

Ragna Ness Gjerstad

Muligheter for energieffektivisering og reduksjon av effekttopper i eksisterende bygninger

Masteroppgave i Energi og Miljø

Veileder: Natasa Nord

Juni 2021

Ragna Ness Gjerstad

Muligheter for energieffektivisering og reduksjon av effektopper i eksisterende bygninger

Masteroppgave i Energi og Miljø
Veileder: Natasa Nord
Juni 2021

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk
Institutt for energi- og prosessteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Forord

Denne rapporten er en avsluttende masteroppgave ved instituttet for energi- og prosesssteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, og står for 30 studiepoeng.

Jeg vil begynne med å takke veileder Natasa Nord for gode innspill og tilbakemeldinger gjennom perioden. At jeg fikk muligheten til å kunne skrive en masteroppgave som jeg føler har forberedt meg bedre på arbeidsoppgavene i det kommende arbeidslivet er jeg svært takknemlig for. Takk til Ph.d-stipendiantene Haoran Li og Juan Hou for sine innspill under møtene våre.

En stor takk rettes også til familien min for å alltid komme med gode oppmuntringer og motiverende ord når jeg står litt fast. En spesiell stor takk til mamma Tone som har vært veldig hjelpsom den siste måneden, og Sondre som alltid er der for en prat og får meg i godt humør.

Til slutt må jeg si tusen, tusen takk til mine studievenner som har vært en enorm støtte gjennom en litt annerledes masterperiode enn hva vi så for oss, og som har vært gode sparingspartnere både gjennom masteroppgaven. Det er takket være dere at studietiden ble så bra! Jeg vil rette en spesiell takk til min romvenninne og “coach” Frida som har vært en stor emosjonell støtte gjennom det siste årets opp- og nedturer og “lock downs”.

Trondheim, 11.06.2021

Ragna Ness Gjerstad

Innhold

| | |
|--|-----------|
| Forord | i |
| Sammendrag | iv |
| Summary | v |
| Forkortelser og lister | vi |
| 1 Introduksjon | 1 |
| 1.1 Bakgrunn og motivasjon | 1 |
| 1.2 Problemstilling | 2 |
| 1.3 Begrensninger | 2 |
| 1.4 Struktur på rapport | 3 |
| 2 Energiøkonomisering av bygninger | 4 |
| 2.1 Økonomisk motivasjon ved energisparing | 4 |
| 2.1.1 Økonomiske barrierer for energieffektivisering | 5 |
| 2.1.2 Lønnsomhet ved energieffektivisering | 5 |
| 2.1.3 Kostnader ved energibruk | 6 |
| 2.2 Effektförbruk | 7 |
| 2.3 Energibruk i Norges bygningsmasse | 8 |
| 2.3.1 Potensialet for energisparing | 9 |
| 2.3.2 Energikarakterer i bygninger | 10 |
| 2.4 Varmebehov i bygninger | 11 |
| 2.4.1 Termisk komfort | 12 |
| 2.4.2 Fjernvarme som varmekilde | 13 |
| 2.5 Tekniske systemer i bygninger | 14 |
| 2.5.1 Ventilasjon | 14 |
| 2.5.2 Tappevann | 15 |
| 2.5.3 Kontrollsystemer | 15 |
| 2.5.4 Varmegjenvinning | 17 |
| 2.6 Tiltak for energieffektivisering | 18 |
| 2.7 Bygningssimulering for energiøkonomisering | 19 |
| 2.7.1 Simuleringsprogrammet - IDA ICE | 19 |
| 2.7.2 Ventilasjon og atmosfærisk miljø | 20 |
| 2.7.3 Varme og termisk miljø | 20 |
| 3 Metode | 21 |
| 3.1 Overordnet metode | 21 |
| 3.2 IDA ICE-modeller og simulerte ENØK-tiltak | 22 |
| 3.3 Lønnsomhetsanalyse | 27 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4 | Referansemodell som utgangspunkt for simuleringer | 29 |
| 4.1 | Presentasjon av referansemodell for en typisk bygning på Gløshaugen | 29 |
| 4.2 | Helhetlig vurdering av referansemodellen | 35 |
| 4.3 | Kalibrering av referansemodellen | 35 |
| 5 | Resultater fra simuleringer av ENØK-tiltak | 38 |
| 5.1 | Basemodellen | 38 |
| 5.2 | Modell 1 | 39 |
| 5.3 | Modell 2 | 42 |
| 5.4 | Modell 3 | 43 |
| 5.5 | Modell 4 | 45 |
| 5.6 | Modell 5 | 46 |
| 5.7 | Modell 6 | 47 |
| 5.8 | Modell 7 | 49 |
| 5.9 | Modell 8 | 55 |
| 5.10 | Modell 9 | 56 |
| 5.11 | Modell 10 | 58 |
| 5.12 | Oppsummering av økonomisk analyser for modellene | 59 |
| 5.13 | Oppsummering tiltakenes vurdering | 60 |
| 6 | Resultat fra simulering av den endelige modellen | 61 |
| 6.1 | Implementerte tiltak i Endelig modell | 61 |
| 6.2 | Energianalyse av den endelige modellen | 61 |
| 6.3 | Lønnsomhetsanalyse for den endelige modellen | 64 |
| 6.4 | Potensiell energiforbruk og lønnsomhet ved sammenslåing av modeller | 65 |
| 7 | Diskusjon | 67 |
| 7.1 | Aktuelle tiltak for implementering på Gløshaugen | 67 |
| 7.2 | Usikkerheter | 69 |
| 8 | Konklusjon | 70 |
| 9 | Videre arbeid | 72 |
| A | Utklipp av NS-EN 16798 | A-1 |
| B | Økonomisk analyse av tiltak og modeller | B-1 |

Sammendrag

Energibruk i bygninger står for 40 % av Norges totale energiforbruk og behovet er økende. Med økt energiforbruk øker belastningen på dagens strømnnett som skal levere nok strøm til kundene, og en planlagt utbygging av strømnettet vil finansieres ved å øke strømkundenes nettleie. Å redusere energi- og effektbehovet i bygningsmassen ved energiøkonomiserende (ENØK) tiltak er viktig for å minske belastningen på nettet, sikre god forsyningssikkerhet og utsette utbyggingen av strømnettene og naturinngrepene dette medfører. For å møte de økonomiske barrierene ved energieffektivisering som samfunnet står ovenfor i dag, må gode analyser av energisparende tiltak og deres lønnsomhet gjennomføres, ved eksempelvis bygningssimuleringsverktøy.

Norges tekniske- og naturvitenskapelige universitet (NTNU) har i sin miljøutviklingsplan mot 2030 en målsetning om å redusere eget forbruk med minimum 50 % per årsverk i forhold til 2019. To delmål går ut på å forbedre bygningsmassens energikarakter og identifisere og implementere ENØK-tiltak med lavere tilbakebetalingstid enn 5 år. Målet med denne rapporten var å identifisere lønnsomme ENØK-tiltak som vil være aktuelle for implementering på Gløshaugens bygningsmasse, ved bruk av simuleringsverktøyet IDA ICE.

En modell av en typisk bygning på Gløshaugen fra en tidligere masteroppgave lagd i 2018 var utgangspunktet for simuleringene. Denne modellen skulle bli kalibrert og brukt som en “basemodell” for videre simuleringer. ENØK-tiltakene skulle føre til lavere elektrisitets- og fjernvarmeforbruk og forbedret innelima, samtidig som at de skulle gi positiv nåverdi og lav tilbakebetalingstid. Det var også interessant å undersøke hvordan kombinasjoner av tiltak påvirket lønnsomheten. Til slutt skulle de mest aktuelle tiltakene for Gløshaugens bygningsmassen simuleres i en “endelig modell” (EM).

Ti ulike tiltak ble simulert alene eller i kombinasjoner i ti IDA ICE modeller. Resultatet av den endelige modellen var et spesifikt energiforbruk på 169,2 kWh/m², som var en reduksjon på 31,6 % sammenlignet med basemodellens 247,3 kWh/m². Dette endret energikarakteren fra F i basemodellen til D i den endelige modellen. Det spesifikke fjernvarmeforbruket i EM ble 49,2 kWh/m² og spesifikt elektrisitetsforbruk ble 120,0 kWh/m², tilsvarende en reduksjon på hhv. 56,6 % og 11,4 %. Den termiske komforten ble også forbedret. Lønnsomhetsanalysen viste at kombinasjonen av tiltakene var ga positiv nåverdi og en tilbakebetalingstid på 0,2 år.

Fra den endelige modellen ble det klart at følgende tiltak bør vurderes for implementering i Gløshaugens bygningsmasse: 1) implementere eller erstatte varmevekslere i ventilasjonsanleggene for å øke virkningsgraden i systemet, 2) erstatte viftene i ventilasjonsanleggene for å øke virkningsgraden i systemet, 3) tilpasse temperaturene i vannanleggene og radiatorene mot lavtemperatur fjernvarme og la tappevann varmes opp av elektriske kjeler. Simuleringene viste også at forbedrede eller kalibrerte kontrollsystemer kan gi god energisparing, men dette er tiltak hvis resultat vanskelig kan sammenlignes direkte mot de eksisterende systemene på Gløshaugen slik simuleringsgrunlaget foreligger i dag. Renovering av bygningskroppens tak og vinduer kan gi bygningsmassen energikarakter C, men tilbakebetalingstid nærmere 5 år og mulig forstyrrelser i driften av universitetsbyggene gjør tiltakene mindre attraktive enn de foreslåtte tiltakene.

Summary

Energy consumption in buildings accounts for 40 % of Norway's total energy consumption and the demand is increasing. Reduction of energy demand in buildings is an important measure to reduce the load on the electricity grid. Energy consumption is increasing, leading to a need for an upgrade of the electricity grid, which will be financed through increased network tariff. In order to meet the economic barriers for energy efficiency that society faces today, good analyzes of energy-saving measures and profitability must be carried out, for example through building simulations.

In 2020, the Norwegian University of Science and Technology (NTNU) published an environmental development plan for the university towards 2030. NTNU has a goal of reducing its energy consumption by a minimum of 50 % each year compared to 2019. Two sub-goals are to improve the energy character of the building stock and identify and implement energy saving measures with payback period lower than 5 years. The aim of this report was to identify profitable energy measures that will be relevant for implementation on Gløshaugen's building stock, using the simulation tool IDA ICE.

A model of a typical building on Gløshaugen from a previous master's thesis made in 2018, was the starting point for the simulations. This model was to be calibrated and used as a "base model" for further simulations. The energy efficiency measures would lower electricity and district heating consumption and an improved indoor climate, at the same time as they were to provide a positive present value and a low payback period. It was also interesting to investigate how combinations of measures affected profitability. Finally, the most relevant measures for the building stock at Gløshaugen's were to be simulated in a "final model" (FM).

Ten different energy saving measures were simulated alone or in combinations in ten IDA ICE models. The result of the final model was a specific energy consumption of 169.2 kWh/m², which was a reduction of 31.6 % compared to the base model's 247.3 kWh/m². This changed the energy rating from F in the base model to D in the final model. The specific district heating consumption in FM was 49.2 kWh/ m² and specific electricity consumption was 120.0 kWh/m². The thermal comfort was also improved. The profitability analysis showed that the combination of the measures gave a positive present value and a payback period of 0.2 years.

From the final model it became clear that the following measures should be considered for implementation in Gløshaugen's building stock: 1) implement or replace heat exchangers in the ventilation systems to increase the efficiency of the system, 2) replace the fans in the ventilation systems to increase the efficiency of the system, 3) adjust the temperatures in the water plant and radiators towards low temperature district heating, and allow tap water to be heated by electric boilers. The simulations also showed that improved or calibrated control systems can provide good energy savings, but these are measures whose results hardly be compared directly with the existing systems at Gløshaugen as the simulation basis is today. Renovation of the building's roofs and windows can give the building mass an energy rating of C, but the payback period is closer to 5 years and possible disruptions in the operation of the university buildings make the measures less attractive than the proposed measures.

Forkortelser

| | | |
|---------|---|---|
| AHU | – | Ventilasjonssystem, (eng.: “air handling unit”) |
| BM | – | Basemodell |
| BPS | – | Bygningsytelsessimulering (eng.: “building performance simulation”) |
| CAV | – | Konstant luftmengde (eng.: “constant air volume”) |
| COP | – | Effektfaktor (fra engelsk “coefficient of performance”) |
| DCV | – | Behovstyrt kontroll-ventilasjon (eng.: “demand control volume”) |
| ENØK | – | Energiøkonomoisering |
| EL | – | Elektrisitet |
| FV | – | Fjernvarme |
| HVAC | – | Varme, ventilasjon og air condition (H eng.: “heat”) |
| IDA ICE | – | IDA Indoor Climate and Energy |
| LTFV | – | Lavtemperatur fjernvarme |
| M# | – | Modell *nummer* |
| NPV | – | Nåverdimetoden (eng.: “Net present value”) |
| NVE | – | Norges vassdrags- og energidirektorat |
| PMV | – | Forutsatt gjennomsnittlig stemme (eng.: “predicted mean vote”) |
| PPD | – | Prosentandel misfornøyde personer (eng.: “percentage of dissatisfied people”) |
| T# | – | Tiltak *nummer* |
| TEK | – | Byggteknisk forskrift |
| UT | – | Uakseptable temperaturtimer |
| VAV | – | Vairabel luftmengde (eng.: “variable air volume”) |

Symboler

| | | |
|---|---|---|
| B | – | Energikostnad [kr] |
| I | – | Investeringskostnad [kr] |
| N | – | Økonomisk levetid [år] |
| r | – | Diskonteringsrente |
| U | – | Varmeoverføringstall [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] |

Figurliste

| | | |
|--------|---|----|
| 2.2.1 | Høyeste effekttopp i det norske strømmettet per år, fra 1980 - 2019 | 7 |
| 2.2.2 | Døgnprofiler for effekt for ulike forbrugssegmenter i Stor-Oslo | 8 |
| 2.4.1 | PPD som en funksjon av PMV | 12 |
| 2.5.1 | Blokkdiagram for åpen sløyfe-kontroll | 16 |
| 2.5.2 | Blokkdiagram for lukket sløyfe-kontroll | 16 |
| 2.5.3 | Illustrasjon av funksjonene i en PID-kontroller | 17 |
| 4.1.1 | Referansemodellen i IDA ICE | 31 |
| 4.1.2 | Referansemodellens planløsning i IDA ICE | 31 |
| 4.3.1 | Eksempel på avvik i effektmålinger fra Schneider Electric | 36 |
| 4.3.2 | Sammenligning av faktisk og simulert elektrisitetsforbruk | 36 |
| 4.3.3 | Sammenligning av faktisk og simulert fjernvarmeforbruk | 37 |
| 5.6.1 | Fordeling av varme fra radiatorer og varmebatteri i ventilasjon i BM. | 46 |
| 5.6.2 | Fordeling av varme fra radiatorer og varmebatteri i ventilasjon i M5. | 46 |
| 5.7.1 | Varighetskurve for levert varme til sone under testing av PI-kontroller | 48 |
| 5.8.1 | Analyse av termisk komfort for sone Forelesning 1 i BM | 50 |
| 5.8.2 | Analyse av termisk komfort for sone Forelesning 1 i M7 | 50 |
| 5.8.3 | Utklipp av vannanlegget i IDA ICE | 52 |
| 5.8.4 | Varighetskurve for temperatur fra kjel til radiator og tappevann i BM og M7 | 52 |
| 5.8.5 | Simulert massestrøm i vannanlegget for BM og M7. | 53 |
| 5.12.1 | Grafisk fremstilling av tiltakenes nåverdi | 59 |
| 5.12.2 | Grafisk fremstilling av modellenes nåverdi | 59 |
| 6.2.1 | Sammenligning av den endelige modellens totale energibehov mot tidligere modeller | 62 |
| 6.2.2 | Sammenligning av den endelige modellens totale elektrisitetsbehov mot tidligere modeller | 62 |
| 6.2.3 | Sammenligning av den endelige modellens spesifikke energibehov mot tidligere modeller | 63 |
| 6.2.4 | Sammenligning av den endelige modellens høyeste målte topplast for varme til alle soner mot tidligere modeller | 63 |
| 6.2.5 | Sammenligning av den endelige modellens sum av uakseptable temperaturtimer fordelt etter sonekategori mot tidligere modeller. | 64 |
| 6.3.1 | Grafisk fremstilling av nåverdien til M1 - 10 og EM | 64 |

Tabelliste

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Teknisk og realistisk potensial for energibesparing i norske bygg, mellom årene 2010 - 2020 | 10 |
| 2.2 | Minstekrav for spesifikt energiforbruk for de syv energikarakterene for bygninger | 10 |
| 2.3 | Minimumskravet for U-verdier i bygningskonstruksjonen i TEK 17 | 11 |
| 3.1 | Oversikt over de ti implementerte tiltakene i de ti IDA ICE-modellene | 27 |
| 4.1 | Oversikt over bygningene som inngår i kohorten 1951 - 1970, med angitt byggeår, oppvarmet bruksareal, og bruksområde [6] | 30 |
| 4.2 | U-verdier og inngangsparametre i IDA ICE for bygningskroppen til referansemodellen [6] | 31 |
| 4.3 | Prosentvis sonefordeling i kohorten | 31 |
| 4.4 | Prosentvis sonefordeling i referansemodellen | 31 |
| 4.5 | Inngangsparametere for ventilasjonsanleggene i referansemodellen [6] | 32 |
| 4.6 | Dimensjonering av radiatorer i IDA ICE Modell 1018 [6] | 33 |
| 4.7 | Oversikt over tiltakene som ble testet i Master 2018 [6] | 34 |
| 4.8 | Resultater fra ENØK-tiltak i referansemodellen, 1 [6] | 34 |
| 4.9 | Resultater fra ENØK-tiltak i referansemodellen, 2 [6] | 34 |
| 4.10 | Sammenligning av spesifikt energiforbruk og avvik fra simulert til faktisk forbruk | 37 |
| 5.1 | Basemodellens spesifikke energi-, fjernvarme- og elektrisitetsbehov. | 38 |
| 5.2 | Maksimalt målte pumpeeffekt, mengde elektrisk energi til pumpene, og gjennomsnittlig massestrøm i modellens vannanlegg | 38 |
| 5.3 | Basemodellens målte maksimale varmeeffekt og levert varme fra radiatorene, og summen av uakseptable temperaturtimer for hver sone i modellen. | 39 |
| 5.4 | Endring i varmetap og varmetilførsel ved nye vinduer i M1 | 40 |
| 5.5 | Dimensjonering av radiatorkapasitet i Master 2018 og M1 | 40 |
| 5.6 | Energi- og lønnsomhetsresultat for M1 | 41 |
| 5.7 | Energi- og lønnsomhetsresultat for M2 | 42 |
| 5.8 | Endring i energiforbruk og massestrøm i M3 sammenlignet mot M2 og BM . . | 44 |
| 5.9 | Energi- og lønnsomhetsresultat for M3 | 44 |
| 5.10 | Energi- og lønnsomhetsresultat for M4 | 45 |
| 5.11 | Energi- og lønnsomhetsresultat for M5 | 47 |
| 5.12 | Energi- og lønnsomhetsresultat for M6 | 49 |
| 5.13 | Temperaturområdene for de fire kategoriene for termisk komfort | 51 |
| 5.14 | Sammenligning av energiforbruk i M6 med og uten LTFV implementert i modellen | 54 |
| 5.15 | Energi- og lønnsomhetsresultat for M7 | 54 |
| 5.16 | Energi- og lønnsomhetsresultat for M8 | 56 |
| 5.17 | Ny dimensjonerende radiatorstørrelse ved implementert LTFV. | 57 |
| 5.18 | Energi- og lønnsomhetsresultat for M9 | 57 |
| 5.19 | Energi- og lønnsomhetsresultat for M10 | 58 |
| 6.1 | Endring i spesifikt energiforbruk i EM sammenlignet med BM | 61 |
| 6.2 | Energireduksjon og energikarakter til tre potensielle kombinasjoner av tiltak fra tidligere modeller | 65 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 6.3 | Lønnsomhetsanalyse for EM og de potensielle sammensetningen av modeller | 66 |
| B.1 | Økonomisk analyse av tiltak med investeringskostnader og alle modellene ved bruk av nåverdimetoden, en forenklet tilbakebetalingsmetode og antall år med gevinst. Her presenteres også antatt investeringskostnad, energibesparelse, energikostnadsbesparelse og økonomisk levetid | B-1 |

Kapittel 1

Introduksjon

1.1 Bakgrunn og motivasjon

Energibruk i bygninger står for 40 % av verdens totale energiforbruk, og energibehovet er økende.[1] For å nå Parisavtalens mål om å fortrinnsvis begrense den globale oppvarmingen til 1,5 °C, må verdens CO₂-fotavtrykk reduseres og forbruk av ressurser må bli bærekraftig. Dette er mulig ved å bl.a. fase ut bruk av fossilt brennstoff, forbruk av energi må ned, og energien som brukes må utnyttes bedre.

Også i Norge går ca. 40% av det totale elektrisitetsforbruket til boliger og bygg i kommersiell sektor. I 2018 utgjorde dette ca. 53 TWh elektrisitet.[1, 2] Byggtekniske forskrifter stiller større og større krav til energieffektive nybygg som i de siste årene har ført til en reduksjon i spesifikt energiforbruk for husholdninger, og en stagnering i tjenesteytende bygninger. Mot 2040 er det forventet at spesifikt energiforbruk synker grunnet strengere krav til byggekrav og effektivt energibruk i nye bygninger, og bedre tekniske løsninger for energisparing og renovering av eksisterende bygg.[3]

I 2017 satte Stortinget et mål om en energisparing på 10 TWh i eksisterende bygningsmasse innen 2030. Denne energisparingen må skje ved strenge energikrav til nybygg, rehabilitering av eksisterende byggemasse, og effektiv drift for å unngå sløsing av energi. Energiøkonomisering og lønnsomhet er drivkrefter som står svært sentralt for energieffektivisering. Aktører som utbyggere, byggeiere og leietakere må samarbeide for å investere i energisparende tiltak, og god energiledelse og energisparende drift. Kunnskap om energieffektivisering er også en avgjørende faktor for å nå Stortingets energisparingsmål. [4]

Norges tekniske- og naturvitenskapelige universitet (NTNU) har som målsetning å være et foregangsuniversitet, som bruker forskningsbasert kunnskap i egen praksis for å sikre en gjennomgående miljøforsvarlig virksomhet. I NTNUs miljøutviklingsplan mot 2030 er målsetningen knyttet til energi å redusere eget forbruk med minimum 50 % per årsverk i forhold til 2019. To av tiltakene for å nå målet er å gjennomføre en spesifikk vurdering av tiltak for å redusere energiforbruk i alle NTNUs bygg, og identifisere og implementere energiøkonomiseringstiltak med lavere tilbakebetalingstid enn 5 år.[5]

Våren 2018 ble en masteroppgave om Gløshaugens bygningsmasse skrevet av to studenter fra NTNU [6]. Rapporten presenterte fire kohorter for bygningsmassen etter byggeår, og det ble lagd referansem modeller i simuleringverktøyet IDA ICE for hver kohort. Disse modellene ble simulert med noen større energieffektiviserende tiltak hovedsaklig basert på bygningskonvolutten, som utskiftning av vinduer og etterisolering av yttervegger og tak. Denne rapporten er en videreutvikling av én av referansem modellene fra masteroppgaven i 2018, som denne rapporten blir referert til som "Master 2018".

Motivasjonen for denne rapporten er å finne flere små tiltak for energisparing- og effektivisering som først og fremst ikke har innvirkning på den normale driften på Gløshaugen. I tillegg skal det gjennomføres en lønnsomhetsanalyse for tiltakene for å vurdere hvilke tiltak som kan være aktuelle for implementering på Gløshaugen. Enkelte større tiltak vil også bli evaluert i kombinasjon med mindre tiltak for å se hvordan lønnsomheten påvirkes.

