende utslipp i de nye komponentene.

### 7.4 Lønnsomhet – anbefalt tiltakspakke

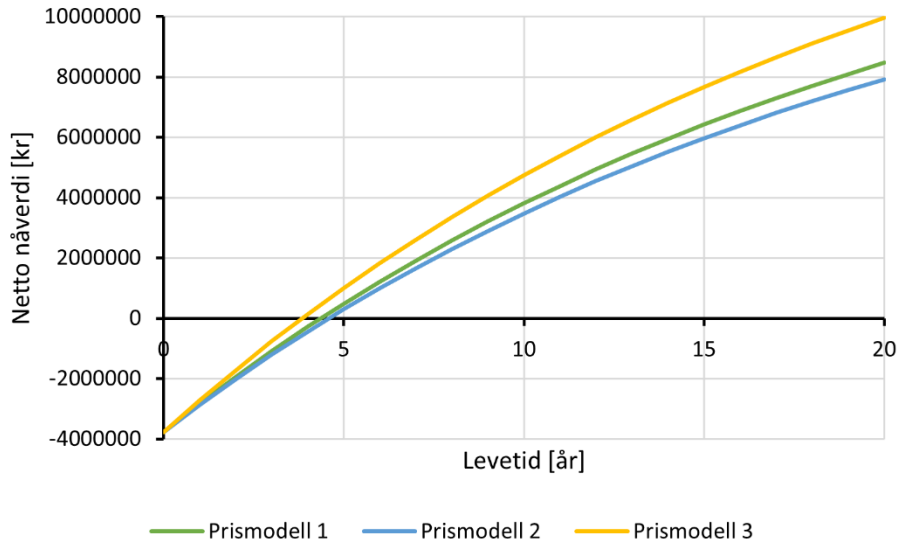
Ettersom den anbefalte tiltakspakken inneholder flere tiltak, er det flere alternativer for beregning av lønnsomhet. Det kan antas at hver gang en komponent når endt levetid vil tiltaket investeres i på nytt. Alternativt kan det antas at det ikke skjer en ny investering etter endt levetid, men at de årlige besparelsene reduseres. For lønnsomhet vil det brukes samme tilnærming som for beregning av klimafotavtrykk. Det brukes en gjennomsnittlig levetid for hele tiltakspakken på 20 år. I Tabell 7.3 presenteres parametere brukt i beregning av lønnsomhet, samt resultat for tilbakebetalingstid og netto nåverdi. I tabellen presenteres alle tre prismodeller.

Tabell 7.3: Lønnsomhetsanalyse for anbefalt tiltakspakke.

Prismodell	Investeringskostnad [kr]	Årlig energipris [kr]	Årlige besparelser [kr]	Levetid [år]	Tilbakebetalingstid [år]	Netto nåverdi [kr]
1	3 770 000	2 658 927	981 956	20	4,4	8 467 341
2	3 770 000	2 404 667	938 100	20	4,6	7 920 794
3	3 770 000	2 847 822	1 101 759	20	3,9	9 960 351

Tabell 7.3 viser at den anbefalte tiltakspakken gir en nettonåverdi på 8,4 millioner, 7,9 millioner og 9,9 millioner for de tre prismodellene. For prismodell 1, hvor effektledet ikke er inkludert i prisen, er nettonåverdi lavere for den anbefalte tiltakspakken enn for tiltaket med VAV-styring. Dette er fordi investeringskostnadene øker mer enn de årlige besparelsene. For prismodell 2 og 3 er derimot netto nåverdi høyere for den anbefalte tiltakspakken enn alle de andre tiltakene. Dette er fordi endring i maksimum levert effekt er redusert betraktelig i den anbefalte tiltakspakken. For alle prismodellene er tilbakebetalingstiden lav på under 5 år. For å illustrere lønnsomheten til tiltaket bedre blir netto nåverdi presentert som funksjon av levetid i Figur 7.19.

## KAPITTEL 7: RESULTATER OG ANALYSE ANBEFALT TILTAKSPAKKE



Figur 7.19: Netto nåverdi som funksjon av levetid for anbefalt tiltakspakke.

Grafene i Figur 7.19 illustrerer den korte tilbakebetalingstiden og høye nettonåverdien for alle prismodellene. Prismodell 3 har den høyeste nettonåverdien grunnet den høye energiprisen som inkluderer effektpris for hver måned, samtidig som den anbefalte tiltakspakken både reduserer energiforbruket og maksimum levert effekt hver måned.

Når man ser på lønnsomheten sammen for hele tiltakspakken er tilbakebetalingstiden høyere enn når man ser på hvert enkelt tiltak alene. Samme gjaldt for utregnet nettonåverdi for en av prismodellene når man sammenligner tiltaket VAV og den anbefalte tiltakspakken. Dette er fordi når man kombinerer tiltakene i en pakke vil ikke energi- og effektforbruket redusere like mye som om man adderer sammen alle de individuelle reduksjonene fra hvert tiltak. Investeringskostnadene må derimot adderes sammen og det antas ikke at det blir noe billigere å investere i flere tiltak samtidig. Hadde noen av tiltakene ikke vært lønnsomme kunne det å kombinere de med lønnsomme tiltak, gjøre at tiltakspakken som helhet kan regnes som lønnsom.

### **8 Diskusjon**

I dette kapitlet skal usikkerheter i resultatene diskuteres. Bruk av referansemodell som vurderingsgrunnlag og den anbefalte tiltakspakke, etterfulgt av lønnsomhetsberegning, vil bli diskutert for å analysere validiteten til resultatene. Avslutningsvis skal det settes søkelys på usikkerhet knyttet til beregning av reduksjon av klimafotavtrykk.

#### **8.1 Bruk av referansebygg som vurderingsgrunnlag**

I vurdering av ENØK-tiltak er et referansebygg benyttet. Referansebygget eksisterer ikke, men er modellert i IDA ICE basert på egenskapene til en bygningskohort med bygg på NTNU Gløshaugen bygget mellom 1971 og 1999. Bruk av referansemodell til å teste tiltak setter begrensninger på validiteten til resultatene. Dette skal diskuteres videre i dette delkapitlet.