1.2 Problemstilling

Problemstillingen for denne oppgaven var å kartlegge tiltak for energiseffektivisering og analysere tiltakenes lønnsomhet for bygningsmassen på Gløshaugen. Energisparingspotensialet skal finnes ved å bruke simuleringsverktøyet IDA ICE. For løse problemstillingen skal også følgende delmål gjennomføres:

- Bli kjent med datagrunnlaget for en referansem modell fra en masteroppgave fra 2018, kalibrere modellen i IDA ICE, og identifisere ENØK-tiltak som kan være aktuelle for simulering
- Simulere de planlagte ENØK-tiltakene og kombinasjoner av disse i IDA ICE
- Finne tiltak for å motvirke problemer eller utfordringer som dukker opp underveis i analysene
- Tiltakenes lønnsomhet skal beregnes ved bruk av nåverdi- og tilbakebetalingmetoden, og det skal bli foreslått tiltak som kan være aktuelle for miljøutviklingsplanen på NTNU Gløshaugen

1.3 Begrensninger

Rapporten fra 2018 delte Gløshaugens bygningsmasse inn i fire kohorter, og det ble lagd en referansem modell for hver kohort i IDA ICE. Disse modellene ble delt inn i kohorter basert på byggeår:

- Referansem modell 1: før 1950
- Referansem modell 2: 1951 - 1970
- Referansem modell 3: 1971 - 1999
- Referansem modell 4: 2000 - 2020

I denne rapporten vil kun referansem modell 2 videreutvikles grunnet tidsbegrensning og mange planlagte tiltak. Denne kohorten hadde flest antall bygg og var også hovedfokuset i Master 2018, og omfanget av simuleringene ville også blitt for store for alle referansem modellene. Det er kun tiltak som kan simuleres i IDA ICE som er vurdert; dette utelukker tiltak som EOS og energiledelse.

1.4 Struktur på rapport

Kapittel 2 presenterer teoretisk bakgrunn for energiøkonomisering i bygninger, energibehovets fordeling innen varme og elektrisitet, og tekniske systemer som er aktuelle for energisparing. Her presenteres også ulike tiltak for energieffektivisering og hvordan tiltakenes virkning kan predikeres ved bruk av simuleringsverktøyet IDA ICE.

Kapittel 3 er et metodekapittel som presenterer den overordnede metoden brukt i rapporten, i tillegg til en beskrivelse av hensikten og metoden for de ulike ENØK-tiltakene i IDA ICE-modellene og lønnsomhetsanalysene som ble gjort.

kapittel 4 er en detaljert beskrivelse av referansemodellen i IDA ICE som denne oppgaven bygger videre på. Her presenteres datagrunnlag for oppsett av modellens geometri, sonefordelinger, energiprofiler, og inngangsverdier. I dette kapitlet presenteres også en analyse av referansemodellen, og en kalibrering av modellen for å redusere avviket i energiprofilen mellom faktisk og simulert energiforbruk.

Kapittel 5 presenterer resultatene fra simuleringene av ENØK-tiltakene. For hver simulerte modell presenteres og diskuteres ENØK-tiltakene basert på energi- og lønnsomhetsresultatet. Hver modell oppsummeres med erfaringene fra simuleringene.

Kapittel 6 presenterer resultatet fra simuleringen av den endelige modellen i IDA ICE. Dette er en modell som er basert på erfaringene fra kapittel 5.

Kapittel 7 er et diskusjonskapittel hvor tiltakene i den endelige modellens relevans for NNTUs miljøutviklingsplan blir evaluert, og usikkerheter ved simuleringene blir drøftet.

Kapittel 8 presenterer rapportens konklusjon.

Kapittel 9 presenterer forslag til videre arbeid.

Kapittel 2

Energiøkonomisering av bygninger

Energiøkonomisering, eller “ENØK”, er et begrep som brukes i forbindelse med energieffektivisering, og betyr at energi brukes mer kostnadseffektivt, uten å senke kravet til komfort. Bruk av ny teknologi, mindre sløsing, bedre utnyttelse av hver kWh og bruk av fornybare energikilder er hovedfaktorene i ENØK. Energiøkonomisering er en viktig bidragsyter til å minske energiforbruket, og gjenspeiles blant annet i utviklingen av tekniske byggeforskrifter (TEK). [7]

Energisparing er ikke det samme som energieffektivisering. “Energieffektivisering” har tidligere blitt definert av Olje- og energidepartementet som “et begrep som i sin bredeste forstand betyr at energi skal brukes i den form, mengde og på det tidspunktet som generelt er mest lønnsomt når alle fordeler og ulemper veies mot hverandre”. Den mest økonomiske bruken av energi avhenger av en sammenligning av energibærere i nettet, som eksempelvis elektrisitet mot olje og gass. Om mengden energi er lønnsom handler om hvor energien kommer fra; ved for eksempel bruk av flis eller avfall i et fjernvarmenett kan energi fra andre energikilder som vannkraft benyttes til andre formål. Lønnsomhet knyttes til tidspunkt for energibruken og handler om å bruke energi når det er et overskudd i strømmettet, som for eksempel om natten når Norge importerer overskuddsstrøm fra kontinentet. [7] Til sammenligning handler “Energisparing” om å bruke mindre energi, men tar ikke nødvendigvis hensyn til konsekvensene ved energisparingen. Slike konsekvenser kan være knyttet til arbeidsmiljøet, investeringskostnader, driftsforstyrrelser og inneklima.

Det er flere aspekter ved ENØK-tiltak som må vurderes før tiltak iverksettes i et eksisterende bygg, eller i analyser og energiplanlegging av nye bygninger. I dette kapitlet vil noen viktige aspekter av økonomi, effekt- og energibruk knyttet til ENØK presenteres, før bygningssimulering som metode for testing av ENØK-tiltak avslutter kapitlet.

2.1 Økonomisk motivasjon ved energisparing

For de aller fleste bygningseiere handler ENØK-tiltak om å spare energi for å spare penger og ikke nødvendigvis for miljømessige hensyn. Statlige intensiver for støtte til energisparende tiltak på bygninger finnes i dag for å gjøre energisparing mer attraktivt for bedrifter og privatpersoner. Et eksempel er Enova - et selskap eid av Klima- og miljødepartementet som jobber for omstillingen av samfunnet til et lavutslippssamfunn ved å støtte teknologiutvikling og innovasjon for klimagassreducerende løsninger. Enova har gjennom de siste 12 månedene gitt 3,65 milliarder kroner i støtte til over 4200 bygg- og eiendomsrelaterte prosjekter i Norge. [8]

2.1.1 Økonomiske barrierer for energieffektivisering

Det er flere barrierer som i dag hindrer privat- og/eller samfunnsøkonomisk lønnsom energieffektivisering. Med svært lave energipriser sammenlignet med mange andre land, vil energieffektivisering gi lav eller negativ lønnsomhet i noen tilfeller, og høye investeringskostnader vil gi lengre tilbakebetalingstid. I næringsbygg hvor lokaler ofte leies ut kan større renoveringer føre til driftstans eller relokasjon av leietakere, og dermed tapt inntekt for byggeier. Energireduserende tiltak vil også gi gevinst for leietaker og ikke byggeier, da strømregningen blir lavere. En annen utfordring er at energieffektivt utstyr kan ha begrenset funksjonalitet enn tradisjonelt utstyr; det kan være mer komplekst, vanskeligere å bruke, og uhensiktsmessige ulemper som støy og vibrasjoner kan påvirke trivsel og komfort for brukerne av bygget. Ulik grad av informasjon og interesser er også en viktig faktor for gevinst, og i en rapport fra Vista/Thema om energieffektivisering i eksisterende bygg, trekkes "Principal-Agent Problemet" frem; i næringsbygg hvor leietakere (agenten) leier av en byggeier (principal), og de har ulike mål og grader av informasjon om energisparende drift, kan energiforbruket være 15 % høyere enn med riktig kunnskap hos leietakere. Det er derfor viktig for byggeiere og leietakere å undersøke og vite om ulike lønnsomme investeringer og energisparende driftsmetoder for et bygg. [9]

2.1.2 Lønnsomhet ved energieffektivisering

I vurderingen av ENØK-tiltak er det flere metoder for å kalkulere lønnsomhet. "Nåverdi" (NPV) og "tilbakebetalingstid" er to av metodene. Nåverdi er en metode for kostnadsnytte som beregner kapitalverdien av investeringen. Ligningen for beregning av nåverdi er vist i ligning 2.1.1, hvor nåverdien er dagens verdi på pengene, B er netto energikostnad, r er diskonteringsrenten, N er investeringsens økonomiske levetid, og I er investeringskostnaden. I beregninger av nåverdi brukes ofte en statlig diskonteringsrente på 7 %. [7]

$$NVP = B \cdot \frac{1 - (1 + r)^{-N}}{r} - I \quad (2.1.1)$$

Tilbakebetalingstid, eller "pay-back time", er en beregning av refusjonstiden for investert kapital. Ligningen for tilbakebetalingstid er vist i ligning 2.1.2, og en forenklet versjon er vist i ligning 2.1.3. Her står N_0 for tilbakebetalingstiden, B er netto årlig profitt i NOK/år, I er investeringskostnaden og r er diskonteringsrenten. [7]

$$N_0 = \frac{\ln[(1 - (I/B) * r)^{-1}]}{\ln 1 + r} \quad (2.1.2)$$

$$N_0 = \frac{I}{B} \quad (2.1.3)$$

2.1.3 Kostnader ved energibruk

I beregning av lønnsomhet er det flere markedspriser som må tas i betraktning for å vurdere om ENØK-tiltaket er lønnsomt eller ikke. Dette er nettleie, elektrisitetspris, fjernvarmepris og avgifter.

Nettleie

Kommuner og fylkeskommuner eier mesteparten av regionale- og lokale distribusjonsnett, mens nettselskaper drifter strømmettet. Alle privatpersoner og næringer (ikke industri) er koblet til distribusjonsnett, og betaler en nettleie for å kunne benytte strømmettet til å frakte kraft fra kraftprodusenter til strømkundene. Prisen på nettleien bestemmes av hvert enkelt nettselskap, og er i dag en fast pris. En endring av nettleiestrukturen er opp til høring nå i 2021, hvor det fremmes et forslag om å lage en mer dynamisk nettleie som et verktøy for at sluttbrukere skal fordele energibruken mer utover dagen, og dermed unngå store momentane strømmuttak fra nettet. [7, 10]

Elektrisitetspris

Elektrisitetsprisen er prisen på den elektriske kraften i strømmettet. Strømprisen er dynamisk og flere faktorer har innvirkning på prisen, blant annet andel fornybar og fossil energi i nettet, over- og underskudd av kraft på kontinentet, og været. I Norge kommer ca. 90 % av kraftforsyningen fra vannkraft, og tilgjengelig kraft avhenger av hvor mye regn som fyller opp vannreservoarene. Med stor tilgang på fornybar energi, og et vått klima har Norge en svært lav energipris sammenlignet med mange andre land. I 2020 oppga NVE gjennomsnittlig energipris til 12 øre/kWh, og i mai 2021 var den gjennomsnittlige elektrisitetsprisen 53,5 øre/kWh, ekskludert avgifter og nettleie. [11] Denne økningen skyldtes en tørr vinter i store deler av landet, kombinert med svært lave temperaturer.

Fjernvarmepris

Mange boliger og næringsbygg er i dag tilkoblet et fjernvarmenett for oppvarming av bygningene. Her betaler kunder kun for den energien de bruker, uten tilleggsavgifter. Fjernvarmeprisen er underlagt energiloven, og vil aldri ligge over strømprisen i sitt lokale nettområde. Næringskunder betaler også et effekt- og volumledd. For næringskunder varierer effektleddet etter høyeste effekt per måned for sommer- og vintermånedene, hvor den høyeste målte effekten i en måned setter nettleieprisen for den påfølgende måneden. [12]

Statlige avgifter

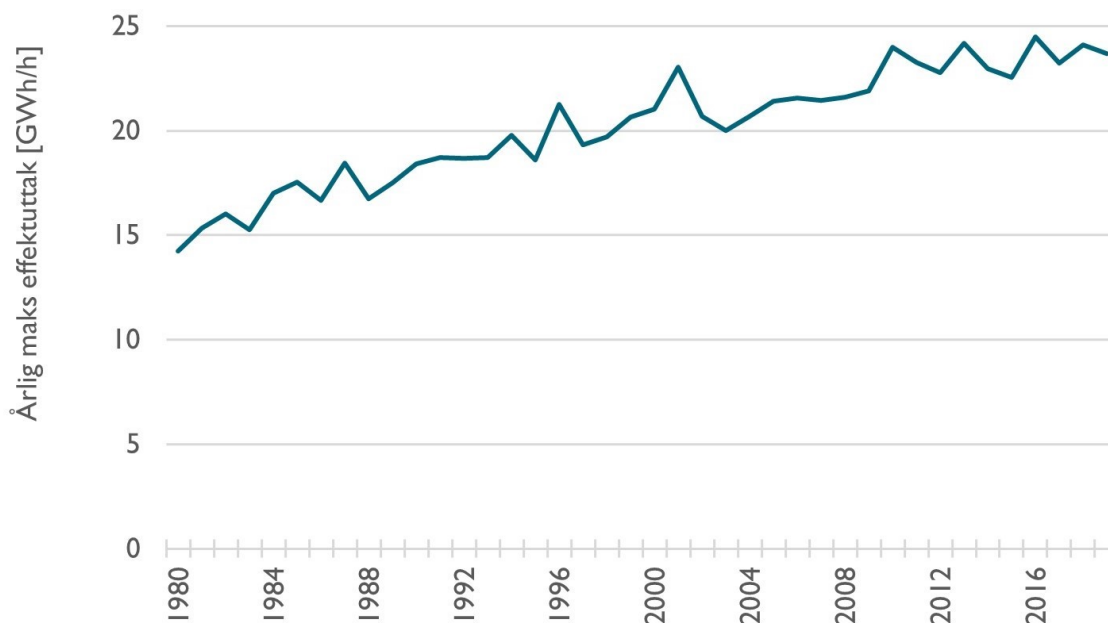
I tillegg til nettleie og strømpris betaler strømkunder statlige avgifter; “merverdiavgiften” er en avgift på ca 25% påslag av prisen, som er legges på strømpris og nettleie, “elsertifikater” er en støtteordning for kraftprodusenter som produserer kraft fra fornybare energikilder, og er et tillegg på strømprisen, “Enova-avgiften” er en avgift som går til at Enova skal finansiere energitiltak, og legges på nettleien, og til slutt er “elavgiften” en inntekt for staten som legges på nettleien. [13]

2.2 Effektforbruk

Effekt er omsatt energi per tidsenhet, måles i watt [W], og leveres fra energiprodusenter til sluttbrukere via strømmettet. For å forstå hvordan strømkunders effektforbruk kan påvirke nettleien, er det viktig med en grunnforståelse av strømmettets oppbygging.

Det norske strømmettet er delt opp i tre nivåer: transmisjons-, regional- og distribusjonsnett. Nivåene har ulikt spenningsnivå etter avstanden som strømmen skal fraktes. Transmisjonsnettet er et landsdekkende system som kan frakte strøm over lange avstander og over landegrensler, og distribusjonsnettet frakter strøm i lokale kraftnett til mindre sluttbrukere. Regionalnettet binder ofte sammen disse to. [7]

Strømmettet er dimensjonert etter en kundes momentane høyeste strømuttak, også kalt “effekttopper” eller “topplaster”. Statnett og de andre nettselskapene i Norge planlegger å investere 135 mrd. kroner i utbyggingen av strømmettet i perioden 2018 - 2027. Dette skyldes en økning i det nasjonale energiforbruket. De siste årene har den høyeste effekttoppen i nettet vært rundt 24 GWh/h, hvorav en 1/4 av effekttoppen skyldes industri, og 3/4 er alminnelig forsyning, og trenden er økende. Figur 2.2.1 illustrerer en tydelig stigning i strømmettets høyeste effektuttak fra 1980 - 2019. Med høyere CO₂-avgift og krav om økt fornybarandel innen 2020 blir kull og gass dyrere, og andelen enkelt regulerbare energikilder forventes å reduseres fra 70 % til 59 % innen 2030. Dette stiller krav til et mer stabilt effektforbruk i fremtiden. [14, 15]

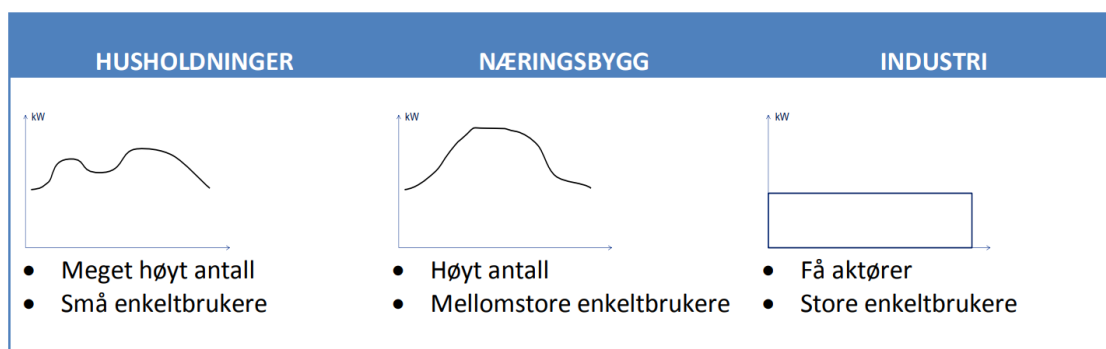


Figur 2.2.1: Høyeste effekttopp i det norske strømmettet per år, fra 1980 - 2019 [14]

Finansieringen av utbyggelsen vil komme gjennom økt nettleie som alle for husholdninger, bedrifter og organisasjoner [14]. Det vil derfor være økonomisk gunstig for samfunnet å både redusere energibruk og effektbehovet. Effektbehovet kan reduseres ved å fordele energiforbruket jevnere utover dagen som fører til et lavere momentane strømuttak fra nettet. Å jevne

ut effekttoppene har mange fordeler; strømmettet blir mer pålitelig, andelen fornybar energi kan økes fordi andelen olje og gass kan reduseres, og utbygging av nettet og medførende naturinngrep blir redusert eller forsinket.

En rapport fra EC-group AS og Xrgia AS vurderte alternativer til nettutbygging i Stor-Oslo i 2012 [16]. Der ble blant annet forbruksprofiler for effektbruk og potensial ved effektreduksjon ved effektivisering, omlegging eller lastreduksjon, og laststyring presentert. Forbruksprofilene presenterte karakteristika for husholdninger, næringsbygg og industri, og oppsummerte de tre viktigste forbrukersegmentene, vist i figur 2.2.2.



Figur 2.2.2: Døgnprofiler for effekt for ulike forbrukssegmenter i Stor-Oslo [16]

Figuren viser at effekttoppene er høyest mellom klokken 06:00 - 09:00 og 16:00 - 20:00 for norske husholdninger, og i arbeidstiden fra 08:00 - 17:00 for næringsbygg. Disse forbruksgruppene står for 90% av elektrisitetsforbruket i Stor-Oslo. Resterende forbruk er fra industri, som i figuren skiller seg ut ved å ha et jevnt effektforbruk gjennom hele døgnet. Fra rapporten kom det også frem at forbrukskategorier som romoppvarming, ventilasjonsluft og varmtvann var egnet for effektivisering, omlegging og lastreduksjon, og laststyring. Belysning og teknisk utstyr er kategorier som også bidrar til høye effekttopper i arbeidstiden. Disse kategoriene er egnet for effektivisering, men kun delvis egnet for laststyring, og ikke egnet for omlegging og lastreduksjon. Det største potensialet for effektreduksjon gikk under “lastreduksjon” og “styring”, men kun hhv. 7,5% og 5,8% var realiserbart potensial. Størst realiserbart potensial for effektreduksjon kommer fra effektivisering av eksisterende bygg, og omlegging av energi. [16] Det finnes flere metoder for å redusere effektforbruket, blant annet ved å fordele energiforbruk utover dagen, styringssystemer, fjernstyring av laster, lagring av energi i batteri eller termisk lagring [17].

2.3 Energibruk i Norges bygningsmasse

Av Norges totale elektrisitetsforbruk går ca. 40% til boliger og bygg i kommersiell sektor [1, 2]. En analyse fra SSB har slått fast at omtrent 40% av energiforbruket går til oppvarming og 12% går til varmtvann [18]. En rapport fra Enova visert til et stort potensial for energieffektivisering av den norske bygningsmassen for å sikre økonomisk aktivitet og vekst uten å redusere muligheter for en miljømessig og forsvarlig utvikling. Her er det viktig med en tilstrekkelig grad av forsyningsikkerhet, reduserte klimagassutslipp og å sikre god konkurransekraft. [19]

I dag er det i overkant av 4,2 millioner bygninger i Norge. Av dette er 37 % boligbygg, 3 % industri- og lagerbygg og 1 % kontor- og forretningsbygg. Resterende byggemasse består bl.a. av fritidsboliger, hytter, hotell, helsebygg og skoler. [20] Omtrent 80 % av dagens bygningsmasse vil fortsatt stå i 2050. [21] Potensialet for energieffektivisering og energisparing kan kun tas ut i nødvendig omfang om dersom byggeiere og -brukere blir mer miljøorienterte. Hele Norges bygningsmasse kan ikke bli oppgradert til dagens forskriftsnivå på kort sikt, da dette vil være for kostnadskrevenende og ikke samfunnsøkonomisk forsvarlig. De viktigste grepene knyttet til energieffektivisering vil skje i de årlige rehabiliteringene av bygninger, samt høy energistandard på nybygg. I en renoveringssyklus på ca. hvert 30 - 40. år må energibruken reduseres betraktelig. [19]

Det kan antas at alle rehabiliterte bygninger som er eldre enn fra 1969 har minimum TEK 69-nivå, og at bygninger oppført før 1949 har blitt rehabilitert til en bedre TEK-standard. Dette kom av en energikrise på 1970-tallet, som medførte et krav til e-verk om leveringsikkerhet av energi til bygninger i kommunen. I stedet for å produsere mer energi ble det fokus på å spare energi ved å renovere bygninger til TEK 69-nivået. Bevaringsverdig bebyggelse og bygninger med tekniske eller bygningsfysiske begrensninger vil trolig ikke komme høyere enn TEK 87-nivå. [19]

2.3.1 Potensialet for energisparing

Stortinget satte i 2017 et mål om å redusere energiforbruket i dagens bygningsmasse med 10 TWh innen 2030.[4] I en studie fra Enova i 2012 om potensial og barrierer for energisparing i Norge fra Enova, ble fire potensialer i vurderingen av energieffektiviseringen i norske bygninger presentert:[19]

Teoretisk potensial - Potensialet uten å ta hensyn til hva som er teknisk mulig, eller lønnsomt for eksisterende bygg. Her løftes bygningsmassen opp til TEK10-nivå.

Teknisk potensial - Hva som er teknisk og praktisk mulig. En viss andel av eksisterende bygg kan ikke løftes til TEK10-nivå. Det trengs teknologiutvikling og innovasjon for å øke potensialet.

Økonomisk potensial - Hva tiltakene faktisk koster. Her trengs en markedsendring for å øke potensialet, eksempelvis med støtte til markedsintroduksjon for nye teknologiske løsninger og tiltak.

Realistisk potensial - Tar hensyn til strukturelle hensyn som eie-leieforhold, individuelle aspekter (som kjennskap, kunnskap og holdninger). Dette potensialet er avhengig av investeringsadferd, bruk av bolig og utstyr, gode innarbeidede vaner, og kun bruk av energi når det er behov for det.