Referansebyggets årlige energibruk er kalibrert, slik at det simulerte energibruket samsvarer med gjennomsnittlig målt energibruk for bygningskohorten. Likevel avdekket verifiseringen at tiden for effektuttaket til fjernvarme i referansebygget ikke samsvarer med målt effektuttak til bygningskohorten til enhver tid. I oppvarmings sesongen er fjernvarmebehovet til bygningskohorten jevnt høyt, med en mindre effekttopp i driftstid. I referansebygget derimot er fjernvarmebehovet lavt utenom driftstid, men en tydelig effekttopp gjennom hele driftstiden. Det knyttes derfor usikkerhet til tiltakenes påvirkning på fjernvarmeforbruket.

En viktig del av kalibreringen til fjernvarmeforbruket var å redusere effekttoppen til fjernvarme, da referansebygget hadde betydelig større effekttopp enn bygningskohorten. Størrelsen på varmekjelen ble identifisert og implementert, dette begrenset effekttoppen tilfredsstillende. For å sikre at eventuelle effektøkninger eller -reduseringer ikke ble påvirket av varmekjelstørrelsen, kunne ikke begrensningen brukes da tiltak skulle testes i referansebygget. Forventet reduksjon eller økning i effekttopp som følge av tiltak i bygningskohorten vil derfor ikke være det samme som simuleringen av tiltakene i referansebygget. Det vil være rimelig å anta at den prosentvise forskjellen før og etter implementering av tiltak, kan forventes dersom tiltak utføres i bygningskohorten.

## KAPITTEL 8: DISKUSJON

Endringen i fjernvarmeuttak skjer raskt i IDA ICE. Noe av grunnen til dette er at IDA ICE modellen ikke har informasjon om dimensjoner på rør til for eksempel radiatorer. Den faktiske størrelsen på rør vil begrense massestrømmen, som fører til at effektuttaket er begrenset. Dette kan forklare noe av forskjellen på fjernvarmeforbruket i referansebygget og bygningskohorten.

Bygningskohorten har et svært høyt elektrisitetsforbruk på 302,1 kWh/m<sup>2</sup>. Dette er fordi byggene i bygningskohorten har laboratorier med energikrevende maskiner, samt store datasaler som trekker mye strøm. Da elektrisitetsforbruket ble kalibrert ble utstyrslastene økt for å øke elektrisitetsforbruket. Det er uvisst om denne tilnærmingen er korrekt, da det ikke er datagrunnlag for andelen til de ulike postene i elektrisitetsforbruket. I og med at byggene er opptil 51 år gamle, kan det være at elektrisitetsforbruket til oppvarmingssystemet og luftbehandlingen (HVAC) er en større andel av det totale elektrisitetsforbruket, enn modellert i IDA ICE. Dette er fordi det ikke finnes datagrunnlag for tap i distribusjonssystemet, og tapet antas å være null som standardinnstilling i IDA ICE. Dersom dette er tilfellet, vil potensialet for reduksjon i elektrisitetsforbruket være større enn antatt.

Referansebygget er en gjennomsnittlig modell for flere bygg og eksisterer ikke. Bygningskroppen og dens geometri påvirker i stor grad energibehovet til et bygg. Som beskrevet i 2.8 avdekket Kang et al. (2015) at passive strategier, som endring av bygningsgeometri, ved energieffektivisering av bygninger kan være mer effektivt enn aktive strategier. En bygningsgeometri og soneplassering med ikke-representative fasadestørrelser medfører derfor stor usikkerhet, både med tanke på energibruk og inneklime.

Det er store avvik i energiforbruket til byggene i bygningskohorten. Referansebygget i IDA ICE representerer derfor kun noen av byggene tilstrekkelig. Selv om tiltak fungerer godt i referansebygget, er ikke dette en selvfølge for samtlige bygg i kohorten. Dette fører til store usikkerheter i resultater for energibruk og inneklime. Aktuelle tiltak bør derfor undersøkes for hvert enkelt bygg.

I vurdering av inneklime er termisk inneklime, luftens alder og CO<sub>2</sub>-konsentrasjon analysert. Dette er parametere som i IDA ICE hovedsakelig påvirkes av utetemperatur, personbelastning, luftmengder og tilført varme til sonen. I virkeligheten vil dette også påvirkes av plassering av

## KAPITTEL 8: DISKUSJON

ventiler i sonene og individuell opplevelse av inneklima. Feil plassering av ventiler kan medføre ineffektiv ventilering som gjør at luftens alder og CO<sub>2</sub>-konsentrasjon kan bli høy i enkelte områder.

Forelesningssonene har verst inneklima. Det er høy temperatur og CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i sonen hele driftstiden. Sonen har representativt areal tilsvarende gjennomsnittlig areal av forelesningssaler i bygningskohorten. Personbelastningen er lik kapasiteten i forelesningssaler i bygningskohorten. Takhøyden i forelesningssaler derimot, er ikke tatt høyde for. Da påvirker personbelastningen inneklimaet i større grad enn det som er realistisk, ettersom volumet ikke er representativt.

Plassering av rom påvirker varmebalansen i rommet. I referansebygget er forelesningssonen plassert i midten av bygget, uten vinduer. Dette er ikke representativt for alle forelesningssaler i bygningskohorten. Selv om vinduer fører til varmetilskudd fra solinnstråling, vil det også føre til varmetap i vintermånedene, samt mulighet til å åpne vinduer og tilføre naturlig ventilasjon. Dette er flere av grunnene til at forelesningssonene i referansebygget har dårlig inneklima. Dermed er det heller ikke gjennomført omfattende tiltak for å bedre inneklimaet i disse sonene, da det knyttes stor usikkerhet til resultatene. Generelt bør tiltak som forbedrer inneklima vurderes for de faktiske rom, for å sikre positiv innvirkning på inneklima.

### **8.2 Anbefalt tiltakspakke**

Ifølge NTNUs Miljøutviklingsplan skal NTNU redusere eget energiforbruk med 50 % per årsverk innen 2030, sammenliknet med 2019 (NTNU, 2020). Dette skal blant annet gjøres ved å identifisere og vurdere tiltak for alle bygg. Tiltak med tilbakebetalingstid under 5 år skal som hovedregel gjennomføres. Ingen av tiltakene har så høye energibesparelser alene, men når de kombineres sammen er reduksjonen i fjernvarme og elektrisitet på henholdsvis rundt 70 % og 10 %. Dette tilsvarer et totalt redusert energiforbruk på 27 %. Om man ser bort ifra elektrisitet til belysning, utstyr og kjøling er total energibesparelse på 75 %. Etersom tilbakebetalingstiden for tiltakspakken også er under 5 år og energibesparelsene er høye, kan det argumenteres for at tiltakene bør gjennomføres.

Den anbefalte tiltakspakken består av tre tiltak som påvirker ventilasjonssystemet. Om et av tiltakene uansett skal innføres vil det være fordelaktig å innføre alle, ettersom man allerede må gjøre utskiftninger på ventilasjonsanlegget. Det er likevel usikkert om det må skje flere utskiftninger enn det som er antatt i denne oppgaven. Om kanalnettet har tilstrekkelig med

## KAPITTEL 8: DISKUSJON

rettstrek for å tilrettelegge for struping ved innføring av VAV-spjeld er usikkert, og det er mulig at hele kanalnettet må prosjekteres på nytt.

Det er flere usikkerheter knyttet til energibesparelsene for de enkelte tiltakene i tiltakspakken. For utskiftning av ventilasjonsaggregat, med økt virkningsgrad på vifter og varmegjenvinner, er det troverdige resultater for energibesparelser når man sammenligner med referansebygget. De faktiske energibesparelsene varierer avhengig av eksisterende virkningsgrad på vifter og varmegjenvinnere i hvert enkelt bygg. Kontroll av avtrekkstemperatur har hovedsakelig usikre energibesparelser fordi tiltaket baserer seg på temperaturer i de ulike sonen. I referansebygget er sonene store med en bestemt lokasjon i bygget og forutsigbare internlast. I virkelig situasjon vil ulike rom ha varierende størrelse og lokasjon i bygg, og internlastene vil variere i større grad. Temperaturen vil derfor variere fra rom til rom, selv om rommene er beregnet for samme bruk.

Det tiltaket som har flest usikkerheter knyttet opp mot energibesparelsene er VAV. Reduksjonen i levert luftmengde var stor, og energibesparelsene tilsvarte rundt 100 kWh/m<sup>2</sup> per år. Dette er besparelser som er betydelig større enn 30-40 kWh/m<sup>2</sup> per år, som tidligere forskning og simuleringer antyder (Tekna, 2021). Muligheten for at det i virkeligheten er behov for høyere luftmengder er derfor stor. Et universitet har også varierende personbelastning hvor personer kan befinne seg i bygg utenfor det som er antatt i referansebygget. Det vil da være behov for mekanisk ventilasjon oftere enn antatt, og energiforbruket øker.

Innføring av VAV ble gjort i alle soner i modellen. Om det er reelt å kunne ha VAV-styring på lab er usikkert, og det er mulig at flere parameter enn kun CO<sub>2</sub>-konsentrasjon og temperatur bør være med på å bestemme luftmengden til sonen. Det er forventet at CO<sub>2</sub>-konsentrasjon til uteluft vil fortsette å øke de neste årene. Da vil konsentrasjonen i tilluft øke, som resulterer i økt CO<sub>2</sub>-nivå i rom, og levert luftmengde blir høyere. Dette vil gjøre at tiltaket VAV ikke sparer like mye energi som antatt.

### **8.3 Lønnsomhet**

Når lønnsomheten til tiltak og tiltakspakker beregnes er den avhengig av parametere som investeringskostnad, diskonteringsrente, levetid og årlige besparelser. De årlige besparelsene er igjen avhengig av energipris. I denne oppgaven er det benyttet tre ulike prismodeller, men det er usikkert om noen av de samsvarer med fremtidige energipriser. I Norge er energiprisene sterkt

## KAPITTEL 8: DISKUSJON

avhengig av nedbør som regulerer mengde vann i reservoarene til vannkraftverk. Med den globale oppvarming som skaper usikkerheter i fremtidig klima er vanskelig å forutsi hvor tilgjengelig nedbør vil være i de kommende årene. Dette kan resultere i økte strømpriser. Strømprisen er også forventet å øke, samt variere mer, ved økt integrering i det europeiske kraftmarkedet. De årlige kostnadsbesparelsene er også avhengig av de årlige energibesparelsene. Usikkerheten i redusert energi- og effektforbruk gir derfor videre usikkerhet for lønnsomhetsberegningene.

Beregnet lønnsomhet er knyttet til referansebygget, et bygg som ikke eksisterer. Investeringskostnaden til tiltak vil øke eller reduseres avhengig av hvor mange komponenter som må byttes ut. Dessuten er investeringskostnaden kun anslag det knyttes stor usikkerhet til, da prisen på komponenter som spjeld varierer med størrelse på komponenten. I tillegg er diskonteringsrenten en variabel som har stor påvirkning på netto nåverdi og tilbakebetalingstid. Diskonteringsrente på 5 % refererer til middels risiko. Ved å bruke en høyere diskonteringsrente, settes det større krav til størrelsen på kontantstrømmen for at et tiltak skal være lønnsomt. For å sikre en større sikkerhetsmargin for lønnsomhet kunne en høyere diskonteringsrente blitt brukt. Ved lønnsomhetsberegning er det ikke inkludert noen endring i vedlikeholdskostnad. Dette kan ha ført til at tiltak beregnes til både mer eller mindre lønnsomme enn de er. Nye komponenter vil mulig kreve mindre vedlikehold, men mer komplekse systemer kan kreve mer oppfølging og utskiftninger.

Da lønnsomheten til anbefalt tiltakspakke ble beregnet ble det gjort antagelser og forenklinger. Levetiden på tiltakspakken ble forenklet til å være gjennomsnittet av alle inkluderte tiltak, og det ble antatt at det ikke skjedde noen flere investeringer eller utskiftninger. Dette er store usikkerheter som vil gjøre at beregnet netto nåverdi kan ha store avvik fra virkelig netto nåverdi, om tiltakene skulle blitt gjennomført. Det er også gjort forenklinger hvor kun de delene av systemet som er direkte påvirket av tiltakene blir skiftet ut. Når ventilasjonsaggregatet, spjeld og sensorer byttes ut kan det også være naturlig å skifte hele kanalnett i ventilasjonssystemet. Dette vil ha liten eller ingen innvirkning på de årlige besparelsene, men det vil øke investeringskostnadene betydelig.