Rapporten presiserer også at et viktig aspekt ved energisparing i yrkesbygg er god implementert energi- og driftsledelse. Bygg trenger energioppfølgingssystemer (EOS), og kompetente medarbeidere som kan bruke de tekniske styringssystemene på en hensiktsmessig måte. Tabell 2.1 viser det tekniske og realistiske potensialet for energibesparing i dagens bygningsmasse: [19]

Tabell 2.1: Teknisk og realistisk potensial for energibesparing i norske bygg, mellom årene 2010 - 2020

| Bygningskategori | Total stasjonær energibruk | Prosent av total energibruk | Teknisk potensial | Realistisk potensial* |
|------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------|
| Boliger | 45,0 TWh | 27 % | 13,4 TWh | 1,4 - 3,0 TWh |
| Yrkesbygg | 35,4 TWh | 21 % | 19,5 TWh | 3,0 - 4,5 TWh |

* Realistisk potensial av det tekniske potensialet. Tallene er noe usikre, grunnet dårlig grunnlagsdata for årlig rehabiliteresvolum, og denne rehabiliteringens effekt på energibruken

Fra rapporten ble tre barrierer for forbedring av energiytelsen til eksisterende og fremtidige bygg presentert:

1. Manglende lønnsomhet: det reelle potensialet er først og fremst avhengig av om eierne av bygningene anser tiltakene som økonomisk lønnsomme.
2. Innstilling: er eierne i modus for å rehabilitere/oppgradere byggene sine?
3. Lav eller delvis fraværende oppmerksomhet omkring energibruk og energirelaterte tiltak i samfunnet. Dette er den viktigste barrieren, da energiutgifter til bolig utgjør 4-5% av boligens årlige forbruksutgifter.

For å jobbe rundt barrierene og ta ut potensialet for energisparing, må energibruk senkes betydelig; dette gjøres ved å ha best mulig bygningsmessig standard. Videre må tekniske installasjoner ha forbedret ytelse for å redusere energiforbruk, og til slutt må bruks- og driftsrelaterte kompetanse inn i hverdagsbruken av bygningene. [19]

2.3.2 Energikarakterer i bygninger

“Energimerkeordningen” er en påbudt energimerking av boliger og bygninger, med hjemmel i energimerkeforskriften. Etter 1.juli 2010 har alle bygninger fått en energiattest med et energi-merke, administrert av Enova. Energimerket er en kombinasjon av en energikarakter og en oppvarmingskarakter. Energikarakteren er en bokstavskala fra A til G som sier noe om byggets spesifikke energiforbruk, mens oppvarmingskarakteren er en fargeskala som rangerer bygget etter hvilket oppvarmingsystem som er installert. Skalaen går fra rød (100 % fossil oppvarmingsandel) til mørk grønn (≤ 30 % eller fossil oppvarmingsandel). For universitets- og høyskolebygninger er kravene for de ulike energikarakterene vist i tabell 2.2. For bygninger basert på teknisk forskrift fra 2010 (TEK 10) og tidligere er øvre grense C i karakter.[22]

Tabell 2.2: Minstekrav for årlig mengde levert energi per m² oppvarmet BRA til bygninger for de syv energikarakterene [22].

| Bygningskategori | A | B | C | D | E | F | G |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| | \leq | \leq | \leq | \leq | \leq | \leq | ingen grense |
| Univ. og høyskoler [kWh/m ²] | 90 | 125 | 160 | 200 | 240 | 300 | >F |

2.4 Varmebehov i bygninger

I en bygning går ca. 40 % av energiforbruket til oppvarming. Varmebalansen i en bygning består av varmetap og tilført varme, og begrepet “varmeoverføring” er essensielt i kontekst til energieffektivisering. For å opprettholde et godt inneklima må riktig mengde varme tilføres bygget for å motarbeide varmetap fra byggets strukturelle egenskaper til uteklimaet. Varmeteorien tilsier at temperaturforskjeller vil forårsake konsekvente og irreversible overføringer av varmeenergi, fra områder med høyere temperatur til områder med lavere temperatur. Dette skjer ved de tre ulike overføringsmekanismer: varmeledning, konveksjon og stråling. [7]

Varmetap gjennom bygningers konstruksjon skjer ved varmeledning; her flyttes varme gjennom materialene mot lavere temperaturer, som mot uteluften og grunnen. Byggekonstruksjonens isoleringsevne angis av termisk overføring (U), som er varme per kvadratmeter og temperaturforskjell ($W/(m^2 \cdot K)$). Enkelte deler av bygningskonstruksjonen har også høyere U -verdi enn omliggende material og leder derfor mer varme gjennom konstruksjonen. Dette kalles “kuldebroer” og er en vesentlig årsak til varmetap i eldre bygg. [7] Byggeteknisk forskrift (TEK) stiller krav til alle nybygg om en viss energistandard (U -verdi). Den siste forskriften kom i 2017, og kalles “TEK 17” [23]. Kravene for energieffektivitet i TEK 17 er vist i tabell 2.3. Lekkasjetall er trykkforskjeller mellom innsiden og utsiden av bygningen som fører til utskiftninger av luft og varmetap, og måles i luftutskiftninger per time. Ved renovering av bygninger oppgraderes standarden til dagens forskriftsnivå om mulig.

Tabell 2.3: Minimumskravet for U -verdier i bygningskonstruksjonen i TEK 17 for alle bygninger, untatt bolig- og fritidsbygg med laftede yttervegger [23]

| Komponent | Yttervegg | Tak | Gulv | Vindu og dør | Lekkasjetall* |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| Enhet | $W/(m^2 \cdot K)$ | $W/(m^2 \cdot K)$ | $W/(m^2 \cdot K)$ | $W/(m^2 \cdot K)$ | h^{-1} |
| Verdi | 0,22 | 0,18 | 1,18 | 1,2 | 1,5 |

* Lekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell (luftvekslinger per time)

Konveksjon fra vind mot bygningens utvendige flater forårsaker en varmeveksling mellom overflaten og luften, og gir økt varmetap. Dette avhenger av temperaturforskjell mellom overflate og luften, vindhastighet og -retning, bygningens form og ruhet. [24].

Varmestråling oppstår først og fremst mellom vegger i rom, hvor varme stråles fra overflater med høye temperaturer til luften i rommet. Varmetap fra luftåpninger i er en blanding av de tre mekanismene. [7, 25]

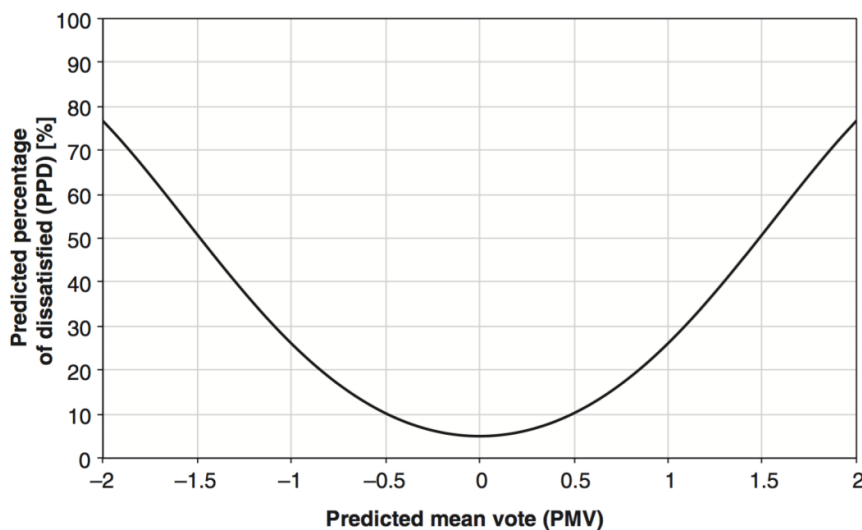
For å opprettholde et godt inneklima må varmetap kompenseres for. En av de mest energieffektive måtene for romoppvarming er varmepumper, hvor energi hentes ut fra omgivelsene ved et kjølemedium, kjølemediet komprimeres for å øke temperaturen, og varmen leveres til oppvarmingsarealene via en kondensator. Kjølemediet sirkulerer videre gjennom en ventil som letter trykket slik at temperaturen faller til under utetemperaturen, før varme tilføres kjølemediet fra omgivelsene gjennom en fordampner. Ytelsen til varmepumper måles i COP, som er et forholdstall mellom hvor mye energi varmepumpen bruker i drift sammenlignet med hvor mye varme den leverer. [26].

Andre vanlige oppvarmingsenheter er ved- og panelovner, og radiatorer. Radiatorer er den vanligste formen for varmeenhet, og består av en samling vannrør hvor varmt vann strømmer gjennom. Her avgis varme til rommet ved stråling og konveksjon. Radiatorer brukes ofte i områder med fjernvarmenett, og har høy virkningsgrad. [7].

Varme leveres også gjennom ventilasjon. Her leverer et varmebatteri varme til tilførselsluften i ventilasjonsanlegget. Denne varmen kan enten leveres gjennom oppvarming ved elektrisitet, eller et sentralt vannanlegg dersom bygget er koblet til fjernvarme. [27] I tillegg til disse varmeenhetene inngår andre varmekilder i varmebalansen. Dette er for eksempel varme fra mennesker, belysning, teknisk utstyr, og solinnstråling.

2.4.1 Termisk komfort

Det er viktig å opprettholde en stabil varmebalanse for å sikre god termisk komfort i en bygning. Termisk komfort defineres av EN ISO 7730 som “en sinnstilstand som uttrykker tilfredshet med det termiske miljøet. Utilfredshet kan være forårsaket av varmt eller kjølig ubehag i kroppen som helhet, [...], eller av en uønsket kjøling (eller oppvarming) av en bestemt del av kroppen”. Hvordan personer i et bygg oppfatter omgivelsestemperaturen kalles termisk sensasjon, og er en standard parameter i de fleste termiske eksperimenter. Vanlige mål på termisk sensasjon er PMV og PPD. PMV er forutsagt gjennomsnittlig stemme (eng. Predicted Mean Vote), og uttrykker den termiske følelsen til en person i et miljø. Her brukes vanligvis en tilfredsskala fra -3 (kald) til 0 (nøytral) og +3 (varm) på å beskrive opplevd temperatur. PPD er prosentandel av misfornøyde mennesker (eng. percentage of dissatisfied people) i et bygg eller et rom, og er en funksjon av PMV, vist på figur 2.4.1. [28]



Figur 2.4.1: PPD som en funksjon av PMV [28]

2.4.2 Fjernvarme som varmekilde

Fjernvarme er nettverk av rør som knytter bygninger i et nabolag, en bydel eller en hel by sammen, og som frakter oppvarmet vann gjennom nettet for romoppvarming og tappevann. Utviklingen av fjernvarmeideen begynte allerede på 1600-tallet i London. Byen ville dermed få ferskvannsleveranse og begrenset luftforurensningen fra kullfyrte ovner. [29]. Teknologien som dannet grunnlaget for dagens fjernvarmesystem fikk sine fremskritt ved starten av 1800-tallet, og teknologiene og de tilhørende energikildene til fjernvarmenetteene kan deles inn i “generasjoner”. De tre første generasjonene og deres utvikling er beskrevet under: [30].

1. 1880-tallet - 1930: Vanndamp $\approx 100^{\circ}\text{C}$ - Fjernvarmesystem med damp som varmeleder som ble utviklet i USA, og brukt både i USA og Europa frem til 1930. Sammenlignet med dagens teknologi hadde denne teknologien svært høye varmetap og returrørene var ofte korrodert, og systemet hadde lav virkningsgrad.
2. 1930 - 1970: Varmtvann under trykk $> 100^{\circ}\text{C}$ - Fjernvarmesystemene gikk over til å ha temperaturer for det meste over 100°C , og denne teknologien dominerte frem mot 1970-tallet. Denne teknologien ble bl.a. brukt i store Sovjet-baserte fjernvarmesystem, men kvaliteten var lav, og systemet manglet varmebehovskontroll. Utenfor Sovjet var teknologien bedre, og rester av teknologien finnes fremdeles i dagens teknologiske løsninger.
3. 1970 - ...: Varmtvann under trykk $< 100^{\circ}\text{C}$ - Den tredje generasjonen, også kalt “Skandinavia fjernvarme teknologi”, erstattet de gamle teknologiene i Sentral- og Øst-Europa og det gamle Sovjet, og har blitt bygd ut i flere andre land. Motivasjonen for å bygge ut denne teknologien var bl.a. å sikre forsyningssikkerhet med tanke på de to foregående oljekrisene i 1956 og 1967, og basere energiforsyning på billigere drivstoff som biomasse, avfall og kull. I senere tid har sol- og geotermisk varme også supplert energisystemer noen få steder.

I Norge finnes det fjernvarmenett på totalt 1900 kilometer som er en blanding av andre- og tredjegerasjonsteknologiene hvor temperaturene vanligvis ligger mellom $80 - 120^{\circ}\text{C}$ (mellomtemperaturer). I 2019 ble det levert 6,6 TWh i fjernvarmenett i byer og tettsteder over hele landet [31]. Energikildene i Norsk fjernvarme er en blanding av fossil gass og olje, bioenergi, omgivelsesvarme, gjenvunnet varme og fleksibel elektrisitet. [31].

I designet av neste generasjons bærekraftige fjernvarmenett vil det være ønskelig med 100 % fornybare energikilder. Energikildene her vil bestå av vind, geovarme, solvarme og bioenergi, i kombinasjon med gjenvunnet varme fra avfallsforbrenning. Med økt verdenspopulasjon og matbehov, blir også fokuset på bærekraftige energikilder større.

Fjerdegenerasjons fjernvarme

Fjernvarme spiller en viktig rolle i fremtidige bærekraftige energisystemer, men dagens fjernvarme må gå over til et lavtemperatur energisystem gjennom en radikal endring. Først da vil fjernvarme kunne integreres som en del av smarte energisystemer i kombinasjon med elektrisitets- og transportsektoren. Trenden fra de tre tidligere generasjonene viser at fjernvarmesystemene går mot lavere distribusjonstemperaturer, i tillegg til at komponentene i systemene blir magrere og prefabrikasjon av rør og systemer fører til redusert arbeidskraft på

byggeplasser. Den neste generasjonen fjernvarmesystem bør ha enda lavere distribusjonstemperaturer (ned mot 50 °C), fleksible rørmaterialer og monteringsorienterte komponenter. [30]

Fjernvarmes konkurransekraft kommer fra kombinasjonen av forhold for varmforsyning og varmfordeling. Minimering av distribusjonskostnader og varmetap ved konsentrering av varmebehov er en viktig forutsetning for varmfordelingen. I langsiktig planlegging av lavtemperatur fjernvarme er tetthet i kundegruppen viktig for å kunne redusere kundenes varmebehov uten å miste den totale konkurranseevnen til fjernvarme. Lavtemperatur fjernvarme (LTFV) vil også gi et mer energieffektivt system med mindre behov for energi til oppvarming av vannet.

2.5 Tekniske systemer i bygninger

I tillegg til de visuelle energikrevende systemene som belysning, utstyr og små elektriske apparater, er det flere større systemer i ethvert bygg som krever elektrisitet. I dette delkapittelet blir installasjoner som ventilasjon, tappevann og kontrollsystemer i tillegg til varmegjenvinnere som apparat for energisparing presentert.

2.5.1 Ventilasjon

God ventilasjon er viktig for å opprettholde et godt inneklima og atmosfærisk miljø ved å erstatte forurenset luft og med frisk luft. Ventilasjon brukes også til å kontrollere temperaturen eller fuktigheten i et rom og inneholder de tre hovedelementene varme, ventilasjon og air condition (HVAC). Ulike ventilasjonssystemer defineres etter strategier for type ventilasjon, kontroll av ventilasjon, og metode for luftdistribusjon. De tre ventilasjonsstrategiene er: [32]

1. Mekanisk ventilasjon: hvor hoveddrivkraften for luftforflytningen er vifter. Denne typen ventilasjon gir god kontroll av luftstrømmer og inneklima, kan kombineres med filter og luftbehandlingssystem, og kan kobles til varmevekslere for varmegjenvinning. Ulemper er at viftene bruker en del elektrisitet, det kan være vanskelig å få store luftstrømmer for kjøling, og investeringskostnadene og vedlikeholdsbehovet er ofte større enn ved naturlig ventilasjon.
2. Naturlig ventilasjon: hvor trykkforskjeller er hoveddrivkraften for luftforflytningen. Naturlig ventilasjon er bra med tanke på de store massestrømmene som er tilgjengelig for kjøling, systemet er billigere og trenger mindre vedlikehold enn andre typer ventilasjon, det trengs ikke energi til vifter, og overtemperaturer er mer akseptert av brukerne av bygget. Utfordringene knyttes til bråk fra utsiden av bygget, kontroll av luftstrømmer, gjenvinning av varme fra avtrekksluften, og å kombinere filter i anlegget, grunnet trykkfall over komponentene.
3. Hybridventilasjon: hvor mekanisk og naturlig ventilasjon kombineres. Fordeler med hybridventilasjon er mindre bruk av energi til vifter enn ved mekanisk ventilasjon, behov for mekanisk kjøling reduseres, personers frihet til å styre inneklimaet sel vøker, og det trengs et mindre ventilasjonssystem. Ulemper er at investeringskostnadene er høyere fordi det blir et "dobbelt" system, anlegget er mer komplisert i bruk, vedlikehold og design, og de to systemene kan komme i konflikt med hverandre.

De fire strategiene for ventilasjonskontroll er konstant luftvolum (CAV) hvor luftstrømmen er konstant, variabelt luftvolum (VAV) hvor luftstrømmen varierer etter brukernes timeplan, behovsstyrt ventilasjon, (DCV) hvor luftstrømmen er tilpasset brukernes behov ved bruk av sensorer, og mikset ventilasjon, hvor frisk luft mikses inn i rommet. HVAC-anlegg deles inn i to typer luftdistribusjon: anlegg hvor luften flyttes av en drivkraft (naturlig-, mekanisk og hybrid-ventilasjon) og anlegg som behandler luften (tilførsel- og avtrekks-anlegg, og balanserte anlegg). [32].

2.5.2 Tappevann

I en kontorbygning står energi for oppvarming av tappevann for ca. 2 % av det totale energiforbruket. Kostnaden for tappevann er en kombinasjon av energiforbruk og vannforbruk, i tillegg til vedlikeholdskostnader og investeringskostnader. Tappevann som utgiftspost er derfor ikke så ubetydelig som den først fremstår som. Før 1973 ble energi basert på energibærere olje og elektrisitet brukt for oppvarming av tappevann, mens det i dag brukes enten fjernvarme eller elektriske kjeler. [7]

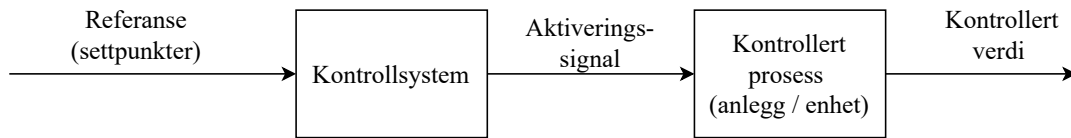
I et kontorbygg er vannforbruket per dag 10 liter per person per dag; av dette er 8 L varmtvann mellom 45 °C til 65 °C. I dag er de to systemene for leveranse av tappevann direkte varmeenheter og varmtvannstanker. Direkte varming er mye brukt i kombinasjon med fjernvarmesystemer, men krever mer effekt enn ved bruk av varmtvannstanker. Derfor er varmtvannstanker ofte å foretrekke når elektrisitet er energibæreren. [7]

For å unngå dannelse av bakterier i tappevannet stilles det enkelte krav til temperaturer. Lagring av vann med temperaturer under 60 °C vil øke risikoen for dannelse av helseskadelige legionellabakterier; mellom 20 - 50 °C er det gode vekstforhold for legionella, mens i temperaturer under 20°C og over 60 °C vil ikke bakterien kunne overleve. Dette er en bakterie som spres ved aerosoler og kan gjøre skader på lunger hos personer som puster inn aerosolene. Filkehelseinstituttet anbefaler at tappevann i berede bør holde minst 70 °C, og at tappevannet skal nå 60 grader ved tappepunktet. Kaldtvannstemperaturen skal være under 20 °C, og god vannsirkulasjon i vannanlegg vil forebygge legionellavekst. [33]

2.5.3 Kontrollsystemer

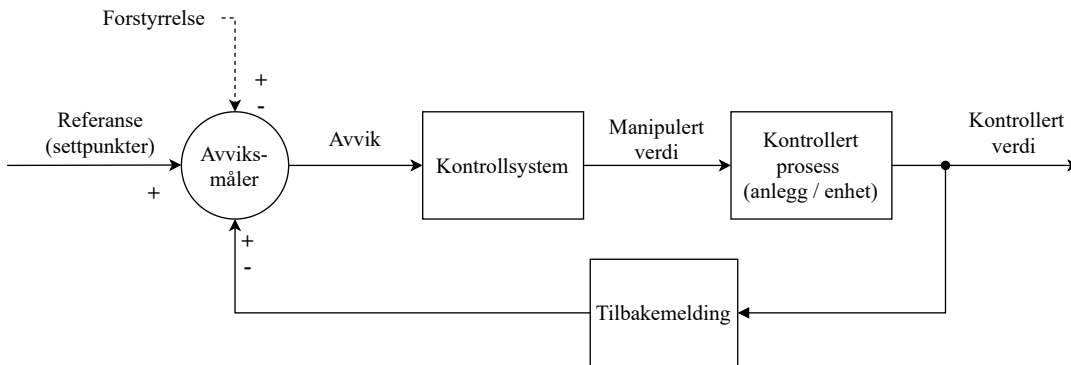
Mennesker oppholder seg innendørs ca. 90 % av tiden. For å opprettholde god innendørs komfort er det ofte påkrevd miljøkontrollsystemer i bygninger; ventilasjon med rensende filter fjerner luftforurensninger som svevestøv og eksos fra uteluften og opprettholder et godt atmosfærisk miljø, og temperaturstyrte varmeenheter opprettholder temperaturen på et nivå for god termisk komfort. For at et godt inneklima skal opprettholdes til enhver tid må derfor innendørs miljøutstyr være utstyrt med automatiske driftssystemer. [7]

De to typene kontrollsystem er åpen sløyfe- (ikke tilbakemeldings-system)- og lukket sløyfekontroll (tilbakemeldings-system). I et kontrollsystem med åpen sløyfe blir et inngangssignal eller en kommando tilført kontrolleren. Utgangssignalet fungerer som aktiveringssignalet som regulerer kontrollprosessen og driver kontrollvariabelen til ønsket verdi. Dette kan for eksempel være en tidsstyrt av/på-kontroller. Blokkskjema for denne typen kontroll er vist i figur 2.5.1. [34]



Figur 2.5.1: Et blokkdiagram som viser hvordan et kontrollsystem med åpen sløyfe fungerer

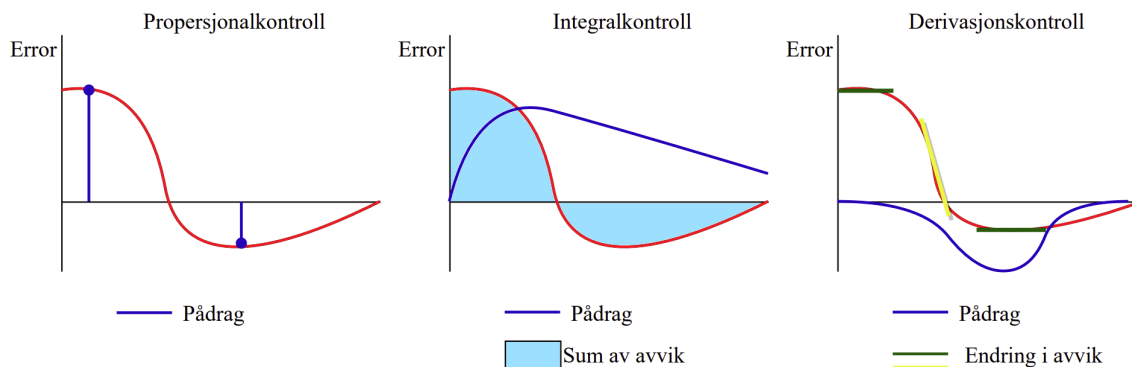
I en lukket sløyfekontroll skal en kontrollert tilstand (temperatur, fuktighet, luftstrømning) holdes innenfor definerte grenser eller “settpunkter”. Disse settpunktene er referansen til kontrolleren. En forstyrrelse påvirker tilstanden og et måleinstrument sender målt tilstand tilbake til kontrolleren som bestemmer hvilken handling som skal utføres i enheten for å korrigere avviket fra ønsket tilstand. Kontrollsignalet bestemmer en manipulert variabel som skal motvirke forstyrrelsen, og det er kontrolleren som bestemmer størrelsen på kontrollsignalet. Et blokkskjema denne typen kontroll er illustrert i figur 2.5.2.[34]



Figur 2.5.2: Et blokkdiagram som viser hvordan et kontrollsystem med lukket sløyfe fungerer

Kontrollerens reaksjon på avvik bestemmes av kontrollerfunksjonen. I lukkede sløyfer er “diskontinuerlige kontrollere” kontrollere som endrer den ventende manipulerede verdien etter innstilte trinn. Her justeres den anvendte manipulerede variabelen kontinuerlig. Disse kalles også PID-kontrollere, som er et akronym hvor P står for “proporsjonal”, I står for “integral” og D for “derivat”. [7] Hver del av kontrolleren er en egen matematisk *reaksjon* på et avvik; P-leddet motvirket et avvik med å multiplisere en et pådrag med en konstant, K_p , I-leddet multipliserer avviket med en konstant, K_I , og så integreres pådraget, mens D-leddet multipliserer avviket med en konstant, K_D , og så deriveres pådraget. I en PID-regulator sendes avviket inn i hver reaksjon, før utgangssignalene fra hver reaksjon (pådragene) summeres til et felles utgangssignal. Ved å endre på konstantene endres systemets sensitivitet for hvert pådrag. [35].