Selv med alle usikkerhetene rundt lønnsomhetsberegningene skal det mye til for at flere av tiltakene får en negativ netto nåverdi. Om det gjøres videre undersøkelser hvor det viser seg at enkelte av tiltakene som reduserer energiforbruket ikke er lønnsomme, kan metoden Total Concept benyttes for å argumentere for implementeringen av tiltaket. Tilbakebetalingstiden for den



anbefalte tiltakspakken er nære 5 år, og det er sannsynlig at den virkelige tilbakebetalingstiden er høyere. Om økningen i energipris fortsetter vil årlige besparelser øke slik at både netto nåverdi øker og tilbakebetalingstiden blir kortere. Beregningene av lønnsomhet kan ha store avvik, men det er sannsynlighet for at tiltakene er lønnsomme.

### **8.4 Klimafotavtrykk og bærekraftig drift av bygningsinstallasjoner**

Ifølge NTNUs Miljøutviklingsplan skal NTNU redusere sitt klimafotavtrykk (NTNU, 2020). Ved utregningen av klimafotavtrykk for tiltakene er det benyttet EPD for iboende utslipp i komponenter. Det er ikke mange EPD tilgjengelig og noen finnes kun som gjennomsnitt av flere varianter av samme komponent. Iboende utslipp vil også variere med størrelse på komponenter som benyttes. I oppgaven er det både antatt størrelse på spjeld og ventilasjonsaggregat for å finne EPD, og iboende utslipp kan derfor avvike fra resultatene. Iboende utslipp brukt for spjeld i denne oppgaven er hentet fra en utgått tysk EPD, da dette var det eneste tilgjengelige. Dersom tiltaket VAV-styring gjennomføres vil mest sannsynlig ikke disse spjeldene brukes. Da vil også de iboende utslippene avvike fra benyttet EPD, ettersom energimiksen endres avhengig av produksjonssted. Det er mangel på norske EPD i VVS-bransjen, men det er forventet strengere krav på miljødeklarasjoner og flere leverandører vil levere EPD for sine produkter. Dette vil resultere i mer nøyaktige klimagassberegninger.

Det er usikkerheter knyttet til levetiden på komponentene som må skiftes ut ved gjennomføring av tiltakspakken. Enkelte komponenter kan kreve utskiftning hyppigere enn andre, som vil resultere i økning i klimafotavtrykket. Det er også usikkerheter i det reduserte klimafotavtrykket for tiltakene grunnet utslippsfaktorene for fjernvarme og elektrisitet. Utslipp fra elektrisitet er avhengig av strømmiksen som benyttes. Denne vil sannsynlig variere over tid, og det er vanskelig å sette en verdi for nøyaktig utslipp. For fjernvarme er utslippene mer lokale og ikke like usikre, men de kan likevel avvike fra verdien som er brukt i oppgaven.

Med rask utvikling i klimakrisen og global oppvarming er ekstremvær et økende problem. Dette kan føre til både økt kjøle- og varmebehov. Referansebygget har ikke kjøleenheter, med unntak av laboratoriet. Det er sannsynlig at det kan bli nødvendig i fremtiden. Dette vil medføre økte kostnader og økt energibruk. Likevel kan det økte fokuset på gjenvinning, ombruk og avfallshåndtering være med på å redusere utslippene knyttet til utskiftning av komponenter

### 9 Konklusjon

NTNU har som mål å redusere energiforbruket sitt med 50 % per årsverk sammenlignet med 2019, innen 2030 (NTNU, 2020). For å nå målet skal blant annet energiøkonomiske tiltak med tilbakebetalingstid på under 5 år innføres i eksisterende bygg. Hovedmålet med denne masteroppgaven var å definere og simulere relevante effekt- og energiøkonomiske tiltak for typiske universitetsbygninger, ved bruk av simuleringsverktøyet IDA ICE. For å undersøke hovedmålet ble følgende delmål utført:

- Forbedre og kalibrere eksisterende modell i IDA ICE.
- Definere effekt- og energieffektiviseringstiltak og simulere tiltakene i IDA ICE.
- Utvikle reelle modeller for energipris og vurdere lønnsomhet av de definerte tiltakene.
- Evaluere tiltakenes klimafotavtrykk sammenliknet med nåværende drift.
- Vurdere effekt- og energieffektiviseringstiltakene basert på resultater for energi, effekt, inneklima, klimafotavtrykk og lønnsomhet.
- Anbefale en tiltakspakke for bygningskohorten i henhold til NTNUs miljøutviklingsplan for 2020-2030.

Kalibrering og analyse av referansebygget resulterte i følgende funn:

- Kalibrert årlig energiforbruk for referansebygget stemmer godt overens med årlig målt energiforbruk til bygningskohorten. På et detaljert nivå er det avvik mellom bygningskohorten og referansebygget. Dette gjelder særlig fjernvarmeforbruket i oppvarmings sesongen. Elektrisitetsforbruket er høyt grunnet utstyr i laboratoriet.
- Luftstrømmer står for store deler av varmetapet i bygningskohorten og levert radiatoreffekt er minimal i driftstid grunnet de høye internlastene. Det er potensiale for energibesparelser ved endring av kontroll og styring av ventilasjon og radiator.

Vurdering av effekt- og energieffektiviseringstiltakene resulterte i følgende funn:

- Utskiftning av ventilasjonsaggregat reduserer fjernvarmeforbruket og effekttoppen til fjernvarme med henholdsvis 49 % og 25 %, men påvirker ikke inneklima.

## KAPITTEL 9: KONKLUSJON

- Nattsinking reduserer fjernvarmeforbruket med 9,8 %, men øker effekttoppen med 14,3 % og reduserer den termiske komforten.
- Regulering av tilluftstemperatur ved kontroll av avtrekkstemperatur reduserer fjernvarmeforbruket med 10,8 %. Besparelsen er knyttet til usannsynlig lav tilluftstemperatur i forelesning, som gjør resultatene usikre. Tiltaket bidrar hovedsakelig til å bedre termisk komfort.
- VAV-styring reduserer luftmengdene betraktelig, som fører til at fjernvarmeforbruket samt effekttoppen reduseres med henholdsvis 59,6 % og 53,3 %. Dette er også tiltaket med størst elektrisitetsbesparelser. Inneklima forbedres i alle soner utenom forelesning. Tidligere forskning har konkludert med at VAV-styring ikke sparer like mye energi som resultatene i oppgaven viser. Dette kan tyde på feil internlaster i referansebygget.
- Ved delvis oppvarming via ventilasjon er det utfordrende å oppnå optimal fordeling mellom levert varme fra radiator og luftstrømmer og energiforbruket øker.
- Alle tiltakene, med unntak av delvis oppvarming via ventilasjon, har positiv netto nåverdi, lav tilbakebetalingstid og reduserer klimafotavtrykket sammenlignet med dagens drift.

Analyse av resultater fra den anbefalte tiltakspakken og diskusjon har ført til følgende funn:

- Den anbefalte tiltakspakken består av utskiftning av ventilasjonsaggregat, VAV-styring og kontroll av avtrekkstemperatur. Tiltakspakken reduserer fjernvarmeforbruket med 70 % og elektrisitetsforbruket med 10 %. Dette resulterer i total reduksjon i energiforbruket på 27 %. Tiltakspakken opprettholder et tilstrekkelig inneklima, er lønnsom med tilbakebetalingstid rundt 4 år og reduserer klimafotavtrykket.
- Bruk av et referansebygg som vurderingsgrunnlag gir resultater som kun er gyldige for referansebygget, og det er ikke gitt at tiltakspakken fungerer for samtlige bygg i bygningskohorten.

Resultatene viser stort potensiale for energiøkonomiske tiltak som opprettholder et godt inneklima og har tilbakebetalingstid under 5 år, samtidig som de reduserer NTNU sitt klimafotavtrykk. Det vil likevel være utfordrende å nå målet til NTNU på 50 % reduksjon av energiforbruket for denne bygningskohorten, grunnet det høye elektrisitetsforbruket. Det anbefales at NTNU undersøker

## KAPITTEL 9: KONKLUSJON

muligheten for implementering av anbefalt tiltakspakke i hvert bygg i bygningskohorten, ved å lage IDA ICE modeller for hvert bygg. Dette vil resultere i plausible resultater for energi, effekt, inneklima, klimafotavtrykk og lønnsomhet.

### 10 Videre arbeid

Selv om det er anbefalt en tiltakspakke for bygningskohorten, finnes potensiale for videre arbeid. Det kan utføres undersøkelser for å sikre at resultatene er mer kredible, samtidig kan ytterligere tiltak utvikles og testes for å forbedre tiltakspakken.

For å få plausible resultater for energi og effekt bør datagrunnlag for de ulike energipostene i bygningskohorten innhentes. Da kan referansebygget kalibreres slik at det representerer bygningskohorten bedre. På den andre siden kan det være gunstig å stoppe arbeidet med referansebygget, og heller innhente datagrunnlag for byggene med størst energiforbruk til fjernvarme og oppvarmingssystem og luftbehandling (HVAC). Da kan IDA ICE-modeller etableres for byggene med størst energisparepotensial. Dette vil være den beste måten å sikre at resultatene for inneklimate er korrekte, samtidig som tiltakene kan tilpasses de faktiske bygg. Dette vil både optimalisere energibesparelsene og sikre plausible resultater for lønnsomhet og klimafotavtrykk.

Videre utvikling av tiltak bør inkludere tiltak som reduserer effekttoppene for fjernvarme og elektrisitet slik at brukstiden øker. Dette kan for eksempel være forskjellige styringsstrategier eller termisk lagring.

For å sikre lønnsomhet kan prismodellene forbedres. Strømprisen varierer i løpet av dagen etter værforhold, tilbud og etterspørsel. Energikostnadene for strøm og fjernvarme kan med fordel beregnes separat. De forbedrede prismodellene bør variere etter sesong og i løpet av en dag, for å beregne den faktiske årlige energikostnaden.

Det er sannsynlig at den anbefalte tiltakspakken er lønnsom. Men det gjenstår en del planleggingsarbeid. Det må undersøkes om det er mulig å gjennomføre tiltakene uten utskiftning av hele kanalnett. I tillegg bør eksakt prisinformasjon innhentes slik at lønnsomheten til tiltaket kan bekreftes. Dersom tiltakspakken ikke er mulig uten utskiftning av kanalnett, må både klimafotavtrykk og lønnsomheten beregnes på nytt, da dette vil føre til økt investeringskostnad og iboende utslipp uten at ytterligere energibesparelser kan forventes.

## Referanser

Aanensen, T., 2020. *Fortsatt veldig lav strømpris*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/artikler-og-publikasjoner/fortsatt-veldig-lav-strompris>

[Funnet 24. september 2021].

Arbeidstilsynet, 1991. *Klima og luftkvalitet på arbeidsplassen*, Trondheim: Gyldendal.

Berthou, T., Stabat, P., Salvazet, R. & Marchio, D., 2013. *Optimal control for building heating: An elementary school case study*. Chambéry, 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, pp. 1944-1951.

Cao, G., 2021. *Heat recovery in ventilation systems*. Trondheim: NTNU.

Copiello, S., 2021. Economic viability of building energy efficiency measures: a review on the discount rate. *AIMS Energy*, 9(2), pp. 257-285.

Date, J., Athienitis, A. K. & Fournier, M., 2015. A study of temperature set point strategies for peak power reduction in residential building. *Energy Procedia*, 78(1), pp. 2130-2135.

Direktoratet for byggkvalitet, 2017. *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/>

[Funnet 8. desember 2021].

Elvia, 2021. *Alt du må vite om ny nettleie for 2022*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://www.elvia.no/nettleie/alt-du-ma-vite-om-ny-nettleie-for-2022/>

[Funnet 8. desember 2021].

Energifakta Norge, 2021. *Kraftproduksjon*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftforsyningen/>

[Funnet 24. september 2021].