Figur 2.5.3 illustrerer hvordan P, I og D-kontrollene ragerer på avvik (rød linje) over tid. Fra proporsjonalkontrollen blir utgangspådraget (blå linje) stort dersom avviket er stort, og lite om avviket er lite. For integralkontrollen vil avvikene (blått felt) summeres over tid, og multipliseres med K_i ; denne reaksjonen brukes for å fjerne konstante avvik i et kontrollsystem, fordi uansett hvor små de konstante avvikene er vil summen av avvikene (blå linje) etter hvert bli betydelige nok til å tilpasse kontrollerens utgangssignal. For derivasjonskontrolleren er det endringsraten i avviket som bidrar til utgangssignalet; når avvikene endres i liten grad (grønn strek) blir utgangssignalet lite, mens større endringer (gul strek) gir større utgangssignal (blå linje). [35]



Figur 2.5.3: Illustrasjon av hvordan proporsjonal-, integral- og derivasjonskontroller gir ulike utgangssignal i en PID-kontroller, hvor rød linje er avviket fra sett punkter i kontrolleren og blå linjer viser pådragene fra kontrollerene

2.5.4 Varmegjenvinning

Bruk av varmevekslere for å gjenvinne varme i ventilasjon- eller vannanlegg er en energieffektiv installasjon som reduserer energibehovet for oppvarming. De to teknologiene for varmeveksling er regenerative og rekuperative varmevekslere. Regenerative varmevekslere overfører varme mellom avtrekksluft og tilluft ved vekselvis kontakt med varmeoppsamlende overflater. De vanligste regenerative varmevekslerene er roterende- og kammervekslere. Roterende varmevekslere består av et roterende hjul med mange små kanaler hvor tilluft sirkulerer gjennom, mens luften får en varmeoverføring fra avtrekksluften fra utsiden av kanalene. En kammervarmveksler har to separate kamre som inneholder et "varmemateriale" og et spjeldhus. Varmematerialet har flere parallelle plater som vekselvis avgir varme til tilluften og absorberer varme fra avtrekksluften. Utvekslingen skjer ved at et tidsstyrt spjeld svinger omtrent en gang i minuttet. Både roterende- og kammervarmvekslere har høye virkningsgrader, mellom 70 % - 80 %. Ulempen med begge er at kanaler for til- og avtrekksluft må føres sammen. [7]

Rekuperative varmevekslere overfører varme gjennom en skillevegg (platevarmevekslere) eller en væske (rundspole eller varmerør). Rekuperative vekslerer skiller mellom medstrøms- og motstrøms flyt av luft eller væske. Platevekslere er to sammenkoblede luftkanaler hvor varmeoverføringen skjer ved varmeledning gjennom en plate som skiller tilluft fra avtrekksluft. Ulempen med disse er at det kan dannes is på avtrekksiden dersom temperaturene på platene faller under 0 °C. Dette kan forhindres ved å la noe av tilluften slippe inn i avtrekksluften. I rundspoler og varmerør skjer varmeoverføringen gjennom en gass eller væske, og frostvæske brukes som varmeveksler for å unngå isdannelse. Virkningsgraden for disse teknologiene er noe lavere enn for regenerative vekslerer, og ligger mellom 50 % - 60 %. [7]

Bruk av varmevekslere reduserer effektbehov ved å gjenvinne eksisterende varme i systemet. Dette er en energiøkonomisk måte å bruke energien på, som også reduserer effektbehov. Varmvekslere som energieffektiviseringstiltak vil i kommersielle bygg gi høy energibesparelse, mens de i boligbygg ikke har like stor innvirkning på energiforbruket. Her er brukervaner og forståelse for de tekniske systemene viktigere for energisparing. [7]

2.6 Tiltak for energieffektivisering

Energiøkonomiserende og -effektiviserende tiltak på bygninger er tiltak som sparer nok energi til at investeringene blir lønnsomme. På bestilling fra Lavenergiprogrammet produserte Gehør Strategi og Rådgivning en rapport i 2017, hvor målet var å finne tiltak for å nå Stortingets mål om en energisparing på 10 TWh i eksisterende bygningsmasse innen 2030. Det ble foreslått at de mest kostnadseffektive tiltakene skulle innføres først. For yrkesbygg var de foreslåtte tiltakene og potensialet for energisparing følgende: [36]

- Installasjon av varmepumper: 1,9 TWh
- LED-belysning og lysstyring: 1,8 TWh
- Forbedret varmegjenvinning av ventilasjonsluft: 1,7 TWh
- Driftoptimalisering med EOS og SD-anlegg: 1,1 TWh

En rapport fra Vista Analyse og Thema vurderte energieffektiviserende tiltak med hensyn på de økonomiske kostnadene som renoveringen medførte. Konklusjonen var at det er nødvendig med utvidede støtteordninger for energieffektiviserende tiltak, både til strukturelle tiltak i husholdninger, men også å etablere støtteordninger for mindre næringsbygg som i dag ikke kvalifiserer til støtte. I eksisterende næringsbygg kan energibesparelsen bli 7 TWh dersom investeringen per sparte kWh er mindre enn 1,2 kr. I rapporten ble følgende prioritert liste over tiltak som anslås å ha en samfunnsøkonomisk kostnad under 2 kr per sparte kWh i eksisterende næringsbygg, presentert: [9].

- Urstyring av ventilasjon
- Tetting vinduer og dører
- EOS
- Isolere rør og ventiler
- Totalrehabilitering Lavenergi
- Varmepumpe væske-vann
- Isolering av tak
- Varmegjenvinning og lavenergiarmatur
- Varmegjenvinning ventilasjon
- Behovsstyring ventilasjon

Enova har også presentert en liste over tiltak for yrkesbygg, med energisparingspotensialet som følger tiltakene. Dette er noen av tiltakene de foreslår: [37]

- Lysstyring: 10 - 30 % av energi til belysning
- LED-belysning: 50 % av energi til belysning isolert sett
- Installasjon av varmepumpe: 10 - 50 % av termisk forbruk
- Etterisolering av tak, vegger eller gulv: 5 - 20 % av energi til romoppvarming
- Utskiftning eller tetting av vindu: 5 - 15 % av termisk forbruk
- Varmegjenvinning i ventilasjonsaggregat: 35 - 80 % av energi til oppvarming av ventilasjonsluft

Det er likevel store variasjoner i faktiske tiltak og kostnader, eller om enkelttiltak eller en tiltakspakke vil være best for energisparing. I rapporten fra Vista/Thema er noen kostnader som tidsbruk hos byggeier, rydding, prosjektledelse osv. utelatt. Rekkefølgen på tiltakene spiller også en rolle på sparingspotensialet, da “senere” tiltak vil få et lavere sparingspotensial ettersom bygningens energitilstand forbedres. Vista/Thema og Enova trekker også frem energiledelse som et fundament som bør etableres i alle virksomheter. [9, 37]

2.7 Bygningssimulering for energiøkonomisering

Bygningsytelsessimulering (BPS fra eng. Building Performance Simulation) er en databasert, multidisiplinær og problemorientert matematisk modell for et gitt aspekt av bygningsytelsen. Simuleringen er basert på fundamentale fysiske prinsipper og ingeniørmodeller. BPS kan gi en ytelsesprediksjon for energibehov, kvalitet på inneklima som inkluderer termisk, visuell, luft og fukt-analyser, ytelse på ventilasjons- og fornybare systemer, modellering på bynivå, og driftsoptimalisering for bygninger. [28]

Det finnes mange softwareprogrammer for å simulere energiytelse, inneklima o.l. i bygninger. Det kan være utfordrende å finne det BPS-verktøyet som passer best for et problem, og administrasjon av inndata og standardinformasjon krever god kjennskap til programmet. De vanskeligste aspektene ved BPS er å oppdage tilfeldige feil, usikkerheter rundt spesifikasjoner, scenarier, modellering og numeriske usikkerheter. Fordelene er likevel mange; de fleste BPS-verktøyene i dag er enkle å håndtere, og det er mange komponent- og systemstørrelser tilgjengelig for bruk. Bruk av BPS til testing av ENØK-tiltak gir et noe realistisk resultat, og under drift kan en bygningens energiprofil vurderes opp mot bygningssmodellen. [28]

I denne rapporten er BPS-verktøyet IDA ICE brukt. Videre kommer kort en presentasjon av programmet og hvordan atmosfærisk- og termisk miljø kan analyseres.

2.7.1 Simuleringsprogrammet - IDA ICE

Simuleringsverktøyet IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) er et kjent program for å simulere en bygningens energiforbruk og termiske komfort. Programmet ble utviklet og eies av det svenske selskapet EQUA, og har blitt brukt av forskere i mange år. IDA ICE modellerer en bygning med dens systemer og kontrollere, og presenterer modellens energiforbruk og okkupertkomfort. Klimadata, standarder, produkt- og materialdata er bare noen av systemenes mulige inngangsegenskaper. IDA ICE brukes av kjente virksomheter i Norge som Rambøll, Siemens, Skanska og Cowi [28, 38]

Programmet gir detaljerte timesdata for blant annet temperaturer i vannanlegg, operative temperaturer i alle soner, mengde levert fjernvarme og elektrisitet, og hvordan elektrisitetsforbruket fordeles over belysning, utstyr, ventilasjon og kjøling. Ventilasjonssystemenes energiforbruk og hvor mye varme de leverer til sonene, varmebalanse i hver sone, dagslysdaktor og transmisjonstap er andre resultater som kan hentes ut fra simuleringene.

2.7.2 Ventilasjon og atmosfærisk miljø

Ventilasjonsystemer er et av de mest elektrisitetstrevende systemene i et bygg. Ved simulering av en modell i IDA ICE blir det atmosfæriske miljøet vurdert under “Indoor air quality”, hvor CO₂-nivåer [ppm], relativ fuktighet [%] og luftalder/frislufttilførsel [h] presenteres. For å opprettholde et godt inn klima anbefaler folkehelseinstituttet at mengden CO₂ i luften holdes under 1000 ppm [39]. Relativ fuktighet er en prosentandel fuktighet i forhold til maksimal oppnåelig fuktighet i en luft ved en gitt temperatur, og bør være i området 25 % - 60 % for god helse. Ved luftfuktighet under 25 % vil luften føles ukomfortabel tørr for mennesker, og for bygget kan dette føre til sprekker i maling, og krymping av treverk. Fuktighet over 60 % vil derimot føles for vått for mennesker, og kan gi fuktskader som mugg og korrosjon i bygningen [40]. Luftalder er et mål på hvor lenge et gjennomsnittlig luftmolekyl tilbringer i bygningen, og må skiftes ut for å fjerne forurensninger fra personer og materialer i rommet. Etter TEK 17-krav skal luftskiftningen være 2,5 m³ per time per m² gulvareal når bruksenheten eller rommene er i bruk, og 0,7 m³ per time per m² gulvareal utenfor brukstiden. [23, 41]

2.7.3 Varme og termisk miljø

I bygningssimulering er det flere kilder som tilfører varme til en sone; i tillegg til installasjoner som panelovner, radiatorer eller gulvvarme, inngår også varme fra personer, utstyr og belysning. Som i fysiske bygninger plasseres radiatorer og panelovner under vinduer; dette gjøres for å minimere strålingsasymmetri som kan gi ubehag for personer i rommet.[28] Varmelaster som utstyr, belysning og baselast er variabler i IDA ICE som bestemmes for hver sone ut fra behov for lyskilder og bruksområder for utstyr.

I IDA ICE er antall personer, eller okkuperanter, i et rom og deres aktivitets- og klesnivå inngangsvariabler som påvirker varmebalansen. Varme fra personer i et rom bestemmes av personens metabolske rate og varmetap. Metabolsk rate avhenger av muskulær aktivitet, miljøforhold og kroppsstørrelse, og uttrykkes i “Met”. Enheten er W/m² hvor 1 Met er 58,1 W/m² som tilsvarer varmen som stråler ut fra en stillesittende og rolig person. En persons bekledding spiller også en rolle på varmeoverføringen til omgivelsene. Termisk resistans i klær uttrykkes i “Clo”, og er et mål på hvor mye varme fra kroppen som slippes ut gjennom klærne. Enheten er (m² · K/W), 1 Clo tilsvarer 0.0155 (m² · K)/W og er den termiske motstanden til kombinasjonen av undertøy, en skjorte, bukser, en jakke, sokker og sko. [28]

I IDA ICE brukes Fangers komfortindikator og NS-EN 16798 (oppgradert versjon av NS-EN 15251) som indikatorer på termisk komfort. NS-EN 16798 er en norsk standard for “Inneklima-parametere for dimensjonering og vurdering av bygningers energiytelse inkludert luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustikk”. Standarden gir blant annet en oversikt over hvordan operativ temperatur fordeler seg i fire ulike komfortkategorier; “veldig gode-” til “uakseptable” temperaturtimer i soner, vist i vedlegg A. Dette gir et bilde på hvordan termisk komfort vil oppleves av personene i de ulike rommene.

Kapittel 3

Metode

I dette kapittelet presenteres først rapportens overordnede metode. Deretter presenteres oppbyggingen av referansemodellen som brukes i simuleringene, og analysen og kalibreringen av referansemodellen. Avslutningsvis presenteres oppbyggingen av IDA ICE-modellene med de implementerte ENØK-tiltak og metoden for lønnsomhetsanalysen.

3.1 Overordnet metode

Denne masteroppgaven var en simuleringsstudie hvor hovedmålet var å identifisere ENØK-tiltak for en referansemodell av en typisk bygning på NTNU Gløshaugen. Tiltakene skulle gi reduksjon i energi- og effektforbruk, uendret eller forbedret termisk komfort, god lønnsomhet og kort tilbakebetalingstid.

Referansemodellen var en modell som ble lagd i IDA ICE under en tidligere masteroppgave fra 2018, skrevet av Eirik Andre Nesgård og Minh Huy Ngo fra NTNU. Modellens oppbygging og datagrunnlag presenteres i kapittel 4, og en analyse av modellen legges frem. En kalibrering ble gjort av referansemodellen for å redusere avviket mellom faktisk og simulert energiforbruk; kalibreringen ble grunnlaget for en “basemodell” (BM) for videre simulering av ENØK-tiltak.

Enkelte ENØK-tiltak var planlagt som et utgangspunkt for simuleringene, mens andre tiltak var nødvendige for å løse ulike problemstillinger som oppsto underveis i simuleringene. Totalt ble ti ulike tiltak analysert enten alene eller i kombinasjon med andre tiltak. Kombinasjonene ble gjort for å undersøke hvordan energiforbruket endres når tiltakene fungerte sammen, og for å se om enkelte tiltak ga muligheter for at andre tiltak kunne implementeres.

Gjennom analysene ble basemodellen brukt som utgangspunkt, og implementeringen av tiltakene ga nye ulike modeller i IDA ICE. Totalt ble ti modeller (M#) lagd og i neste delkapittel presenteres hver modell med de respektive tiltakene (T#). Erfaringene fra simuleringene ble anvendt i en “endelig modell” (EM), tiltakene som samstemmer best med NTNUs miljøutviklingsplan for bygningsmassen simulert. For hver modell blir reduksjon i spesifikt elektrisitets-, fjernvarme- og totale energiforbruk sammenlignet med basemodellens forbruk presentert. I tillegg presenteres en lønnsomhetsanalyse for hver modell. I de modellene hvor kun ett tiltak er implementert representerer energibesparelsen og lønnsomhetsanalysen både modellen og tiltaket. Uakseptable temperaturtimer (UT) fra IDA ICE brukes som et mål på termisk komfort i hver sone.

En viktig faktor i simuleringsprosessen var å løse utfordringer som dukket opp under analyser av modellene. Gjennom analyser av simuleringene ble noen tiltak implementert for å løse spesifikke problemer i modellen. I ettertid har det vist seg at noen tiltak ikke er relevant for bygningsmassen på Gløshaugen, siden referansemodellen ikke representerer enkelte deler av modellen på en realistisk måte. Dette vil presenteres i resultatet av modellene det gjelder.

3.2 IDA ICE-modeller og simulerte ENØK-tiltak

Under planleggingen av tiltak for basemodellen ble tiltak fra listen over samfunnsøkonomiske tiltak fra Vista/Thema-rapporten og tiltakslisten til Enova ble vurdert. Relevante tiltak for simulering var isolering av tak, varmegjenvinning i ventilasjon og behovsstyrt ventilasjon. Andre foreslåtte tiltak som varmepumpe, urstyring av ventilasjon, totalrehabilitering og EOS kunne ikke implementeres i modellen da de ikke var realistiske for bygningsmassen i referansemodellen; varmepumper finnes i flere bygg men krever mer innhenting av data og varmeprofiler, det er urstyring på en del av ventilasjonsanleggene allerede, en totalrehabilitering blir svært kostbart da det er en stor bygningsmasse, og EOS-system finnes allerede på Gløshaugen og det kan ikke simuleres i IDA ICE. Modellene refereres til som "M#". Siden 40 % av energiforbruk i bygninger går til oppvarming var de fleste ENØK-tiltakene basert på reduksjon av varmetap og fjernvarmeforbruk. Simuleringene gjøres for et helt år.

Modell 1

Hensikten med denne M1 var å undersøke hvordan forbedring av vinduenes U-verdi kunne redusere varmebehovet slik at radiatorene ble overdimensjonert ved vanlige tur-returtemperaturer på 80 °C/60 °C. Muligheten for økt overdimensjonering av radiatorene for å redusere temperaturen i byggets fjernvarmenettet til LTFV i videre utvikling av modellen ble også undersøkt. Vinduenes U-verdi ble derfor redusert fra 2.19 W/(m² · K) i basemodellen til 1.2 W/(m² · K) i modell 1. Dette tiltaket fikk navnet "T1 (Vindu)" og refereres til det heretter.

I Master 2018 ble også vinduenes U-verdi redusert som et ENØK-tiltak, men U-verdiene i simuleringene var svært lave (0.8 W/m²K og 0.6 W/m²K). Tiltaket ble derfor også simulert i denne rapporten for å undersøke overdimensjoneringen av radiatorene kunne brukes til LTFV, og om vinduer med U-verdier lik TEK 17 kravet og dermed lavere investeringskostnader kunne være mer lønnsomt.

Modell 2

M2 var en videreutvikling av M1. Hensikten med modellen var å undersøke om de overdimensjonerte radiatorene fra M1 kunne levere nok varme til modellens soner med lavtemperatur fjernvarme. Tur-retur temperaturene i radiatorene ble derfor redusert fra 80/60 °C til 55/45 °C med de opprinnelige dimensjonerte radiatorkapasitetene. Det var ønskelig å beholde de eksisterende radiatorene, da det er viktig å finne nye måter å benytte eksisterende ressurser på, i stedet for å kaste ut gamle radiatorene til fordel for nyproduserte enheter. Dette tiltaket fikk navnet "T2 (LTFV)", og var i M2 simulert i kombinasjon med T1 (Vindu).

Modell 3

M3 var en videreutvikling av M2. Modellen hadde flere delmål, hvor det første delmålet var å undersøke om elimineringen av kjøleenhetene i laboratoriene og radiatorene i forelesningsrommene kunne redusere energi- og effektforbruket uten å påvirke termisk komfort. Dette tiltaket ble kalt "T3 (Enhetsjekk)".

Det andre delmålet var å undersøke om termisk komfort i forelesningsrommene kunne forbedres ved å endre settpunkttemperaturene i ventilasjonsanleggene. Temperaturene ble endret fra 18 °C til 16 °C, og tiltaket ble kalt “T4 (AHU Forelesning)”.

Det tredje og siste delmålet var å undersøke om endring av radiatorkontroll kunne redusere topplastene for varme levert til sonene. I basemodellen var radiatorkontrolleren satt til P (proporsjonal), og de ble endret til PI (proporsjonal-integral); dette var standardkontrollere i IDA ICE. Tiltaket ble kalt “T4 (Radiatorkontroll)”. I denne modellen var også T1 (vindu) og T2 (LTFV) implementert.

Modell 4

M4 var en videreutvikling av M3. Hensikten med modellen var å undersøke hvordan økt virkningsgrad for varmevekslerene i ventilasjonsanleggene kunne redusere fjernvarmeforbruket i kombinasjon med tidligere tiltak. Siden regenerative varmevekslere kan ha virkningsgrad rundt 80 % ble virkningsgraden økt fra 0,55 til 0,80 i de fem ventilasjonsanleggene. Tiltaket ble kalt “T6 (Varmevekslere)”. Modellen besto av kombinasjonen av de seks første tiltakene.

Modell 5

Hensikten med M5 var å undersøke reduksjonen av fjernvarmeforbruket ved å kun implementere T6 (Varmeveksler) til basemodellen. Dette tiltaket ble simulert alene. I denne modellen var det også interessant å undersøke fordeling av levert varme fra radiatorer og varmebatteri i ventilasjonen til sonene. Fordelingen ble funnet ved å summere mengde energi levert av radiatorene i de fem sonekategoriene, og mengde energi brukt av de fem ventilasjonsanleggenes varmebatteri i IDA ICE.

Dette tiltaket ble også simulert i Master 2018, og viste seg å være det mest energisparende tiltaket for referansemodellen. Resultatene fra Master 2018 viste en reduksjon i spesifikt fjernvarmebehov på 65.3 kWh/m². Tiltaket ble også gjennomført i denne masteroppgaven for å ha tilgang til detaljert energidata for sammenligning med andre tiltak og for å gjennomføre en lønnsomhetsanalyse av tiltaket.

Modell 6

Hensikten med M6 var å analysere hvordan endring av radiatorkontroll (T4 Radiatorkontroll) alene påvirket topplastene for varme. T3 (Enhets sjekk) var også implementert, men ville ikke påvirke energieresultatene fra radiatorkontrollen da topplastene for levert varme til sonene ble vurdert for hver enkelt sone. I analysen av denne modellen ble også en selvlagd PI-kontroller i IDA ICE testet for å undersøke hvordan endringer i P- og I-leddets parametere påvirket varmeleveransen til sonene.

Det ble gjennomført flere tester for en enkelt sone med en selvlagd PI-kontroller i IDA ICE. I denne kontrolleren kunne pådragsleddet (K_p), integrasjonstiden (T_i) og tidssteget (TT) endres, i motsetning til standardkontrollerene. Ti tester ble gjennomført, hvor små og store endringer i kontrollerens parametere ble endret til fra min. 0,1 til maks. 1000. En K_p - eller T_i -verdi på 1000 er ikke realistiske verdier i en kontroller i virkeligheten, men dette ble testet for å undersøke om ekstreme verdier i kontrolleren ga noen reaksjon i radiatorens pådrag.