Energiloven, 1990. *Fjernvarmeanlegg (LOV-1990-06-29-50)*, Oslo: Lovdata.

## REFERANSER

EnergiNorge, 2020. *Hva er egentlig nettleie og hva påvirker den?*. [Internett]

Tilgjengelig fra:

<https://www.energinorge.no/contentassets/ecb78680d7484879b1385d1f61aa766f/hva-er-egentlig-nettleie-og-hva-pavirker-den.pdf>

[Funnet 27. september 2021].

Enova, 2016. *Balansert ventilasjon*. [Internett]

Tilgjengelig fra: [https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/oppgradere-huset/balansert-ventilasjon/?gclid=CjwKCAjwy7CKBhBMEiwA0Eb7akFrC6TzFEHI0myijmMBVh\\_wN4hAqmSr1BCVuv9lWXnx77xCBacYiBoCDCkQAvD\\_BwE](https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/oppgradere-huset/balansert-ventilasjon/?gclid=CjwKCAjwy7CKBhBMEiwA0Eb7akFrC6TzFEHI0myijmMBVh_wN4hAqmSr1BCVuv9lWXnx77xCBacYiBoCDCkQAvD_BwE)

[Funnet 23. september 2021].

Enova, 2021. *Næringsbygg*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://www.enova.no/kunnskap/naringsbygg/>

[Funnet 23. september 2021].

EQUA Simulation AB, 2013. *User Manual, IDA Indoor Climate and Energy, Version 4.5*, Solna: 2013 EQUA Simulation AB.

EU, 2010. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Union*, 19. Mai, pp. 13-35.

FHI, 2018. *Inneklima og helseplager*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://www.fhi.no/ml/miljo/inneklima/fremhevede-artikler-inneklima-og-helse/inneklima-og-helseplager-ny/>

[Funnet 8. desember. 2021].

Fufa, S. M. et al., 2016. *A Norwegian ZEB Definition Guildeline*, Trondheim: SINTEF Academic Press.

Gravdahl, J. T., 2016. *Kybernetikk introduksjon: innføring i dynamikk og reguleringssteknikk*, Trondheim: NTNU.

## REFERANSER

- Grini, G., Oksvold, I. & Ruth, S. A., 2017. *Potensialstudie: Kostnadseffektive energitiltak i eksisterende bygninger*, Oslo: Lavenergiprogrammet.
- Hensen, J. L. & Lamberts, R., 2011. Introduction to building performance simulation. I: J. L. Hensen & R. Lamberts, red. *Building Performance Simulation for Design and Operation*. Oxon: Spon Press, pp. 1-15.
- Hofstad, K., 2019. *Effekt*. [Internett]  
Tilgjengelig fra: <https://snl.no/effekt - energi>  
[Funnet 8. desember 2021].
- Holstad, M., 2022. *Ny strømprisrekord i 1. kvartal*. [Internett]  
Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/energi/statistikk/elektrisitetspriser/artikler/ny-stromprisrekord-i-1.kvartal>  
[Funnet 27. mai 2022].
- Ingebrigsten, S., 2019. *Ventilasjonsteknikk Del I*. 2019 red. Oslo: Skarland Press.
- Kang, J. E., Ahn, K. U., Park, C. S. & Schuetze, T., 2015. Assesment of Passive vs. Active Strategies for a School Building Design. *Sustainability*, 16. November, pp. 15136-15151.
- Kjeken, I., 2021. *Embodied Carbon of Technical Installations in a Norwegian Office and Teaching Building*, Trondheim: NTNU.
- Miljøstatus, 2021. 5. *Klima*. [Internett]  
Tilgjengelig fra: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/miljomal/klima/>  
[Funnet 8. oktober 2021].
- Mysen, M. & Schild, P. G., 2014. *Behovsstyrt ventilasjon, DCV - Forutsetninger og utforming*, Oslo: SINTEF akademisk forlag.
- Novakovic, V., 2021. *Control systems – dynamic characteristics, controller actions and parameters*. Trondheim: NTNU.



## REFERANSER

Novakovic, V. et al., 2007. *Energy Management in Buildings*. 3. utgave red. Trondheim: Universitetsforlaget.

NTNU, 2015. *Miljørapport 2014*, Trondheim : NTNU Økonomi og eiendom.

NTNU, 2020. *Miljøutviklingsplan NTNU*, Trondheim: NTNU.

NVE, 2014. *Analyse av energibruk i undervisningsbygg*, Oslo: NVE.

NVE, 2021. *Langsiktig kraftmarkedsanalyse 2021-2040*, Oslo: NVE.

NVE, 2022. *Hvor kommer strømmen fra?*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energi/energisystem/kraftproduksjon/hvor-kommer-strommen-fra/>

[Funnet 28. januar 2022].

NAAF, 2016. *Varmebalanse*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://www.naaf.no/subsites/drift-og-helse/inneklima-og-hms/temperatur/varmebalanse/>

[Funnet 16. november 2021].

NAAF, 2021. *Inneklima kan påvirkes- de ulike miljøene*. [Internett]

Tilgjengelig fra: [https://www.naaf.no/fokusomrader/inneklima/inneklima\\_innemiljo/inneklima-kan-pavirkes---de-ulike-miljoene/?fbclid=IwAR27Mf2Jr7d47skAcHCuZ\\_-qXSr1C6mLu-oS-NvWamz2co79jDVKTSSeRuQ](https://www.naaf.no/fokusomrader/inneklima/inneklima_innemiljo/inneklima-kan-pavirkes---de-ulike-miljoene/?fbclid=IwAR27Mf2Jr7d47skAcHCuZ_-qXSr1C6mLu-oS-NvWamz2co79jDVKTSSeRuQ)

[Funnet 27. mai 2022].

Rosvold, K. A., 2021. *fjernvarme*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://snl.no/fjernvarme>

[Funnet 5. oktober 2021].

Rosvold, K. A. & Halleraker, J. H., 2021. *Energiøkonomisering*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://snl.no/energi%C3%B8konomisering>

[Funnet 23. september 2021].

## REFERANSER

Standard Norge, 2014. *Inneklimaparametre for dimensjonering og vurdering av bygningers energiytelse inkludert inneluftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustikk*, Oslo: Standard Norge.