Modell 7

M7 hadde flere delmål. Fra basemodellen kom det frem at settpunkttemperaturerne for radiatorene var lavere enn settpunkttemperaturerne for ventilasjonsanleggene; i basemodellen var settpunkttemperaturen i ventilasjonsanleggene opprinnelig 19 °C i lesesalene, laboratoriene og trafikkarealene, og 18 °C i forelesningsrommene og kontorene. Samtidig var kontrollsettpunktene for romtemperatur for radiatorene satt til min. 20,5°C og maks. 22 °C. Det var derfor interessant å undersøke om disse enhetene motarbeidet hverandre i temperaturspennet mellom settpunktene, og om en økning i settpunkttemperaturerne i ventilasjonsanleggene ville endre varmebalansen i sonene. I AHU Kontor, AHU Lesesal, AHU Trafikk og AHU Lab ble temperaturen økt fra 18/19°C til 21 °C. Tiltaket ble kalt “T7 (AHU)”. I M7 var analyse av termisk komfort også i fokus, og det skulle undersøkes om T4 (AHU Foreles.) og T7 ville øke den termiske komforten i sonene.

Gjennom analyser av basemodellen kom det frem at temperaturene i modellens vannanlegg var dimensjonert til maks. 80 °C og min. 25 °C. I basemodellens oppbygging var tappevann og vann sirkulerende gjennom radiatorene i samme krets. Siden legionellabakterier kan oppstå i stillestående vannanlegg med temperaturer mellom 20 °C og 60 °C, var det andre delmålet å undersøke hvor mange timer det er fare for legionellavekst. Som et motvirkende tiltak ble settpunkttemperaturerne i M7s vannanlegg økt til maks. 70 °C og min. 60 °C. Denne endringen i settpunkttemperaturer ble tiltak “T8 (Vannanlegg)”.

Det siste delmålet i M7 var å undersøke hvordan T2 (LTFV) påvirket fjernvarmeforbruket uten å kombineres med T1 (Vindu). To simuleringer av modell 6 ble gjennomført: én med alle de nevnte tiltakene i modell 7 (T2 (LTFV), T4 (AHU Foreles), T7 (AHU) og T8 (Vannanlegg)), og én hvor T2 (LTFV) ikke ble implementert. Dette ble gjort for å sammenligne hvordan LTFV alene påvirker energibehovet i denne modellen. Økningen av temperatur i AHU kunne gi et lavere FV behov da mer av varmen ble tilført sonene gjennom ventilasjon. Radiatorenes dimensjonerte tur/retur-temperatur ble endret fra 80/60°C til 55/45grader.

Modell 8

I analyse av basemodellen ble det klart at toppplastene for levert varme var høyest i de fem sonene i øverste etasje. Hensikten med M8 var å undersøke hvor mye toppplastene kunne reduseres ved å oppgradere takets U-verdi. I basemodellen hadde taket en U-verdi på 0.48 W/(m² · K) som i M7 ble oppgradert til 0.18 W/(m² · K) tilsvarende energikravet for tak i TEK 17. Dette tiltaket ble kalt “T9 (Tak)”.

I Master 2018 ble også takets U-verdi redusert som et ENØK-tiltak, men det var uvisst hva den nye U-verdien i simuleringen ble. Tiltaket ble derfor også simulert i denne rapporten for å undersøke flere aspekter ved tiltaket enn kun reduksjon i spesifikt energibehov.

Modell 9

Etter analyse av M7 ble det klart at de høye temperaturene i modellens vannanlegg fra tiltak T8 (vannanlegg) ikke var kompatibelt med LTFV. Etter samtale med veileder kom det frem at tappevann i raliteten varmes opp i en elektrisk kjel når temperaturene i fjernvarmenettet blir for lave for å opprettholde kravet om 60 °C temperatur ved tappepunktet. I M7 ble derfor temperaturene i modellens vannanlegg tilpasset LTFV, og endret fra de opprinnelige maks. 70 °C og min. 60 °C i T8 (vannanlegg) til maks. 55 °C og min. 25 °C i M7, tilpasset temperaturene i radiatorene på 55/45°.

Hensikten med M9 var derfor å se om implementering av LTFV og lavere temperaturer i vannanlegget påvirket varmeleveranse til sonene med de opprinnelige radiatorstørrelsene i basemodellen. I motsetning til M1 ville ikke radiatorene nødvendigvis være dimensjonerte for LTFV, og dette skulle undersøkes i M9. I denne modellen T2 (LTFV) implementert i tillegg til T3 (Enhetssjekk), T4 (AHU Foreles.) og en revidert versjon av T8 (vannanlegg).

Modell 10

Hensikten med M10 var å undersøke hvordan elektrisitetsforbruket kunne reduseres ved å forbedre virkningsgraden i ventilasjonsanleggenes vifter. Andre tiltak som implementering av LED-belysning eller implementering av utstyr med lavere energiforbruk var ikke aktuelle tiltak; eksisterende lyspærer skiftes til LED-pærer når pærene slutter å fungere, og lasten for utstyr er vanskelig å regulere grunnet det store omfanget av private datamaskiner og mindre elektriske installasjoner. Dette energiforbruket er også et standardforbruk i “NS 3031: Beregning av bygningers energiytelse”.

I basemodellen var viftenes virkningsgrad 55 %. Fra IDA ICEs brukermanual [41] kom det frem at standard viftetype i ventilasjonsanleggene er sentrifugalvifter. Sentrifugalvifter med bakoverbøyde blader kan få virkningsgrad opp mot 85 %, og er egnet for anlegg med CAV og VAV [42]. Derfor ble virkningsgraden til de ti viftene i modellen (to vifter per AHU) ble økt fra 0,55 til 0,85 i M10. Dette tiltaket ble kalt “T10 (Vifter)”. Også her var T3 (Enhetssjekk) og T4 (AHU Foreles.) implementert.

Endelig modell

Fra analyser av M1 tom. M10 ble lønnsomme energi- og effektsparende tiltak og tiltak som forbedret den termiske komforten simulert. Hovedmålet for rapporten var å finne en kombinasjon av flere mindre tiltak for å redusere energiforbruket og bedre modellens energikarakter. I den endelige modellen ble innføringen av tiltakene basert på erfaringer fra tidligere modeller, hvor hensikten var å finne tiltak som ikke forstyrrer driften av universitetsbyggene, hadde god nåverdi og lav tilbakebetalingstid. De implementerte tiltakene var T2 (LTFV), T3 (Enhetssjekk), T4 (AHU Foreles.), T6 (Varmeveksler), T8 (Vannanlegg) med 55 °C/25 °C settpunkttemperaturer, og T10 (Vifter).

I den endelige modellen var ikke tiltak på bygningskroppen (T1 (Vindu) og T9 (Tak)) implementert, siden tiltakene kan forstyrre den normale driften. T1 (Vindu) var et tiltak som i kombinasjon med andre ga positiv nåverdi. Dette tiltaket ble likevel ikke implementert i den endelige modellen, da det var ønskelig å finne flere mindre tiltak enn de “opplagte” større bygningskonstruksjonelle tiltakene. T9 (Tak) var et større tiltak som ikke var lønnsomt alene, og det ble ikke implementert av samme grunn som T1 (Vindu). Selv om T5 (Radiator kontroll) ga noe reduksjon i effekttopper i midtetasjene, ble dette tiltaket utelatt i den endelige modellen på grunn av usikkerhet rundt kontrollens realistiske effekt. Dette er basert på tester gjort av de ulike inngangsparameterene i modell 6.

Potensielle energibesparelser og lønnsomhet ved sammenslåing av tiltak fra andre modeller

Selv om hovedmålet var å finne flere mindre tiltak, var det også interessant å undersøke energibesparelsen og lønnsomheten for andre sammensetninger av tiltak fra ulike modeller. Tre potensielle kombinasjoner av enkelttiltak eller modeller ble vurdert. Disse potensielle sammenslåingene av tiltak ble simulert i IDA ICE, men her var det kun ønskelig å sammenligne det spesifikke energiforbruket og mulig lønnsomhet uten dypere analyse av tiltakene.

Den første sammensetningen var M4 og M10, som var en kombinasjon av de modellene med lavest fjernvarme- og elektrisitetsforbruk. Dette inkluderte følgende tiltak: T1 (Vindu), T2 (LTFV), T3 (Enhetssjekk), T4 (AHU Foreles.), T5 (Radiator kontroll) og T6 (Varmevekslere) fra M4 og T10 (Vifter) fra M10.

I den andre kombinasjonen var det ønskelig å finne det spesifikke energiforbruket kun ved de to tiltakene som reduserte fjernvarme- og elektrisitetsforbruket mest. Dette var T6 (Varmevekslere) fra M5 og T10 (Vifter) fra M10.

I den tredje kombinasjonen var det ønskelig å undersøke om nåverdien ble positiv når de to tiltakene med høyest investeringskostnader og lavest nåverdi ble simulert i kombinasjon med andre tiltak. T1 (Vindu) og T8 (Tak) hadde høyest investeringskostnader, og negativ nåverdi når de ble simulert separat. Siden tiltakene ga god energibesparelse var det ønskelig å se hvordan modellens energikarakter ble ved å kombinere T8 (Tak) fra M8 til kombinasjonen av M4 og M10.

Oppsummering av de implementerte tiltakene i de ti modellene

Tabell 3.1 oppsummerer hvilke tiltak som er implementert i de ulike modellene. De opprinnelige parameterene i basemodellen (*før* simuleringer) presenteres i tillegg til de nye verdiene (*etter*).

Tabell 3.1: Oversikt over de ulike modellene (M#) og de innførte tiltakene (T#) i modellene. For de ulike tiltakene er de gamle parameterene (før) er presentert, i tillegg til de nye verdiene (etter) til parameterene. Her indikerer X'ene hvilke tiltak som er implementert i hver modell.

| | T1 Vindu | T2 LTFV | T3 Enhets- sjekk | T4 AHU Foreles. | T5 Rad.- kontroll | T6 Varme- veksler | T7 AHU | T8 Vann- anlegg | T9 Tak | T10 Vifter |
|---------------------|------------------------------|---------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|-----------------------|------------------------------|---------------|
| Før: (BM) | 2,19 [W/m ² K] | 80/60 [°C] | Labkjø.+ For.rad | 18 [°C] | P | 0,55 | 18/19 [°C] | 80/20 [°C] | 0,48 [W/m ² K] | 0,55 |
| Etter: | 1,2 | 55/45 | Fjernet | 16 | PI | 0,8 | 21 | 70/60 | 0,18 | 0,85 |
| M1 | X | | | | | | | | | |
| M2 | X | X | | | | | | | | |
| M3 | X | X | X | X | X | | | | | |
| M4 | X | X | X | X | X | X | | | | |
| M5 | | | | | | X | | | | |
| M6 | | | X | | X | | | | | |
| M7 | | X | | X | | | X | X | | |
| M8 | | | | | | | | | X | |
| M9 | | X | X | X | | | | 55/25 | | |
| M10 | | | | | | | | | | X |
| EM | | X | X | X | | X | | 55/25 | | X |

3.3 Lønnsomhetsanalyse

I vurderingen av modellenes lønnsomhet var nåverdimetoden fra ligning 2.1.1 presentert i kapittel 2.1.2 benyttet. I resultatene fra hver enkelt modell ble modellens nåverdi basert på tiltakenes gjennomsnittlige levetid presentert. I modeller med ett tiltak ble nåverdien beregnet etter tiltakets økonomiske levetid. I vurderingen av tiltakene i den endelige modellen var også metoden for tilbakebetalingstid brukt for å identifisere tiltak med kortere tilbakebetalingstid enn 5 år. Ligning 2.1.3 er vist i kapittel 2.1.2. I kapittel 5.12 oppsummeres de økonomiske analysene for enkelte kostnadskrevenne tiltak og for alle modellene. Nåverdien til tiltakene og modellene ble beregnet for hvert år i tiltakets totale eller tiltakenes gjennomsnittlige levetid, og presenteres i en figur som endring i nåverdi over tid.

For alle lønnsomhetsanalysene ble en energipris på 1,2 kr/kWh brukt i beregningen av redusert energikostnad [43]. Energiprisen ble satt litt høyere enn vanlig spotpris for å estimere en helhetlig pris for strøm, nettleie og avgifter. Tiltakenes investeringskostnader, totale energibesparelse, økonomiske levetid og tilbakebetalingstid er presentert i tabell B.1 i vedlegg B.

I beregningen av lønnsomhet var følgende prisestimat på investeringskostnader benyttet:

- For tiltak hvor kontrollstrategi eller settpunkttemperaturer ble endret var investeringskostnaden satt til 0 kr, da dette er enkle tiltak som kun krever kalibrering av eksisterende enheter.
- For nye vinduer var pris per vindu satt til 7000 kr [44] for vinduer med 1,2 W/(m² · K) i U-verdi, og 9000 kr [45] for vinduer med 0,8 W/(m² · K) i U-verdi. I tillegg var en tilleggs-kostnad for montering antatt å være 500 000 kr.

- For nye varmevekslere var pris per varmeveksler satt til 21 000 kr [46]. I tillegg var en tilleggs kost for montering antatt å være 10 000 kr.
- For forbedring av takets U-verdi ble prisen på investeringen estimert til 1200 kr/m² [47].
- For nye sentrifugalvifter var pris per vifte satt til 4000 kr [48].

Kapittel 4

Referansemodell som utgangspunkt for simuleringer

I dette kapitlet presenteres referansemodellen som var utgangspunkt for simuleringene i IDA ICE. Referansemodellen ble vurdert og kalibrert for å danne en basemodell for videre simuleringer.

4.1 Presentasjon av referansemodell for en typisk bygning på Gløshaugen

For å kunne planlegge ENØK-tiltak for bygningsmassen på Gløshaugen var det viktig å forstå bygningenes systemer, drift, tekniske installasjoner og energiforbruk. Disse faktorene gjenspeiles i referansemodellen og blir presentert i dette kapitlet.

Hovedmålet for masteroppgaven i 2018 (heretter referert til som “Master 2018”) var å lage etablere bygningssimuleringsmodeller i IDA ICE av bygningsmassen på Gløshaugen[6]. Alle byggene ble inndelt i fire kohorter og referansemodeller etter byggeår, beliggenhet og bygningstype; “Før 1950”, “1951 - 1970”, “1971 - 1999” og “2000 - 2020”. Kohorten 1951 - 1970 besto av 18 av de 30 bygningene på Gløshaugen, og var dermed den største. Denne kohorten ble grunnlaget for “Referansemodell 2” som var hovedmodellen i Master 2018, og brukt som referansemodell i denne oppgaven. Tabell 4.1 viser en oversikt over bygningene i kohorten, med de respektive byggeårene, oppvarmet BRA og bruksområder. Her står “O” for office (kontor), “L” for laboratorium, og “E” for educational (undervisningsrom).

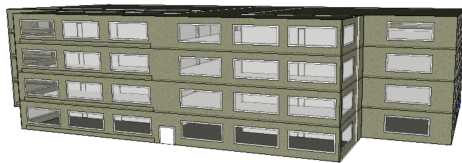
Energi- og varmekonsumet i bygningene ble hentet fra Schneider Electric for året 2016. Det ville vært hensiktsmessig å ha data fra flere år, men dette var ikke mulig grunnet en overgangsfase til nytt energimålesystem. Klimaprofilen og værdata som ble brukt i IDA ICE ble gitt fra Landbruksmeteorologisk tjeneste.

Tabell 4.1: Oversikt over bygningene som inngår i kohorten 1951 - 1970, med angitt byggeår, oppvarmet bruksareal, og bruksområde [6]

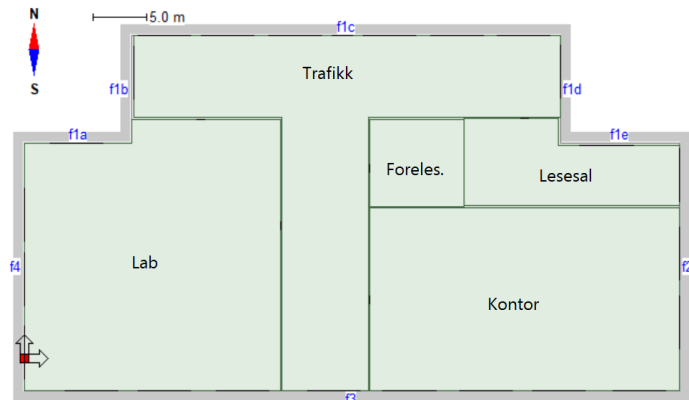
| Nr | Bygning | Byggeår | Oppvarmet BRA [m ²] | Type |
|----|------------------|---------|---------------------------------|-------|
| 1 | Varmeteknisk | 1962 | 15 026 | O+L |
| 2 | Strømteknisk | 1965 | 3 030 | O+L |
| 3 | Metallurgi | 1951 | 2 215 | O+L |
| 4 | Oppredning | 1960 | 7 598 | O+L+E |
| 5 | Verkstedteknisk | 1966 | 11 400 | O+L+E |
| 6 | Materialteknisk | 1958 | 12 600 | O+L+E |
| 7 | Kjemi 1 | 1954 | 6 067 | O+L |
| 8 | Kjemi 2 | 1955 | 3 988 | O+L |
| 9 | Kjemi 3 | 1967 | 5 050 | O+L |
| 10 | Kjemi 4 | 1965 | 4 510 | O+L |
| 11 | Kjemi 5 | 1957 | 4 837 | O+L+E |
| 12 | Kjemihallen | 1959 | 4 440 | O+L |
| 13 | IT-bygget sydfly | 1965 | 3 684 | O+L+E |
| 14 | Sentralbygg 1 | 1961 | 16 265 | O+E |
| 15 | Sentralbygg 2 | 1968 | 12 497 | O+E |
| 16 | Elektro A | 1961 | 6 006 | O+L+E |
| 17 | Elektro B | 1959 | 3 600 | O+L+E |
| 18 | Elektro C | 1960 | 2 889 | O+L+E |

Bygningskroppen og geometri

Arealfordeling, geometri, bruksområder, ventilasjonsanlegg, tekniske systemer, drift og energiattester er noen av dataene som ble innhentet til modellen. Referansemodellen i IDA ICE er vist på figur 4.1.1 og planløsningen er presentert i figur 4.1.2. Geometrien på modellen er basert på planløsninger av bygninger på Gløshaugen og modellen har et totalt gulvareal på 7159.2 m² fordelt på fire etasjer (1790 m² per etasje). Dette er basert på gjennomsnittsverdier av oppvarmet BRA. I modellens fire etasjene er det fem sonekategorier for ulikt bruk: lesesal, kontor, laboratorium (lab), forelesningsrom og trafikkareal. Modellen har én inngangsdør og totalt 96 vinduer (24 per etasje). Bygningskroppen ble basert på gjennomsnittlige U-verdier fra energiattester levert av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE). U-verdier og parametrene som ble lagt inn i IDA ICE er vist i tabell 4.2.



Figur 4.1.1:
Referansemodellen i IDA ICE



Figur 4.1.2: Referansemodellens planløsning i IDA ICE

Tabell 4.2: U-verdier og inngangsparametre i IDA ICE for bygningskroppen til referansemodellen [6]

| Kategori | Parameter | Referansemodell | Kommentar |
|---------------------|--|-----------------|---|
| U-verdier | Yttervegg [W/m ² K] | 0,57 | |
| | Indrevegg [W/m ² K] | 0,62 | Standard i IDA-ICE |
| | Ytre gulv [W/m ² K] | 0,19 | |
| | Indre gulv [W/m ² K] | 2,39 | Standard i IDA-ICE |
| | Vinduer [W/m ² K] | 2,19 | Åpning av vinduer er behovsstyrt |
| | Dører [W/m ² K] | 1,09 | Standard i IDA-ICE |
| | Tak [W/m ² K] | 0,48 | |
| Generelt for fasade | Normalisert kuldebroverdi [W/m ² K] | 0,10 | m ² i gulvareal |
| | Lekkasjetall [1/h] | 3,07 | Lekkasjetallet er oppgitt som n50 = målt luftlekkasje/volum |
| | Arealandel for vindu [%] | 13,16 | |

For å begrense antall soner i referansemodellen ble det totale bruksarealet i de ni opprinnelige sonekategoriene i bygningsmassen forenklet til fem sonekategorier i IDA ICE, henholdsvis presentert i tabell 4.3 og tabell 4.4.

Tabell 4.3: Prosentvis sonefordeling i kohorten

| Romtype | Areal [%] |
|----------------------|-----------|
| Kontor | 22,10 |
| Lesesal | 6,16 |
| Forelesningssal | 3,22 |
| Laboratorium | 22,64 |
| Trafikkareal | 23,05 |
| Tekniske rom | 8,76 |
| Verksted | 3,34 |
| Vask- og sanitærrrom | 2,43 |
| Annet | 8,29 |

Tabell 4.4: Prosentvis sonefordeling i referansemodellen

| Romtype | Areal [%] |
|-----------------|-----------|
| Kontor | 27,54 |
| Lesesal | 7,65 |
| Forelesningssal | 4,00 |
| Laboratorium | 32,7 |
| Trafikkareal | 28,63 |

Bruksmønster i modellen

Bruksmønsteret var basert på erfaringer hos NTNU drift. Utenom ferier og eksamensperioder var bruksmønsteret satt til normal drift hvor det var stor pågang i de fleste sonene fra 08:00 - 16:00 i ukedagene. I lesesaler og kontorer var det en lav grad av bruk også i helgene. Forelesningsrom var okkupert i 45 minutters intervaller fra 08:00 - 16:00, og trafikkareal var befolket i de resterende 15 minuttene mens studenter forflytter seg mellom forelesningssalene. I eksamensperiodene var det ekstra stor pågang på ettermiddager og kvelder i lesesaler.

Ventilasjonsystemer og parametere

Data om ventilasjonssystemene ble hentet fra energiattester og NTNU Drift. I referansemodellen er det fem ventilasjonsanlegg (AHU fra eng. "Air Handling Units") for de fem sonekategoriene; tre med CAV og to med VAV. I laboratoriet er det en rekuperativ varmegjenvinner for å unngå blanding av avtrekksluft og tilluft, mens de andre anleggene har regenerative gjenvinnere. Siden noen ventilasjonsanlegg i bygningskohorten ikke har varmegjenvinnere blir den gjennomsnittlige effektiviteten lav, og virkningsraden til varmegjenvinnerene i referansemodellen var derfor satt til 55 %. Den spesifikke vifteeffekten (SFP) var 2,64 kW/(m³/s), og spesifikk tilluft ble satt til 9,71 m³/(m² · h). For de ulike sonene er ventilasjonparameterne i IDA ICE vist i tabell 4.5.

Tilluftstemperaturene i ventilasjonsanleggene ble estimert av NTNU Drift til å variere mellom 18 - 22 °C. I Master 2018 ble tilluftstemperaturene satt til 19 °C ved utetemperaturer opp til 10 °C, og 18 °C ved utetemperaturer over 10 °C. Siden tillufttemperaturen stiger med 1 °C over viften ga dette luft med temperaturer på 19-20 °C til sonene.

Tabell 4.5: Inngangsparametere for ventilasjonsanleggene i referansemodellen [6]

| Sone | Ventilasjons system | Minste avkasttemperatur fra varmegjenvinner [°C] | Lufttilførsel driftstid [m ³ /(h·m ²)] | Driftstid |
|-------------|------------------------------------|--|---|-----------------------|
| Lesesal | VAV, CO ₂ | -10 | 9,71 | Alltid på |
| Kontor | CAV | -10 | 9,71 | 6-18 (9-15) |
| Spesialrom | CAV | 0 | 9,71 | Alltid på |
| Forelesning | VAV, CO ₂ og temperatur | -10 | 21,60 | Alltid på i hverdager |
| Trafikk | CAV | -10 | 8,07 | 6-18 (9-15) |

Eletrisitetsforbruk

Da elektrisitetsprofilen til referansemodellen ble utarbeidet ble ulike inngangsverdier for belysning, utstyr og grunnlast testet for å finne en tilfredsstillende elektrisitetsprofil. Dette resulterte i en profil med belysningslast på 4 W/m^2 og en grunnlast på 7.826 W/m^2 . For utstyr ble lasten 1.75 W/m^2 for lesesal, kontor og spesialrom, 1 W/m^2 i forelesningsrom og 0.5 W/m^2 i trafikkareal. I tillegg ble det lagt inn en grunnlast på 2594.8 W i spesialrom. Disse interne lastene tilfører også noe varme til rommet.

Varme og kjøling

I de vanlige arealene på Gløshaugen er det ikke kjøling; dette har kun rom med spesialisert utstyr og spesielt behov. I referansemodellen var det derfor implementert en ideell kjøleenhet i hvert laboratorium.

Alle byggene i kohorten får levert fjernvarme til romoppvarming. Varmen leveres gjennom vannbårne radiatorer som er designet for tur-retur temperatur på henholdsvis $80 \text{ }^\circ\text{C}$ og $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Fra energiattestene er effektiviteten i varmesystemet satt til 87% . I IDA ICE er radiatorene dimensjonert etter maks levert effekt ved en varmelastsimulering ved bruk av en ideell oppvarmingsenhet. For å kompensere for noe av varmen som går inn i veggen bak radiatoren, er de overdimensjonert med 10% for å sikre god nok varmetilførsel til rommet. Størrelsen på radiatorene i de ulike romtypene er vist i tabell 4.6

Tabell 4.6: Dimensjonering av radiatorer i IDA ICE Modell 1018 [6]

| Sone | Max levert effekt Ideeloppvarmingsenhet [W] | Dimensjonert radiator kapasitet [W] |
|-------------|--|-------------------------------------|
| Kontor | 30 240 | 33 500 |
| Spesialrom | 28 604 | 31 500 |
| Lesesal | 8 273 | 9 000 |
| Forelesning | 2 014 | 2 000 |
| Trafikk | 34 407 | 38 000 |

ENØK-tiltak og resultater

I Master 2018 ble større ENØK-tiltak vurdert for modellen. Dette var hovedsaklig konstruksjonelle tiltak som utskiftning av vinduer, etterisolering av tak og vegger, og forbedring av kuldebroer. I tillegg var lufttetting, varmegjenvinning av ventilasjon og lavtemperatur varmesystem tiltak som ble vurdert. Tabell 4.7 viser tiltakene som ble simulert i rapporten, og tabell 4.8 og tabell 4.9 viser besparelsen av energi i modellen. Her står "Bygg 2" for referansemodellen til bygningskohorten 1951 - 1970.

Tabell 4.7: Oversikt over tiltakene som ble testet i Master 2018 [6]

| # | Tiltak | Kommentar |
|-----|-------------------------------|--|
| T1. | Yttervegg 1 | Etterisolering av yttervegg 50 mm mineralull |
| T2. | Yttervegg 2 | Etterisolering av yttervegg 100 mm mineralull |
| T3. | Tak | Etterisolering av tak 50 mm mineralull |
| T4. | Vindu 1 | Utskifting av vindu til TEK17-nivå, U-verdi 0,8 W/m ² K |
| T5. | Vindu 2 | Utskifting av vindu til ambisiøst nivå, U-verdi 0,6 W/m ² K |
| T6. | Lufttetthet, lekkasjetall N50 | Forbedring av lekkasjetall til 1,5 l/h ved 50 Pa trykkforskjell |
| T7. | Normalisert kuldebro | Forbedring av normalisert kuldebroverdi til 0,06 W/m ² K |
| T8. | Varmegjenvinning ventilasjon | Utskifting av varmegjenvinner med 80% |
| T9. | Lavtemperatur varmesystem | Gå over fra 80/60 °C til 60/40 °C system |

Tabell 4.8: Resultater fra ENØK-tiltak i referansemodellen, 1 [6]

| | Bygg 2 Ref. | T1 Yttervegg 1 | T2 Yttervegg 2 | T3 Tak | T4 Vindu 1 | T5 Vindu 2 |
|---|----------------|-------------------|-------------------|-----------|---------------|---------------|
| Totalt spesifikk forbruk [kWh/m ² /år] | 251,8 | 247,2 | 244,7 | 247,2 | 239,0 | 237,4 |
| Besparelse [kWh/m ² /år] | | 4,6 | 7,1 | 4,6 | 12,8 | 14,4 |
| Prosentvis besparelse [%] | | 1,83% | 2,82% | 1,83% | 5,08% | 5,72% |

Tabell 4.9: Resultater fra ENØK-tiltak i referansemodellen, 2 [6]

| | T6 Lufttetthet | T7 Normalisert kuldebro | T8 Varmegjenvinning ventilasjon | T9 Lavtemp. varmesystem |
|---|-------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| Totalt spesifikk forbruk [kWh/m ² /år] | 246,3 | 248,1 | 186,5 | 254,6 |
| Besparelse [kWh/m ² /år] | 5,5 | 3,7 | 65,3 | -2,8 |
| Prosentvis besparelse [%] | 2,18% | 1,47% | 25,93% | -1,11% |

Resultatene viste at forbedret varmegjenvinning i ventilasjonsanlegget var tiltaket som ga best energisparing, med 25,93 % reduksjon i spesifikt energiforbruk. Etter dette kom utskifting av vinduer til vinduer med U-verdier 0,8 og 0,6 W/(m² · K) med hhv. 5,72 og 5,08 % energibesparelse.

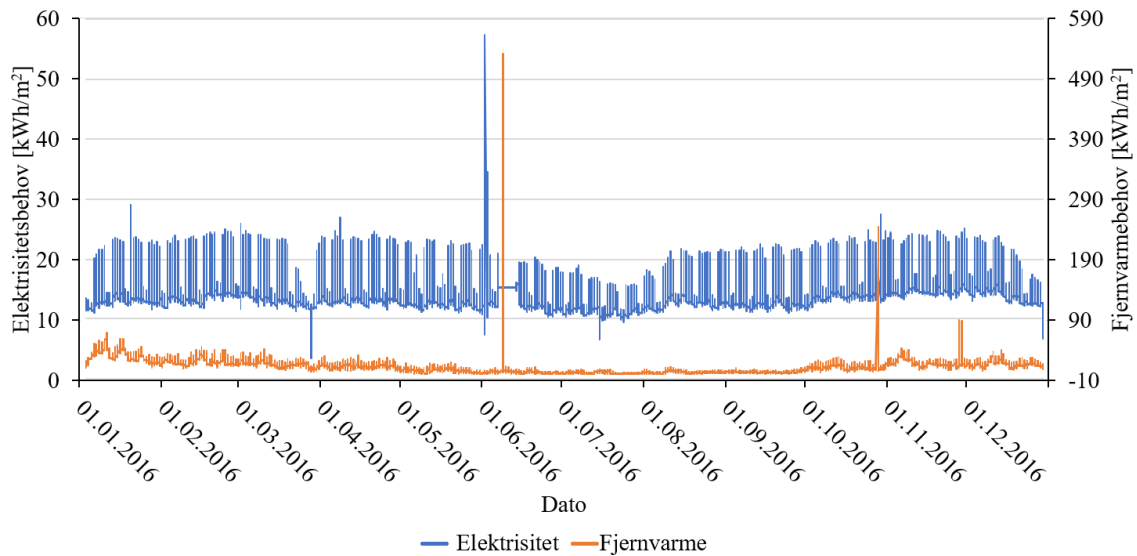
4.2 Helhetlig vurdering av referansemodellen

Etter studie av Master 2018 ble det klart at det lå et grundig arbeid bak innsamling av data til referansemodellen. Modellen hadde en god etterligning av bygningskohortens energiprofiler og flere tester ble gjort for å finne de beste lastene for utstyr, belysning og okkupanter. Studentene hadde gjort en god jobb med å samle og lage et datagrunnlag for bygningsmassen på Gløshaugen i modellen, og subjektivt sett var bygningsmodellens utseende svært lik et typisk bygning på Gløshaugen.

Kritikk av modellen går hovedsaklig på manglende vurdering av inneklimate i; i enkelte rom var temperaturene uakseptabelt høye i over 1000 timer i året. Dette var gjaldt alle forelesningsrom og grunnet trolig i for høye temperaturer i ventilasjonsanlegget, et høyt antall personer i sonene store deler av dagen, og radiatorene som tilførte varme til sonene. Sonene har heller ingen vinduer for lufting og er omringet av andre oppvarmede rom. Geometrien kan likevel være representabelt for enkelte forelesningsrom da noen av NTNUs forelesningssaler er uten vinduer for manuell lufting, men empiriske observasjoner tilsier at forelesningsrommene oftere er for kalde enn for varme. Etterisolering av fasader ble simulert som ENØK-tiltak for referansemodellen, men dette er ikke aktuelle tiltak for hele bygningsmassen da flere av fasadene er vernet. Tiltaket for utskiftning av vinduer hadde U-verdier ned mot $0.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ hvilket er mer ambisiøst enn TEK 17-kravet som ligger på $1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. God kvalitet og lave u-verdier er bra for å redusere energiforbruket mer, men med økt kvalitet øker investeringskostnadene og tiltaket blir ikke nødvendigvis lønnsomt.

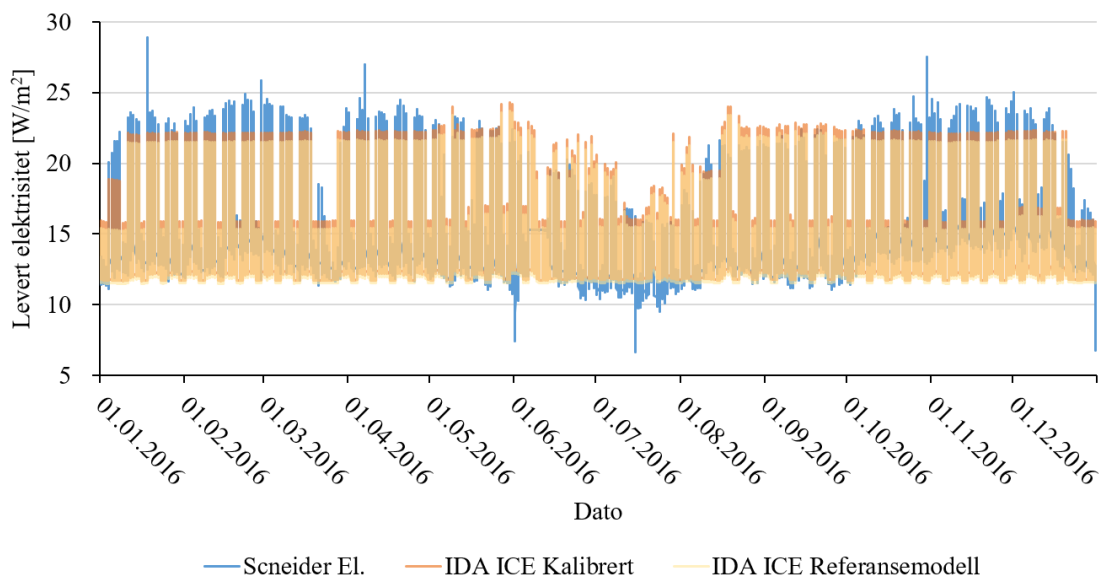
4.3 Kalibrering av referansemodellen

Med tilgang til referansemodellen i IDA ICE og energidata fra Schneider Electric ble simulert og faktisk energi- og varmekonsum sammenlignet. Analyse av energimålinger fra Schneider Electric viste noen svært høye effekttopper gjennom året. Etter gjennomgang av disse ble det klart at enkelte effekttopper var summen av flere timer med manglende registrert data. Disse timene ble sammenlignet med den samme timen i uken før og effekttoppen ble fordelt utover timene med manglende data. Enkelte målinger skyldes ikke manglende verdier, men NTNU Drift kunne ikke svare på hva dette kom av. Slike toppe blir merket som avvik. Et eksempel på et slikt avvik er vist i figur 4.3.1 for både elektrisitet og fjernvarme.

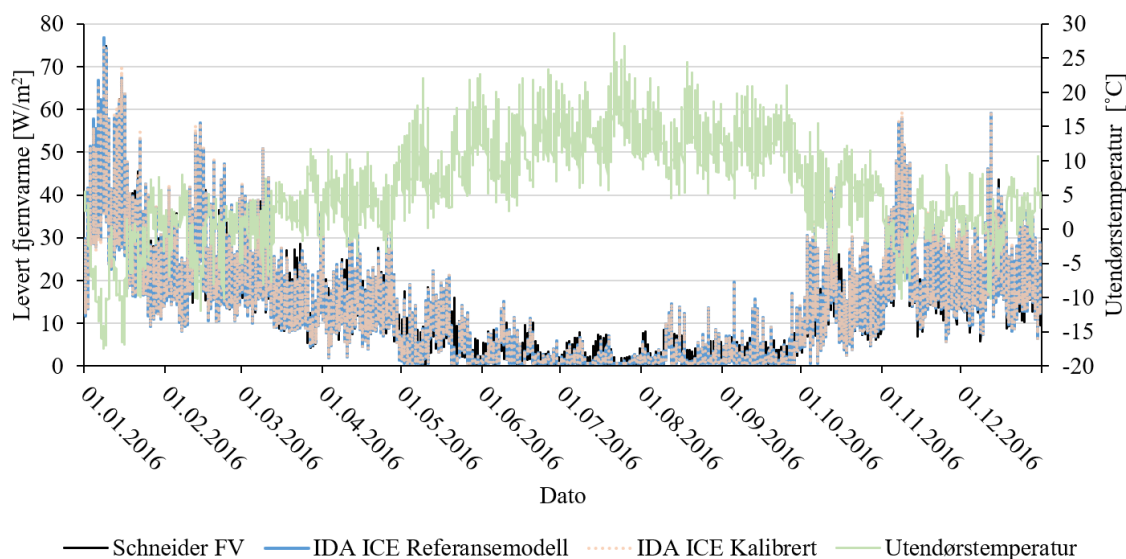


Figur 4.3.1: Eksempel på avvik i effektmålinger fra Schneider Electric

Avvik mellom faktisk og simulert spesifikt elektrisitet- og fjernvarmeforbruk ble målt for hver time. Gjennom flere simuleringer ble en kalibrering gjennomført for å få modellen i IDA ICE mer lik energiprofilen fra Schneider Electric. Modellens inngangsdør var konstant lukket i referansemodellen; denne ble satt til å åpnes med samme intervaller som ved okkupanter i trafikkareal da studenter ofte forflytter seg mellom bygninger, og dørene går opp og igjen i store deler av tiden mellom forelesninger. I den første uken av januar var simulert elektrisitetsforbruk (EL-forbruk) svært lavt sammenlignet med faktisk elektrisitetsforbruk; her ble bruksmønsteret til personene i bygget endret fra “ingen bruk” til 0,8 ganger normal bruk. Dette påvirket også fjernvarmeforbruket i noen grad. For å øke energiforbruket ble virkningsgraden til viftene i ventilasjonsanleggene satt ned fra 0,6 til 0,55. En presentasjon av profilen for faktisk og simulert spesifikt elektrisitetsbehov og fjernvarmebehov for referansemodellen og den kalibrerte modellen er vist i henholdsvis figur 4.3.2 og figur 4.3.3.



Figur 4.3.2: Sammenligning av faktisk EL-forbruk fra Schneider Electric mot simulert EL-forbruk referansemodellen og den kalibrerte modellen i IDA ICE



Figur 4.3.3: Sammenligning av faktisk FV-forbruk fra Schneider Electric mot simulert FV-forbruk fra referansemodellen og den kalibrerte modellen i IDA ICE

Resultatet av kalibreringen viste at energiforbruket i den kalibrerte modellen samsvarte bedre med de faktiske energidataene. I tabell 4.10 presenteres det årlige gjennomsnittlige avviket mellom referansemodellen, den kalibrerte modellen og Schneider Electric. Det gjennomsnittlige årlig avviket ble redusert med 62 % for elektrisitet og 13 % for fjernvarme sammenlignet med referansemodellen. Den kalibrerte modellen ble en “basemodell” for simuleringer av ENØK-tiltak og refereres til det heretter. Basemodellens geometri, okkupertid, tappevann-, utstyr- og lysbruk er likt som i referansemodellen, men parametere som U-verdier, virkningsgrader, kontroll og temperaturer vil endres i videre simuleringer.

Tabell 4.10: Sammenligning av spesifikt elektrisitets- og fjernvarmebehov i referansemodellen- og kalibrert modell mot faktisk forbruksdata fra Schneider Electric. Reduksjon av gjennomsnittlig avvik på årsbasis er også presentert.

| | Elektrisitet | Fjernvarme |
|---|--------------|------------|
| Spesifikt forbruk [kWh/m²] | | |
| Schneider | 137,6 | 117,7 |
| Referansemodellen | 132,0 | 110,9 |
| Kalibrert modell | 135,6 | 111,9 |
| Gjennomsnittlig årlig avvik fra simulert til faktisk forbruk [W] | | |
| Referansemodellen | 4 568 | 5 467 |
| Kalibrert modell | 1 737 | 4 754 |
| Reduksjon av avvik | 62 % | 13 % |

Kapittel 5

Resultater fra simuleringer av ENØK-tiltak

Dette kapittelet presenterer resultatene fra simuleringer av basemodellen og M1 til og med M10. Felles for alle modellene er en kort presentasjon av modellenes hensikt, reduksjon i spesifikt energiforbruk sammenlignet med basemodellen, og en lønnsomhetsanalyse med grunnlag i modellens totale energireduksjon og tiltakenes investeringskostnader. For hver modell blir tiltakenes innvirkning på modellen, funksjonalitet og resultat også diskutert før erfaringer fra modellen oppsummeres.

5.1 Basemodellen

Basemodellen var utgangspunktet for videre simuleringer av ENØK-tiltak. Tabell 5.1, og 5.2 viser resultater av basemodellens spesifikke energibehov, pumpeeffekt, og -energi og massestrøm i modellens vannanlegg, respektabelt. Dette er resultater av målinger som kommende modeller også blir vurdert i og vurdert opp mot. Basemodellens spesifikke energibehov på 247 kWh/m² tilsvarer energikarakteren F.

Tabell 5.1: Basemodellens spesifikke energi-, fjernvarme- og elektrisitetsbehov. Dette er det spesifikke energibehovet som videre modeller sammenlignes med.

| | Spesifikt energibehov [kWh/m ²] | Spesifikt FV-behov [kWh/m ²] | Spesifikt EL-behov [kWh/m ²] |
|------------|--|---|---|
| Basemodell | 247 | 112 | 135 |

Tabell 5.2: Maksimalt målte pumpeeffekt, mengde elektrisk energi til pumpene, og gjennomsnittlig massestrøm i modellens vannanlegg

| | Maks. pumpeeffekt i vannanlegget [W] | Sum pumpeenergi i vannanlegget [kWh] | Gjen.snitt masse- strøm i vannanlegget [kg/s] |
|------------|--|--|---|
| Basemodell | 270 | 448 | 0,317 |

Tabell 5.3 viser topplasten for levert varme og mengden varme som er levert til alle sonene i basemodellen. Det er en sone fra hver sonekategori i hver etasje. Tabellen viser at det er høyt antall UT i forelesningsrommene fra simuleringen, og ellers er tallet lavt for de andre sonene.

Tabell 5.3: Basemodellens målte maksimale varmeeffekt og levert varme fra radiatorene, og summen av uakseptable temperaturtimer for hver sone i modellen. Dette er varmeeffekten, varmebehovet og den termiske komforten som videre modeller sammenlignes med. Tallene i sonenavnene angir etasjen de er lokalisert i.

| Sone | Maks. Varmeeffekt [W] | Varme levert fra radiator til sonen [kWh] | Uakseptable temperaturtimer |
|---------------|-----------------------|---|-----------------------------|
| Lesesal 1 | 4 631 | 2 407 | 9 |
| Kontor 1 | 13 503 | 4 678 | 8 |
| Lab 1 | 14 626 | 12 252 | 10 |
| Forelesning 1 | 720 | 21 | 1050 |
| Trafikk 1 | 26 193 | 17 351 | 2 |
| Trafikk 2 | 9 988 | 4 097 | 1 |
| Forelesning 2 | 0 | 0 | 1068 |
| Lab 2 | 6 668 | 4 701 | 6 |
| Kontor 2 | 6 078 | 875 | 1 |
| Lesesal 2 | 2 268 | 702 | 4 |
| Trafikk 3 | 10 919 | 5 057 | 1 |
| Forelesning 3 | 0 | 0 | 1025 |
| Lab 3 | 7 238 | 5 741 | 5 |
| Kontor 3 | 7 098 | 1 246 | 1 |
| Lesesal 3 | 2 411 | 853 | 3 |
| Trafikk 4 | 21 428 | 25 407 | 2 |
| Forelesning 4 | 1 206 | 217 | 221 |
| Lab 4 | 19 462 | 28 676 | 13 |
| Kontor 4 | 18 347 | 16 608 | 10 |
| Lesesal 4 | 6 559 | 5 770 | 9 |

5.2 Modell 1

I denne modellen var hensikten å undersøke om reduksjon av vinduenes U-verdi til TEK 17-nivå (T1 (Vindu)) kunne redusere varmebehovet slik at radiatorene ble overdimensjonert ved vanlige tur-returtemperaturer på 80 °C/60 °C, og om dette ga mulighet for å redusere temperaturen i byggets fjernvarmenettet til LTFV i videre utvikling av modellen ble også undersøkt.

Resultatet av simuleringen viste at mengde varme levert til sonene fra radiatorene ble redusert med 40 %, tilsvarende ca. 55 200 kWh per år. Dette skyldes reduksjonen i varmetap på 36%, og økt varmetilskudd på 27% gjennom vinduene, vist i tabell 5.4. Tiltaket førte til en reduksjon i effekttopper for varme til de 20 sonene med i gjennomsnitt 13%. Den gjennomsnittlige massestrømmen i vannanlegget sank med 30%, som videre førte til en reduksjon i pumpeeffekt for vannanlegget med 5,7 %, tilsvarende 25 kWh. Dette var et resultat av at varmebehovet i modellens soner sank, og vannet i vannanlegget kunne sirkulere saktere og levere lik mengde varme. Simuleringen viste også en liten økning i elektrisitetsforbruk, som skyldes økt kjølebehov til laboratoriene. Denne økningen var på 340 kWh, og anses som ubetydelig sammenlignet med det totale elektrisitetbehovet på 970 MWh per år.

Tabell 5.4: Oversikt over varmetap fra alle sonene gjennom vinduer, og tilført varme til soner gjennom vinduer for basemodellen og modell 1. Implementering av T1 (Vindu) gir et betydelig lavere varmetap, i tillegg til at mer varme absorberes av vinduet

| | Varmetap gjennom vinduer [kWh] | Varmetilførsel gjennom vinduer [kWh] |
|------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| Basemodell | 238 500 | 9 800 |
| Modell 1 | 152 400 | 12 400 |
| Endring | - 36 % | 27 % |

Ved å analysere termisk komfort for alle sonene kom det frem at denne ble forverret av å senke U-verdien på vinduene; det ble totalt 33 uakseptable temperaturtimer mer i modellen, grunnet en liten økning i operativ temperatur i hver sone.

For å undersøke om radiatorene ville vært tilpasset LTFV ble topplasten for varme sammenlignet med den dimensjonerte radiatorkapasiteten. Alle sonene i hver sonekategori har lik radiatordimensjon. Fra Maste 2018 ble ideelle varmeenheter brukt for å dimensjonere radiatorene. Radiatorene ble overdimensjonert med 10% siden noe av varmen til de veggmonterte radiatorene vil gå inn i veggen. Tabell 5.5 viser maks levert effekt ved ideell oppvarmingsenhet og dimensjonert radiatorkapasitet fra Master 2018, i tillegg til topplastene for levert varme fra radiatorene til sonene i modell 1. En kalkulert prosentvis overdimensjonering av radiatorene i M1 ble kalt “overdimensjoneringsfaktor”, og ble beregnet for alle radiatorene.