Standard Norge, 2020. *Bygningers energiytelse Beregning av energibehov og energiforsyning*, Norge: Standard Norge.

Statkraft Varme, 2021. *Trondheim*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://www.statkraftvarme.no/om-statkraftvarme/fjernvarmeanlegg/trondheim/>  
[Funnet 28. januar 2022].

Statkraft, 2021. *Fjernvarme og strøm - hvordan sammenligne prisen?*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://www.statkraftvarme.no/produkter-og-tjenester/prismodell/fjernvarmepris-vs-strom/>

[Funnet 27. september 2021].

Statkraft, 2021. *Fjernvarmetariff BTIV til næringskunder i Trondheim*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://www.statkraftvarme.no/kundeservice/priser/>

[Funnet 21. februar 2022].

Stortinget, 2016. *Kraft til endring. Energipolitikken mot 2030*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://www.stortinget.no/no/Saker-og-publikasjoner/Vedtak/Vedtak/Sak/?p=65327>

[Funnet 20. september 2021].

Tekna, 2020. *Velg riktige komponenter og plasser dem optimalt*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://www.tekna.no/fag-og-nettverk/bygg-og-anlegg/byggbloggen/velg-riktige-komponenter-og-plasser-dem-optimalt/>

[Funnet 27. september 2021].

Tekna, 2021. *Behovsstyrt ventilasjon*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://www.tekna.no/fag-og-nettverk/bygg-og-anlegg/byggbloggen/behovsstyrt-ventilasjon/>

[Funnet 25. mai 2022].

## REFERANSER

- Tensio, 2022. *Nettleie, priser og avtaler*. [Internett]  
Tilgjengelig fra: <https://ts.tensio.no/kunde/nettleie-priser-og-avtaler>  
[Funnet 24. february 2022].
- The Norwegian EDP Foundation, 2022. *Hva er en EPD?*. [Internett]  
Tilgjengelig fra: <https://www.epd-norge.no/hva-er-en-epd/>  
[Funnet 26. mai 2022].
- Thue, J. V., 2021. *Naturlig ventilasjon*. [Internett]  
Tilgjengelig fra: [https://snl.no/naturlig\\_ventilasjon](https://snl.no/naturlig_ventilasjon)  
[Funnet 23. september 2021].
- Thunshelle, K., 2016. *Oppvarming via tilluft*, Oslo: SINTEF akademisk forlag.
- Trox, 2022. *LEO*. [Internett]  
Tilgjengelig fra: <https://www.trox.no/vav/leo-68facbbe760b27f9>  
[Funnet 28. mai 2022].
- VentiStål AS, 2022. *Environmental Product Declaration: Ventilasjonsaggregat eQ50*, Oslo: Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner.
- Wahlström, Å. & Maripuu, M.-L., 2017. *A method presenting economic rationales for major reduction of energy use in non-residential buildings*, s.l.: CIT Energy Management.
- Wildeboer Bauteile GmbH, 2015. *Umwelt-Produktdeklaration: Runde Volumenstromregler VRE und VR*, Berlin: Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU).
- Yoshino, H., Hong, T. & Nord, N., 2017. IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings— Analysis and evaluation methods. *Energy and Buildings*, 1. Oktober, pp. 124-136.
- Øvrebø, O. A., 2021. *CO<sub>2</sub> i atmosfæren*. [Internett]  
Tilgjengelig fra: <https://energiogklima.no/klimavakten/co2-i-atmosfaeren/>  
[Funnet 8. desember 2021].


## Vedlegg A.1 Kode for beregning av effektpris

Årlig effektpris beregnet med følgende kode i MatLab.

```
1 function tot = effektpris(vektor)
2     tot=0;
3     i=1;
4     for i=1:12
5         if i<5 || i>10
6             if vektor(i)<100
7                 tot = tot + vektor(i)*59;
8             elseif vektor(i)>100 || vektor(i)<400
9                 tot = tot + vektor(i)*49;
10            else
11                tot = tot + vektor(i)*39;
12            end
13        else
14            if vektor(i)<100
15                tot = tot + vektor(i)*39;
16            elseif vektor(i)>100 || vektor(i)<400
17                tot = tot + vektor(i)*33;
18            else
19                tot = tot + vektor(i)*27;
20            end
21        end
22        i=i+1;
23    end

1 function pris = toteffektpris(el, fv)
2     pris = 0;
3     pris = pris + effektpris(el);
4     pris = pris + effektpris(fv);
5     end
6
```

## Vedlegg A.2 Mailutveksling systemair


 Caroline Berntsen Markeng  
Til: mailbox@systemair.no ti. 22.03.2022 13:34

Hei!

Jeg skriver masteroppgave om energieffektivisering og lønnsomhet ved energiltak i universitetsbygg. Jeg lurar i den forbindelse på omtrent hvor mye et ventilasjonsaggregat som håndterer luftmengder opp mot 25 000 m<sup>3</sup>/h koster? Jeg trenger kun et anslag.

På forhånd takk!

Mvh  
Caroline Markeng

 David Brodawski <david.brodawski@systemair.no> ti. 22.03.2022 15:06

Til: Caroline Berntsen Markeng

Hei

Se vedlagte filer for aggregat på 25000m<sup>3</sup>/h  
Et slikt aggregat vil koste ca 350 000,- eks MVA til ventilasjonsentreprenør.

Hvis du vil åpne og eksperimentere litt med ulike konfigurasjoner av Geniox-aggregatene våre, kan du laste ned **Systemair**CAD fra våre [nettsider](#), og åpne .dxf filen vedlagt.

Bare ta kontakt om det er noe annet jeg kan bistå med.