Tabell 5.5: Presentasjon av dimensjoneringsgrunnlaget for radiatorene i Master 2018, og topplastene for varme i sonene i M1. En overdimensjoneringsfaktor er kalkulert for å vise hvor overdimensjonert radiatorene er i forhold til topplastene.

| | Ideell enhet, BM [W] | Dim. rad.kap, BM [W] | Max effekt fra rad, Modell 1 [W] | Overdim.-faktor i Modell 1 |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Kontor | 30 240 | 33 500 | 16 812 | 99 % |
| Lab | 28 604 | 31 500 | 17 938 | 76 % |
| Lesesal | 8 273 | 9 000 | 6 811 | 32 % |
| Forelesning | 2 014 | 2000 | 1 194 | 68 % |
| Trafikk | 34 407 | 38 000 | 23 657 | 61 % |

Tabellen viser at radiatorene er dimensjonert for mye høyere topplaster enn hva modellen med forbedrede vinduer trenger; eksempelvis hadde radiatorene i kontorene dobbelt så høy kapasitet som nødvendig. Dette ga en indikasjon om at radiatorene var dimensjonert for neste generasjons fjernvarme (LTFV).

Ideelle varmeenheter er bra for å dimensjonere radiatorer fordi de gir et utgangspunkt for dimensjonerende varmeeffekt, *men* enhetene leverer varme ved oppvarmet luft, og gir den momentane varmen som er nødvendig for å opprettholde temperaturen i sonen. I realiteten kan ikke en varmeenhet levere nødvendig varme momentant. Det knyttes derfor usikkerhet til om de reelle radiatorene på Gløshaugen kan være dimensjonerte for LTFV, som de trolig er i modellen.

T1 (Vindu) førte til en reduksjon av spesifikk energi på 7.0 kWh/m^2 per år i M1. Til sammenligning viste en reduksjon i U-verdier til $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ en reduksjon i spesifikt energiforbruk på 12.8 kWh/m^2 . I tabell 5.6 oppsummeres endringen i spesifikk energiforbruk sammenlignet med basemodellen, i tillegg til en lønnsomhetsanalyse hvor beregningsgrunnlaget er presentert i tabellen. Lønnsomheten for vindustiltaket fra Master 2018 var også vurdert som "Vindu 2" for å se om tiltaket ville vært lønnsomt med lavere U-verdi.

Tabell 5.6: Reduksjon av spesifikt energiforbruk i modell 1 sammenlignet med basemodellen, og økonomisk analyse av modellen. I denne modellen var kun ett tiltak implementert, så energisparingen og den økonomiske analysen gjelder også for tiltak 1. "Vindu 2" er nåverdien med energireduksjonen funnet i Master 2018.

| Energi- endring: | Spesifikk energi [kWh/m ²] | Spesifikk FV [kWh/m ²] | Spesifikk EL [kWh/m ²] |
|---------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| M1 / T1 | - 7,0 | - 7,0 | 0,0 |

| Økonomi- analyse: | Investerings- kostnad [kr] | Energibesparelse per år, [kWh] | Levetid (snitt eller tot) [år] | Nåverdi |
|----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| M1 / T1 | 1 200 000 | 50 125 | 40 | - 398 000 |
| "Vindu 2" | 1 460 000 | 91 638 | 50 | 6 000 |

Den økonomiske analysen viste at T1 ikke var et lønnsomt tiltak. Dersom vinduene har U-verdi lik $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ og investeringskostnadene holdes nede kan tiltaket være lønnsomt, men om investeringskostnadene øker med kun 0,41% vil nåverdien bli lik negativ.

Erfaring fra modell 1:

T1 (vindu) var er bra tiltak for å redusere modellens energiforbruk, men tiltaket alene er ikke en lønnsom investering.

5.3 Modell 2

Modell 2 var en videreutvikling av modell 1, hvor hensikten med modellen var å undersøke om de overdimensjonerte radiatorene fra M1 kunne levere nok varme til modellens soner med lavtemperatur fjernvarme. Tur-retur temperaturene i radiatorene ble derfor endret fra 80/60 °C til 55/45 °C. Det var også interessant å se om implementering av LTFV ville øke energiforbruket til pumper i vannanlegget for å sirkulere mer vann gjennom radiatorene.

Resultatet av simuleringen viste at fjernvarmebehovet ble redusert med 15 % når T2 ble kombinert med T1. Reduksjonen av elektrisitetsbehov var kun 1,1 %, og det totale energibehovet sank med 7,1 %. Elektrisitetsbehovet til kjøling steg noe i M1, men behovet for kjøling eliminert ved å implementere T2. Dette tydet på at kjøleenhetene i laboratoriene ble overflødige når temperaturene i radiatorene ble redusert.

Det var forventet at pumpeenergien ville øke for å kompensere for de reduserte temperaturene i radiatorene. Simuleringen viste derimot en reduksjon i pumpeenergi med 1,2 % fra M1 til M2. Mengden varme som ble levert til sonene og den termiske komforten i modellens soner var også uendret. Dette indikerer at radiatorene kan levere like mye varme til sonene ved temperaturer på 55/45 °C, og at radiatorenes dimensjonerte kapasitet er tilpasset LTFV uten å måtte øke massestrømmen i vannanlegget for økt sirkulasjon av varmt vann.

Resultatene fra modell 2 viste en forbedret energiprofil sammenlignet med basemodellen, og ved å sammenligne M2 med M1 ble det klart at radiatorene var dimensjonert for LTFV i når varmetap fra vinduer ble redusert. Tabell 5.7 presenterer reduksjon i spesifikt energiforbruk i tillegg til en økonomisk analyse av modellen. Det ble antatt at investeringskostnadene for LTFV er lik 0 da de eksisterende radiatorene ble beholdt, og fordi dette er et kontrolltiltak av temperaturer. Derfor var investeringskostnaden og levetiden lik for ved T1 (vindu). Lønnsomhetsanalysen viste at kombinasjonen av T1 (Vindu) og T2 (LTFV) var lønnsomt.

Tabell 5.7: Reduksjon av spesifikt energiforbruk i modell 2 sammenlignet med basemodellen, og økonomisk analyse av modellen. I denne modellen var nye vinduer og LTFV implementert, og resultatene tar for seg kombinasjonen av disse.

| Energi- endring: | Spesifikk energi [kWh/m ²] | Spesifikk FV [kWh/m ²] | Spesifikk EL [kWh/m ²] |
|---------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| M2 | - 24,2 | - 22,7 | - 1,5 |

| Økonomi- analyse: | Investerings- kostnad [kr] | Energibesparelse per år, [kWh] | Levetid (snitt eller tot) [år] | Nåverdi |
|----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| M2 | 1 200 000 | 173 061 | 40 | 1 569 000 |

Erfaring fra modell 2:

T2 (LTFV) var et godt tiltak for å redusere fjernvarmebehovet, og var et lønnsomt kombinasjon med T1. Med redusert varmetap fra vinduene ble radiatorene overdimensjonerte nok for implementering LTFV. Til senere simuleringer ville det vært interessant å undersøke om radiatorene er dimensjonert for LTFV uten å oppgradere vinduene.

5.4 Modell 3

Modell 3 er en videreutvikling av Modell 2. I denne modellen ble tiltakene T3 (Enhetssjekk), T4 (AHU Foreles.) og T5 (Radiatorkontroll) brukt sammen med T2 (LTFV) og T1 (Vindu) fra Modell 2. De tre delmålene i M3 var å undersøke om kjøleenhetene og enkelte radiatorer kunne fjernes fra modellen for å redusere effektforbruket, undersøke om reduksjon i settpunkttemperaturene i AHU Forelesning kunne bedre sonenes termiske komfort, og undersøke om endring i radiatorkontroll kunne redusere topplastene for varme i modellens soner.

Resultatene av simuleringen viste ingen endring i termisk komfort i laboratoriene hvor kjøleenhetene ble fjernet, og at elektrisitetsforbruket ble redusert med ca. 4 000 kWh. Dette indikerte at kjøleenhetene var unødvendige i sonene. I M2 leverte radiatorene i forelesningsrommene 217 kWh på ett år, og sonene hadde svært høye operative temperaturer. Elimineringen av de radiatorene i disse sonene påvirket energiforbruket og termisk komfort svært lite. Tiltak T3 (Enhetssjekk) reduserte modellens energiforbruk i liten grad, men simuleringen viste at små kalibreringer i varme- og kjølesystemer kan gi lavere forbruk.

Summen av antall UT i modellen ble redusert med 91% sammenlignet med M2, som hovedsakelig var et resultat av T4 (AHU Foreles). Temperaturene i forelesningssonene var fortsatt høye, men ventilasjonstemperaturer lavere enn 16 °C kan gi stort ubehag for personer som får den kalde luften på huden. De operative temperaturene var derfor ansett som akseptable for forelesningsrommene.

Sammenlignet med basemodellen var den gjennomsnittlige reduksjonen av topplastene fra radiatorene 37 %. Sett bort fra forelesningsrommene hvor effektoppene er eliminert, er reduksjonen på gjennomsnittlig 21% for de resterende sonene i modellen. Tabell 5.8 viser hvordan energiforbruket er endret i M3, sammenlignet med M2 og basemodellen. Sammenlignet med basemodell var først og fremst varmebehovet til sonene og fjernvarmebehovet til M3 redusert. Med en reduksjon i pumpeenergien og energi i ventilasjonen, blir også det totale elektrisitetsbehovet mindre. Ved å implementere T3 (Enhetssjekk), T4 (AHU Foreles) og T5 (radiatorkontroll) var det forventet en reduksjon i elektrisitetsforbruk og fjernvarmebehovet, men resultatet viste en økning på 9% i fjernvarmebehov sammenlignet med M2.

Tabell 5.8: Endring i energiforbruk og massestrøm i modell 3 sammenlignet mot modell 2 og basemodell

| Sammen- ligning mot: | FV- behov [kWh] | EL- behov [kWh] | Totalt energibehov [kWh] | Pumpeenergi i vannanlegg [kWh] | Radiator- varme [kWh] | Masse- strøm [kg/s] |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Basemodell | - 13 % | -1 % | - 6 % | - 13 % | - 52 % | - 60 % |
| Modell 2 | 9 % | 0 % | 4 % | - 7 % | - 32 % | - 43 % |

Siden T3 (Enhetssjekk) og T4 (AHU Foreles.) reduserte varmebehov måtte økningen av fjernvarmebehov skyldes endringen av kontrolleren for radiatorene. Effekttoppene for varme i sonene var tilnærmet uendret i første og fjerde etasje sammenlignet med M2, men for sonene i andre og tredje etasje var det en reduksjon av effekttopper på gjennomsnittlig 25%. Mengde levert varme i disse andre og tredje etasje ble halvert, mens varmeleveransen i første og fjerde etasje ble redusert med 31%. T5 (Radiatorkontroll) hadde ikke har noen signifikant virkning på effekttoppene for etasjene med varmetap mot grunnen og taket, men med kontrolleren reduserte varmebehovet til midt-etasjene. Samtidig økte fjernvarmebehovet i modellen. For å finne årsaken til dette ble tiltaket bli testet ut uten T1 (vindu), T2 (LTFV) og T4 (AHU Foreles.) i modell 6.

Tabell 5.9 presenterer reduksjon i spesifikt energiforbruk i M3 i tillegg til en økonomisk analyse av modellen. Som i M2 ble det antatt at investeringskostnadene for kontrolltiltak som enhetssjekk, AUH Forelesning of radiatorkontroll er lik 0. Derfor er investeringskostnaden og levetiden lik for ved T1 (vindu). Lønnsomhetsanalysen viste at kombinasjonen av tiltakene var lønnsomme for modellen, men mindre lønnsomt enn i M2, grunnet en lavere energibesparelse.

Tabell 5.9: Reduksjon av spesifikt energiforbruk i modell 3 sammenlignet med basemodellen, og økonomisk analyse av modellen. Denne modellen var en kombinasjon av fem tiltak - hovedsaklig endring i kontroll av radiatorer og temperaturer ventilasjon.

| Energi- endring: | Spesifikk energi [kWh/m ²] | Spesifikk FV [kWh/m ²] | Spesifikk EL [kWh/m ²] |
|---------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| M3 | - 16,0 | - 14,6 | - 1,5 |

| Økonomi- analyse: | Investerings- kostnad [kr] | Energibesparelse per år, [kWh] | Levetid (snitt eller tot) [år] | Nåverdi |
|----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------|
| M3 | 1 200 000 | 114 746 | 40 | 636 000 |

Erfaring fra modell 3:

T3 (Enhetssjekk) og T4 (AHU Foreles.) er gode tiltak i kombinasjon med T1 og T2, da implementering reduserer elektrisitetsbehovet og det ikke er noen investeringskostnader. Da disse tiltakene kun senket effekt- og energiforbruk var de trolig lønnsomme også alene, men energireduksjonen var insignifikant sammenlignet med modellens totale energibehov.

T5 (Radiatorkontroll) var et godt tiltak for effektreduksjon andre og tredje etasje, men ikke i første og fjerde etasje. Tiltaket førte til en økning i fjernvarmebehov sammenlignet ved sammenligning med M2, og dette måtte undersøkes videre i en senere modell.

5.5 Modell 4

Modell 4 er en videreutvikling av Modell 3. Hensikten med modellen var å undersøke hvordan økt virkningsgrad for varmevekslerene i ventilasjonsanleggene kunne redusere fjernvarmeforbruket, i kombinasjon med tidligere tiltak. For hver varmeveksler i de fem ventilasjonssystemene ble virkningsgraden økt fra 0,55 til 0,80.

Sammenlignet med M3 viste resultatene fra M4 en liten økning i toppaster varme på 1 % i enkelte rom. Parametere som uakseptable temperaturtimer og elektrisitetsbehov var uendret fra M3 til M4, men fjernvarmeforbruket i modell 3 ble redusert med 65,5% sammenlignet med basemodellen. Dette tilsvarer en reduksjon på 530 000 kWh per år. T6 (varmeveksler) reduserte også pumpeenergien i vannanlegget med 72 % tilsvarende 322 kWh, og høyeste målte pumpeeffekt ble redusert med 40%, tilsvarende 107 W. Tabell 5.10 presenterer reduksjon i spesifikt energiforbruk sammenlignet med basemodellen og M3, i tillegg til en økonomisk analyse av M4.

Tabell 5.10: Reduksjon av spesifikt energiforbruk i modell 4 sammenlignet med basemodellen, og økonomisk analyse av modellen. I denne modellen var nye varmevekslere det eneste tilførte tiltaket, så endringen i spesifikt energiforbruk sammenlignet med M3 er et resultat på økt virkningsgrad i varmevekslere.

| Energi- endring: | Spesifikk energi [kWh/m²] | Spesifikk FV [kWh/m²] | Spesifikk EL [kWh/m²] |
|-----------------------------|---|---|---|
| M4 vs. BM | - 75,2 | - 73,3 | - 1,9 |
| M4 vs. M3 | - 59,1 | - 58,8 | - 0,4 |

| Økonomi- analyse: | Investerings- kostnad [kr] | Energibesparelse per år, [kWh] | Levetid (snitt eller tot) [år] | Nåverdi |
|------------------------------|---|---|---|----------------|
| M4 | 1 315 000 | 538 153 | 25 | 6 211 000 |

Resultatene fra modellen viser at T6 (varmeveksler) har en betydelig innvirkning på modellens fjernvarmebehov. For å undersøke dette tiltakets innvirkning alene var dette det eneste implementerte tiltaket i modell 5, men allerede i denne modellen ble det klart at nye varmevekslere ville gi en betydelig energieffektivisering av modellen. Lønnsomhetsanalysen viste at kombinasjonen av tiltakene var lønnsomt. Endringen i nåverdi fra M3 og M2 til M4 viste også at varmevekslerene utgjør en stor økonomisk gevinst.

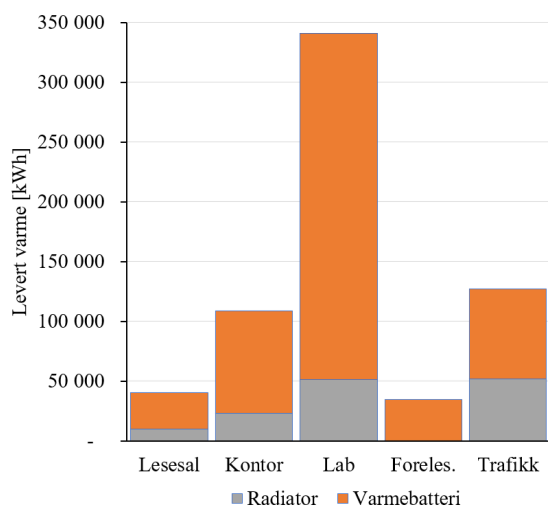
Erfaring fra modell 4:

T6 (Varmevekslere) var et bra tiltak for energisparing og lønnsomhet i kombinasjon med T1 - T4, og var det tiltaket som hittil ga størst reduksjon i fjernvarmebehov. Tiltaket fremsto også som et svært lønnsomt tiltak alene.

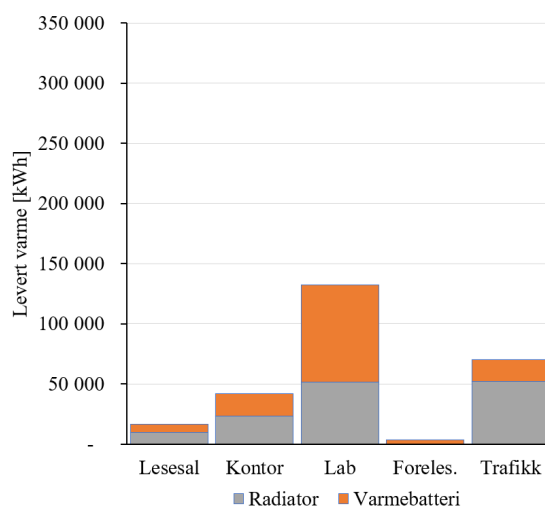
5.6 Modell 5

Hensikten med M5 var å undersøke hvor stort fjernvarmeforbruket ble redusert ved å kun implementere T6 (Varmeveksler) til basemodellen. I denne modellen var det også interessant å undersøke også fordeling av levert varme fra radiatorer og varmebatteri i ventilasjonen til sonene.

Figur 5.6.1 og figur 5.6.2 viser varmedelingen for henholdsvis basemodellen og modell 5. Resultatet av T6 (varmeveksler) var en tydelig reduksjon i mengde levert varme fra radiatorerne og ventilasjonsanleggene. En jevnere fordeling av varmeleveranse vil være fordelaktig for å fordele bruken av enhetene likt, og dermed sikre at enhetenes degraderingsrate blir lik.



Figur 5.6.1: Fordeling av varme fra radiatorer og varmebatteri i ventilasjon i BM.



Figur 5.6.2: Fordeling av varme fra radiatorer og varmebatteri i ventilasjon i M5.

Tabell 5.11 presenterer reduksjon i spesifikt energiforbruk sammenlignet med basemodellen, i tillegg til en økonomiskanalyse av M5. Som i M4 var investeringskostnadene for varmevek-

slerene antatt å være 115 000 kr. Resultatet av simuleringen viste en reduksjon i spesifikt energiforbruk på 55%, tilsvarende 62.6 kWh/m² sammenlignet med basemodellen. Tilnærmet hele energibesparelsen gikk under levert fjernvarme til modellen. Det var ingen endring i effekttoppene fra varme til de 20 sonene, og mengden varmeenergi levert til sonene var også uendret. Lønnsomhetsanalysen viste at tiltaket alene hadde høy nåverdi.

Tabell 5.11: Reduksjon av spesifikt energiforbruk i modell 5 sammenlignet med basemodellen og økonomisk analyse av M5. I denne modellen var kun ett tiltak implementert, så energisparingen og den økonomiske analysen gjelder også for tiltak T6 (varmevekslere).

| Energi- endring: | Spesifikk energi [kWh/m ²] | Spesifikk FV [kWh/m ²] | Spesifikk EL [kWh/m ²] |
|---------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| M5 / T6 | - 62,6 | - 62,2 | - 0,4 |

| Økonomi- analyse: | Investerings- kostnad [kr] | Energibesparelse per år, [kWh] | Levetid (snitt eller tot) [år] | Nåverdi |
|----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| M5 / T6 | 115 000 | 448 210 | 10 | 3 663 000 |

Erfaring fra modell 5:

T6 (varmevekslere) var et bra tiltak som reduserte modellens fjernvarmebehov med 55%, og var et lønnsomt tiltak for modellen.

5.7 Modell 6

Som nevnt i modell 3 var det interessant å undersøke hvordan endring av radiatorkontroller (T5) påvirker effekt- og energibehovet. Målet for denne modellen var å teste ut en PI-kontroller med ulike inngangsverdier for å se hvordan dette påvirket varmeleveransen til modellen, og om topplastene for varme kunne reduseres.

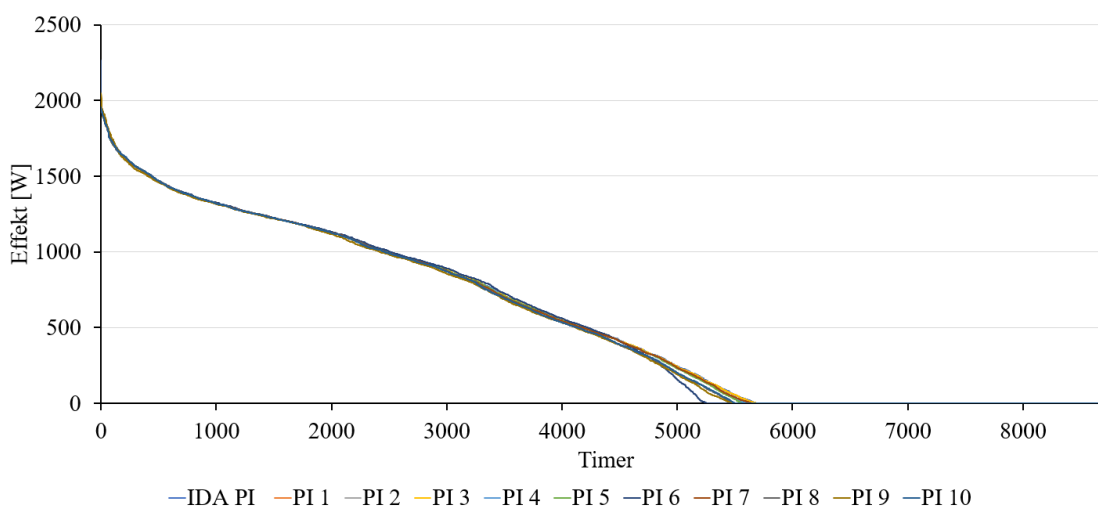
Tiltak T5 (Radiatorkontroll) var her i kombinasjon med T3 (Enhetssjekk), siden erfaringer fra M2 tilsa at overflødige varme- og kjøleenheter kunne bli fjernet. Radiatorkontrollerene ble satt fra P til PI i alle soner. Dette var standard-kontrollere i IDA ICE.

Ved å skifte fra P- til en PI-kontroller, var det opprinnelig forventet en reduksjon i effekttopper fra radiatorene i sonene. I første og fjerde etasje viste resultatene en økning i effekttopper mellom 4 % og 11 % i tre av fem soner (i forelesningsrommene var effekttoppene eliminert grunnet T3). Dette kan komme av at disse etasjene har et større varmetap på grunn av at inngangsdøren til bygget som i korte perioder står åpen, i tillegg til varmetap mot grunnen i første etasje, og varmetap gjennom taket i fjerde etasje. For sonene i andre og tredje etasje ble effekttopper fra radiatorene redusert med i gjennomsnitt 22 %. Denne reduksjonen kom hovedsaklig fra elimineringen av radiatorene i forelesningsrommene, men sett bort fra forelesningsrommene i disse etasjene ble den gjennomsnittlige reduksjonen fortsatt 12%. Varmebehovet til sonene ble redusert med ca. 13 000 kWh for sonene i andre og tredje etasje, og det totale spesifikke energibehovet i M6 ble redusert med 9.6 kWh/m² sammenlignet med basemodellen.