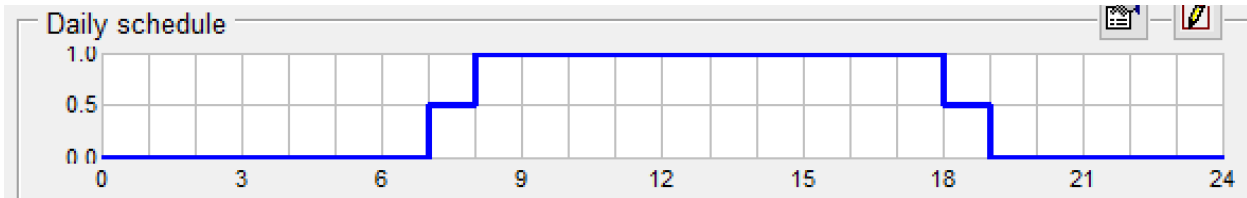
Med vennlig hilsen / Best regards

David Brodawski  
regionsjef

## Vedlegg A.3 Brukermønsterprofil

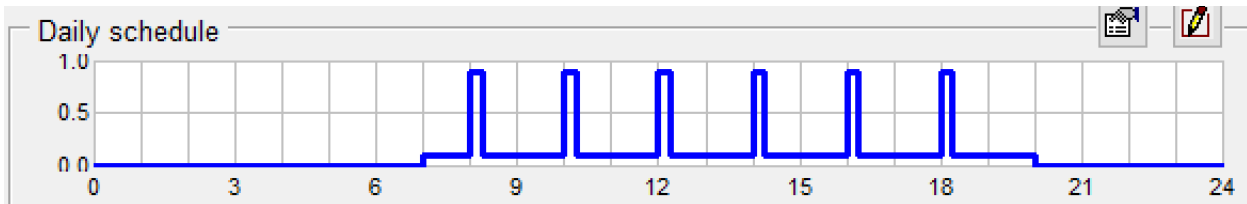
I dette vedlegget presenteres daglig bruksmønster, samt unntaksregler, for alle soner.

### Labsoner



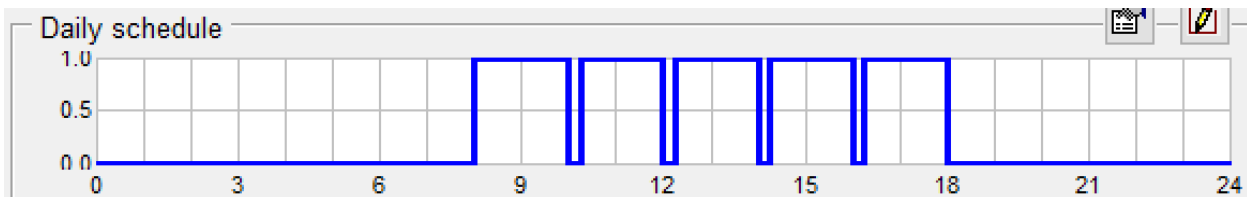
```
from 21 Dec to 31 Dec All days: 0 (rule-6)
from 1 Jan to 8 Jan All days: 0 (rule-5)
from 10 Jul to 28 Jul All days: 0 (rule-3)
Weekends & Holidays: 0
```

### Trafikksoner



```
from 21 Dec to 31 Dec All days: 0 (rule-5)
from 1 Jan to 8 Jan All days: 0 (rule-4)
from 9 Jun to 15 Aug All days: 0 (rule-3)
Weekends & Holidays: 0
```

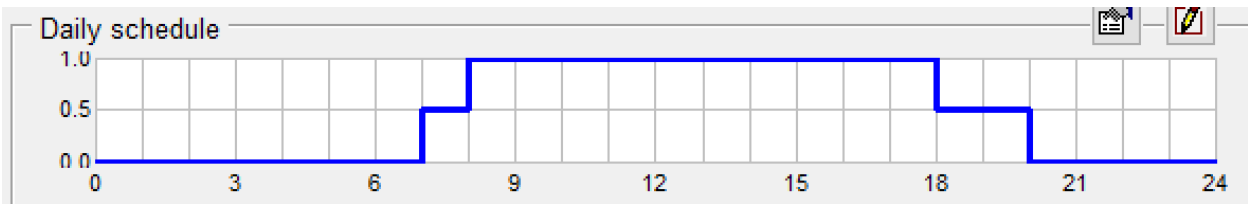
### Forelesningssoner



```
from 21 Dec to 31 Dec All days: 0 (rule-5)
from 1 Jan to 8 Jan All days: 0 (rule-4)
from 9 Jun to 15 Aug All days: 0 (rule-3)
Weekends & Holidays: 0
```

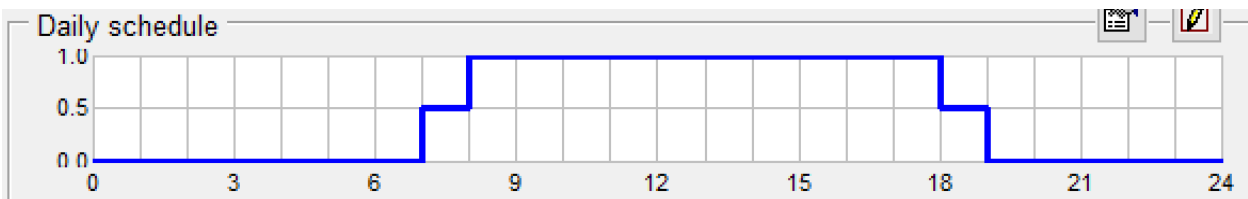
# VEDLEGG

## Lesesalsone



```
from 21 Dec to 31 Dec All days: 0.1 [8-18], 0 otherwise (rule-7)
from 1 Jan to 8 Jan All days: 0.1 [8-18], 0 otherwise (rule-6)
from 9 Jun to 15 Aug All days: 0.1 [8-18], 0 otherwise (rule-5)
from 15 May to 9 Jun All days: 0.5 [7-8, 18-22], 1.25 [8-18], 0 otherwise
from 29 Nov to 21 Dec All days: 0.5 [7-8, 18-22], 1.25 [8-18], 0 otherwise
Weekends & Holidays: 0.1 [8-18], 0.0 otherwise
```

## Kontorsone



```
from 21 Dec to 31 Dec All days: 0.1 [9-15], 0 otherwise (rule-5)
from 1 Jan to 8 Jan All days: 0.1 [9-15], 0 otherwise (rule-4)
from 10 Jul to 28 Jul All days: 0.1 [9-15], 0 otherwise (rule-3)
Weekends & Holidays: 0.1 [9-15], 0 otherwise
```