PI-regulatoren ikke var god nok til å redusere topplastene for varme i alle etasjene. Ved å sammenligne parameterne i kontrollerene kom det frem at pådragsleddene (K_p) var tilnærmet identiske. Det ble derfor gjennomført flere tester for en enkelt sone med en selvlagd PI-kontroller i IDA ICE.

Varighetskurver av levert varme fra radiatorene er vist i figur 5.7.1 for de ti testen. Her står PI # for “PI-simulering *nummer*”. Ved testing av kontrollerene ga ikke små endringer i inngangsverdiene noen endring i varmeforbruk. Kontrolleren ble derfor testet med noen ekstremverdier som 0,1 og 1000 i de tre parameterene. Dette ble gjort for å få en reaksjon på varmeforbruket.

Resultatet viste at endringene ikke hadde noen særlig effekt på varmeforbruket. Det resulterende varmebehovet i sonen var tilnærmet uendret for alle testene, men én test skilte seg ut noe; PI 6 hadde følgende parametere: $K_p = 0,1$, $T_i = 0,1$, og $T_T = 1000$. Disse parameterne ga høyere maks. effekt, men kurven ble også avbøyd tidligere enn de andre testene. Selv om den skilte seg ut, ga ikke kontrolleren en positiv effekt på varmeeffekten. I virkeligheten ville slike endringer i parametere gitt stort utslag, og slike størrelser er ikke realistiske ved kalibrering av PID-kontrollere.



Figur 5.7.1: Varighetskurve for levert varme fra radiatorer til en sone ved testing av ulike størrelser av parameterene i PI-kontrolleren.

Målet med denne modellen var å finne en god kontroller for radiatorene men grunnet bedre kunnskap om kontrollere i IDA ICE og dimensjonering av kontrollere, ble ikke dette videreutviklet. Bedre utforming av en PI-kontroller *kan* gi lavere effekttopper som vist i M3, men i denne testen ga ikke kontrolleren noe utslag i effekttoppene. Dette viser at testene av PI-kontrolleren i en enkelt sone ikke var representativ for modellen, men at kalibrering av de eksisterende kontrollerene på NTNU Gløshaugen kan gi reduksjon i effekttopper for varme.

Tabell 5.12 presenterer reduksjon i spesifikt energiforbruk sammenlignet med basemodellen i tillegg til en økonomiskanalyse av M6. Her var investeringskostnadene igjen satt til 0 kr.

Tabell 5.12: Reduksjon av spesifikt energiforbruk i modell 6 sammenlignet med basemodellen, og økonomisk analyse av modellen.

| Energi- endring: | Spesifikk energi [kWh/m ²] | Spesifikk FV [kWh/m ²] | Spesifikk EL [kWh/m ²] |
|-----------------------------|--|--|--|
| M6 | - 9,6 | - 8,1 | - 1,5 |

| Økonomi- analyse: | Investerings- kostnad [kr] | Energibesparelse per år, [kWh] | Levetid (snitt eller tot) [år] | Nåverdi |
|------------------------------|--|--|--|----------------|
| M6 | 0 | 68 505 | 15* | 749 000 |

* levetid basert på lignende tiltak i kilde [7]

Lønnsomhetsanalysen viste at kombinasjonen av T3 (Enhetsjekk) og T5 (Radiatorkontroll) var en lønnsom. Siden effekttoppene ble redusert i noen etasjer men økt i andre etasjer hadde T5 (radiatorkontroll) i sin helhet liten innvirkning på effekttoppene. Likevel hadde T5 hadde potensiale for å implementeres i andre og tredje etasje hvor tiltaket førte til et redusert energiforbruk.

Erfaring fra modell 6:

T3 (Enhetsjekk) var et bra tiltak for å redusere varmeeffekt- og kjølebehov, da enheten er overflødig i modellen. Reduksjon av energi for oppvarming og kjøling uten investeringskostnader gjør tiltaket lønnsomt.

T5 (Radiatorkontroll) er et dårlig tiltak med tanke på toppaster fra radiatorene og redusert varmebehov i første og fjerde etasje, men et godt tiltak i andre og tredje etasje. Etter analyser av kontrolleren knyttet det usikkerhet til hvor god kontrolleren kunne vært i virkeligheten. Tiltaket ble derfor ikke bli brukt i videre simuleringer.

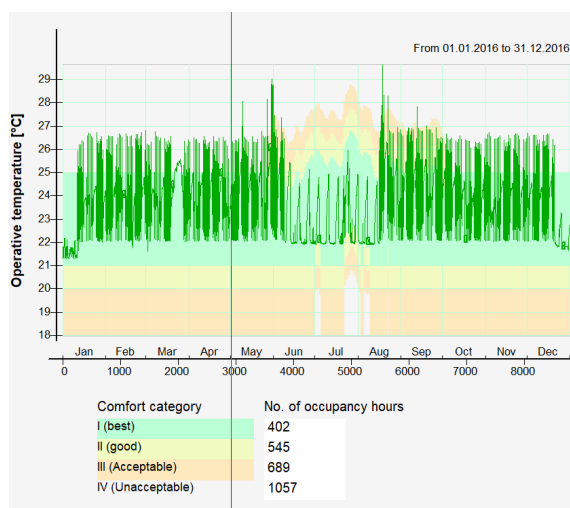
5.8 Modell 7

Bakgrunnen for denne modellen var å analysere de tre tiltakene rettet mot temperaturstyring av ventilasjonsanleggene og vannanlegget i kombinasjon med implementering av lavtemperatur fjernvarme. De implementerte tiltakene i denne modellen var T2 (LTFV), T4 (AHU Foreles.), T7 (AHU) og T8 (Vannanlegg). Denne modellen besto av flere delmål, hvor hvert delmål presenteres med de respektive handlingene og analyse av resultatene.

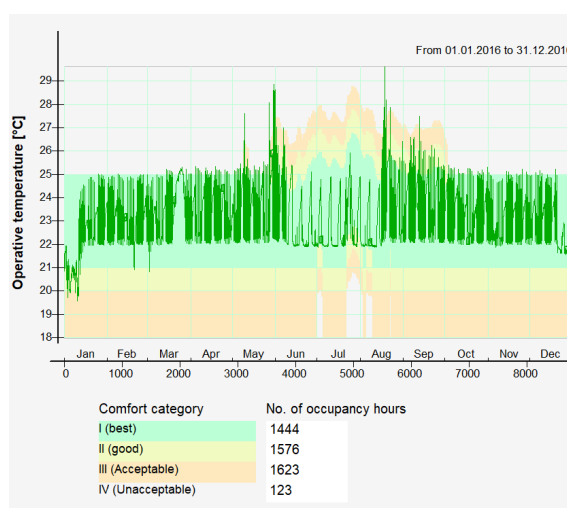
Det første delmålet var å finne en lavere temperatur i AHU Forelesning for å redusere antall uakseptable temperaturtimer (T4 AHU Foreles.), og øke temperaturene for de andre anleggene (T7 AHU) for økt termisk komfort. Det var også interessant å undersøke hvordan temperaturer i modellens settpunkttemperaturer for radiatorer og ventilasjon påvirker hverandre, og “etter-kalibrere” temperaturer i ventilasjonsanleggene slik at de to enhetene ikke motarbeidet hverandre i temperaturspennet mellom settpunkttemperaturer.

I basemodellen var det i sum 3450 timer per år med uakseptabelt temperaturer for alle sonene, hvor de fem forelesningsrommene sto for 96 % av antall UT. De høye temperaturene skyldtes varmeoverføring fra studenter i rommet gjennom dagen, tilførsel av varme fra radiatoren, og ingen luftemuligheter da det er innesperret rom. Som i M4 ble tiltak T4 (AHU Foreles.) implementert i modell 7; settpunkttemperaturen i ventilasjonsanlegget for forelesningsrommene ble satt til 16 °C for å kjøle ned rommet til et komfortabelt nivå. For at ventilasjonen og radiatorene ikke skulle motarbeide hverandre i temperaturområdet mellom 18-20,5 °C og for å se om den termiske komforten kunne bli noe forbedret, ble tiltak T7 (AHU) implementert; settpunkttemperaturene ble økt til 21 °C i alle ventilasjonsanlegg, foruten AHU Forelesning.

Som i tidligere modeller ble termisk komfort evaluert etter summen antall okkupertimer i uakseptable temperaturer for hver alle sonene, men det ble stilt spørsmål ved bakgrunnen for IDA ICEs metode for å kalkulere timesfordelingen i de fire komfortkategoriene da det viste deg at summen av okkupertimer ble endret fra basemodellen til modell 7. Operativ temperatur for Forelesning 1 gjennom en årssimulering er vist i figur 5.8.1 for basemodellen og figur 5.8.2 for modell 7. Her var summen av okkupertimer 2693 timer i BM og 4766 i M7.



Figur 5.8.1: Analyse av termisk komfort for sone Forelesning 1 i basemodellen. Figuren viser hvordan operativ temperatur fordeler seg over ulike komfortkategorier gjennom en årssimulering. Her er summen av okkupertimer lik 2693 timer



Figur 5.8.2: Analyse av termisk komfort for sone Forelesning 1 i modell 7. Figuren viser hvordan operativ temperatur fordeler seg over ulike komfortkategorier gjennom en årssimulering. Her er summen av okkupertimer lik 4766 timer

Kalkuleringsgrunnlaget for okkupertimer i IDA ICE ble undersøkt, men det ble ikke funnet en entydig forklaring på hvordan timene beregnes. I en brukermanual for IDA ICE oppgis det at temperaturkategoriene er basert på tabell “B.2.4 - Standard innetemperaturer for energiberegninger” fra NS-EN16789-1:2019 (vedlegg A), men dette gir ikke svar på hvorfor antall okkupertimer endres. Det ble derfor gjort en beregning av antall okkupertimer i hver komfortkategori basert tabellen i NS-EN16798. Tabell 5.13 viser hvilke temperaturområder som ble satt for de fire komfortkategoriene, og fordelingen av timer for Forelesning 1 og Lesesal 1. Her sammenlignes verdiene for modell 7 med basemodellen. I motsetning til forelesningsrommene hadde lesesalene få UT før tiltak T7 (AHU) ble implementert, det var ønskelig å øke andelen timer i komfortkategorien “veldig god”.

Tabell 5.13: Oversikt over temperaturområdene for de fire komfortkategoriene, og hvordan okkupertimene i Forelesning 1 og Lesesal 1 fordeles over de fire kategoriene i basemodellen og modell 7

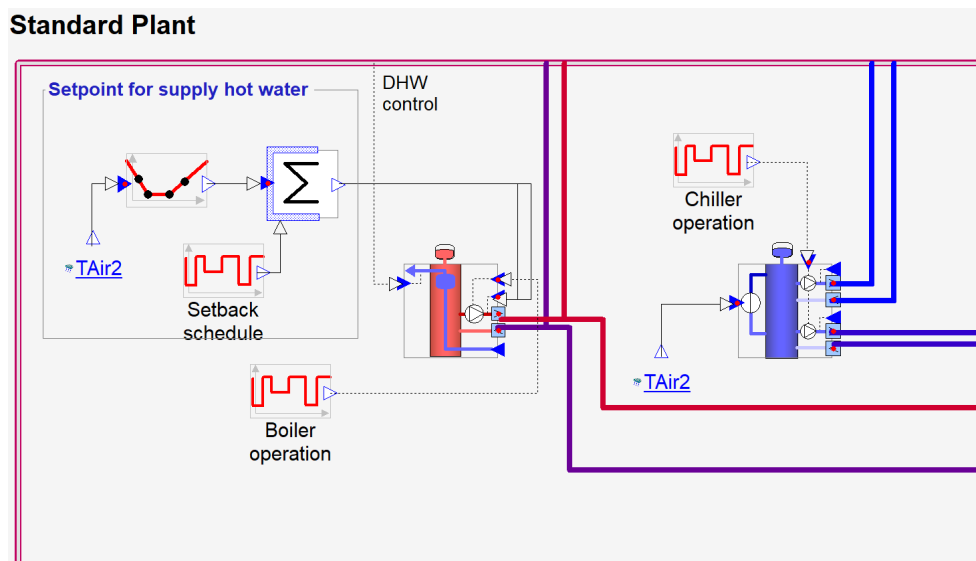
| Kategori | Temperaturområde [°C] | Forelesning 1 | | Lesesal 1 | |
|--------------------------------|-------------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| | | BM | M7 | BM | M7 |
| I - Veldig god | [21 - 23] | 0,2 % | 0,7 % | 47 % | 42 % |
| II - God | [20 - 21] og [23 - 24] | 8,4 % | 21 % | 52 % | 57 % |
| III - Akseptabel | [19 - 20] og [24 - 25] | 10 % | 14 % | 0,6 % | 0,6 % |
| IV - Uakseptabel | [...- 19] og [25 - ...] | 81 % | 64 % | 0,6 % | 0,6 % |
| Sum okkupertimer i sone | | 2522 | 2522 | 5424 | 5424 |

Resultatene fra komfortanalysen viste at temperaturene fortsatt var høye i forelesningsrommene, men temperaturene var som regel mellom 21°C og 25 °C som vist i figur 5.8.2. Antall UT i IDA ICE kan være representativt som et mål på termisk komfort, siden kalkulasjoner av temperaturfordelingen i de ulike komfortkategoriene viste en større prosentandel timer i kategori 4.

Temperaturer opp mot 25 °C vil være høye selv om studentene sitter i ro i et rom, men å redusere temperaturen i i AHU Foreles til under 16 grader kan gi ubehagelig høye temperaturforskjeller mellom rommet og ventilasjonsluften for personer som får kald luft på seg [7]. T4 (AHU Foreles.) ble derfor vurdert som et bra tiltak for å bedre komforten i forelesningsrommene.

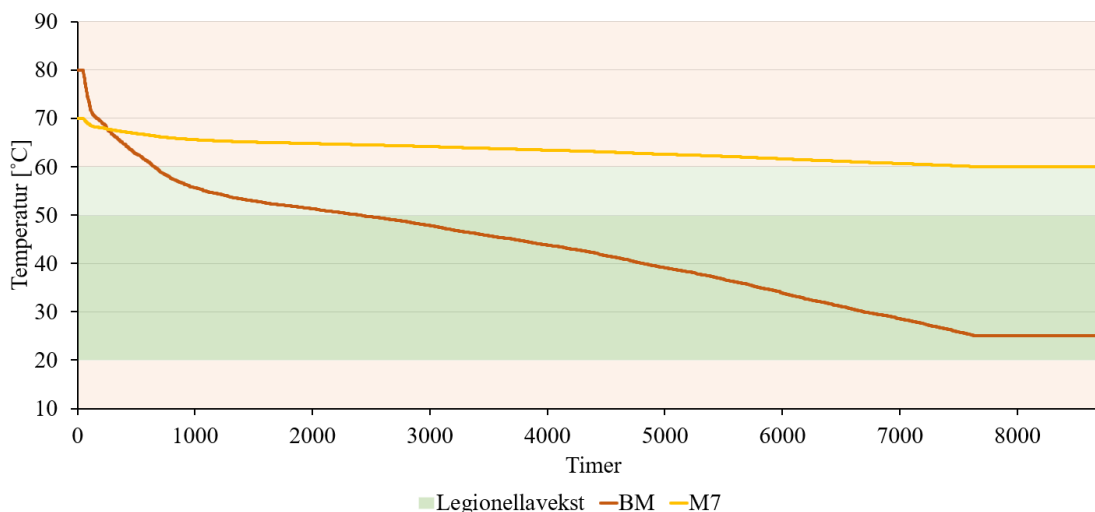
Samtidig viste resultatene at en 3 graders økning av temperaturer i de resterende ventilasjonsanleggene ikke hadde noen virkning på termisk komfort, men at energibehovet for oppvarming av luften i ventilasjonsanleggene økte med gjennomsnittlig 46 % for alle anleggene, tilsvarende totalt 217 000 kWh per år. En slik økning i energiforbruk vil øke energikostnaden under drift betraktelig. Da innekomforten forblir uendret og energiforbruket økte ble T7 (AHU) ansett som et dårlig tiltak for modellen.

Det andre delmålet gikk ut på å analysere temperaturene i modellens vannanlegg, for å undersøke om de kunne reduseres eller forbedres. Ved å se på temperaturene i- og oppsettet av modellens vannanlegg, kom det frem at tappevannet er innlemmet i varmtvannsdistribusjonen til radiatorene. Et utklipp av vannanlegget i IDA ICE er vist i figur 5.8.3. Her er tappevannskontroll (DHW control) koblet til samme elektriske kjel som radiatorene (lilla linjer). I basemodellen er temperaturene i vannanlegget satt til 80/25°C. For å unngå dannelse og vekst av legionellabakterier må temperaturer i varmtvannstanker være over 60 °C, og ha god massestrøm. Det var derfor interessant å analysere hvor mange timer legionellavekst kan oppstå, og endre settpunkttemperaturene i anlegget etter dette.



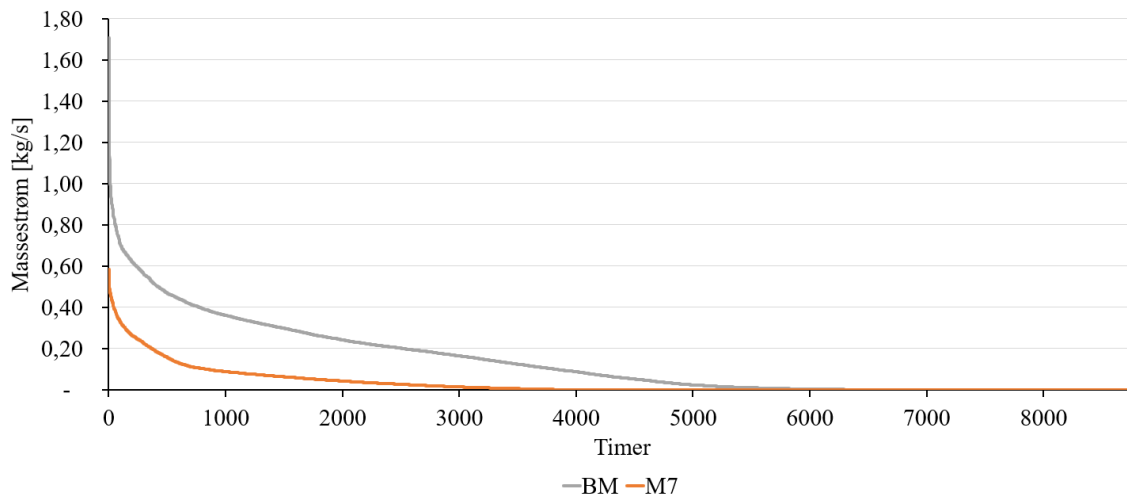
Figur 5.8.3: Utklipp av vannanlegget (plant) til basemodellen i IDA ICE. Den elektriske kjelen i midten av figuren leverer varmt vann til radiatorene men også til tappevann, da annet ikke er definert i modellen.

Figur 5.8.4 viser varmtvannstemperaturene i vannanlegget til basemodellen og modell 7. Fargekodene viser hvor legionellabakterier har gode vekstforhold, etableringsforhold og områder hvor bakterien ikke overlever, med henholdsvis grønn, lys grønn og rød farge. I Basemodell-modellen var det i overkant av 8100 timer hvor temperaturen i vannanlegget er slik at bakterien kan vokse. Ved å implementere tiltak T8 (Vannanlegg) ble settpunkttemperaturen for varmtvann endret fra 85/25°C til 70/60°C, og temperaturområdene for legionellavekst ble unngått.



Figur 5.8.4: Varighetskurve for temperatur fra kjel til radiator og tappevann i vannanlegget til basemodellen og modell 7. Grønt område viser temperaturer som gir gode vekstforhold for legionellabakterier, mens rødt område er temperaturer hvor bakteriene ikke kan leve.

Dannelse av legionellabakterier er hovedsaklig et problem ved *lagring* av vann, eller når det er lav massestrøm i vannanlegget. For å evaluere dette ble også massestrømmen i basemodellen analysert, og presenteres i figur 5.8.5.



Figur 5.8.5: Simulert massestrøm i vannanlegget for basemodell og modell 7. I timer med tilnærmet null strømning i vannanlegget vil temperaturer mellom 20 - 50 °C i anlegget kunne gi vekst av legionellabakterier

Figuren viser at basemodellen har færre timer uten strømning (0 kg/s) i vannanlegget enn modell 7, med hhv. 2950 og 5260 timer. I disse timene øker risikoen for legionellavekst. Etter samtale med veileder kom det fram at i perioder med lave temperaturer i fjernvarmenettet som om sommeren, vil en elektrisk kjel varme opp tappevannet for å møte temperaturkravet mot legionellavekst. Dersom LTFV skal implementeres må alt tappevannet varmes opp fra elektriske kjeler for å unngå en negativ korrelasjon mellom temperaturer for tappevann og LTFV i vannanlegget, og stillestående vann i anlegget. Tiltaket er ikke nødvendigvis realistisk i et virkelig vannanlegg siden temperaturene var svært høye, og dette kan øke korrosjonen i anlegget. Å vurdere modellens vannanlegg med tanke på legionella var viktig med hensyn til atmosfærisk miljø, men T8 anses helhetlig som et dårlig og urealistisk tiltak.

Det tredje delmålet var implementering og analyse av lavtemperatur fjernvarme i modellen for å redusere fjernvarmeforbruk og effekttopper fra varme til sonene. To simuleringer av Modell 6 ble gjort: én med alle de nevnte tiltakene i modell 7, og én hvor T2 (LTFV) ikke ble implementert. Dette ble gjort for å sammenligne hvordan LTFV alene påvirker energibehovet i denne modellen. Økningen av temperatur i AHU kunne gi et lavere FV behov da mer av varmen ble tilført sonene gjennom ventilasjon, og det var interessant å undersøke om også lave temperaturer i radiatorene reduserte fjernvarmebehovet. Fra å forsyne radiatorene med vann på 80/60°C fra fjernvarme, ble temperaturene satt ned til 55/45grader.

Resultatet av energiforbruket i de to simuleringene er vist i tabell 5.14. Tabellen viser at fjernvarmeforbruket er høyere i M7 enn BM, og at M7 fjernvarmeforbruk er likt uavhengig av LTFV. Ved å sammenligne topplasten for varme fra radiatorer i hver sone, kom det fram at modellen med LTFV hadde 4% lavere effekttopper fra varme i ti soner sammenlignet med modellen uten LTFV. I forelesningsrommene var effekttoppene uendret (0W), og i de resterende syv sonene ble effekttoppene redusert med 1%. Fra tabellen kommer det fram at fjernvarmebehovet er 1100 kWh høyere uten LTFV enn med. T2 (LTFV) kan derfor ikke være grunnen til at M7 har et fjernvarmebehov som er 6 % høyere enn basemodellen.

Tabell 5.14: Fjernvarme-, elektrisitets- og totalt energiforbruk for modell 6 med og uten LTFV, sammenlignet med basemodellen.

| | Fjernvarmebehov [kWh] | Elektrisitetsbehov [kWh] | Totalt energibehov [kWh] |
|-----------------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Basemodell | 800 800 | 970 200 | 1 771 000 |
| Modell 7 m/LTFV | 925 500 | 957 500 | 1 883 000 |
| Modell 7 u/LTFV | 926 600 | 957 400 | 1 884 000 |

Økningen i fjernvarmeforbruk skyldtes de økte temperaturene i vannanlegget fra T8 (vannanlegg). Når temperaturene i vannanlegget ligger mellom 70/60°C vil også vann med disse temperaturene sirkulere gjennom radiatorene. Kombinasjonen av T2 (LTFV) og T8 (Vannanlegg) er derfor ikke kompatibel. For at LTFV skal kunne implementeres i modellen må temperaturene i vannanlegget resueres, og tappevann varmes opp separat ved elektriske kjeler. Dersom denne modellen skulle blitt simulert på nytt ville ikke disse to tiltakene blitt simulert samtidig.

Tabell 5.15 presenterer reduksjonen i spesifikt energiforbruk sammenlignet med basemodellen i tillegg til en økonomiskanalyse av M7. Her var investeringskostnadene igjen satt til 0 kr, da de implementerte tiltakene var gikk ut på temperaturkontroll. Resultatene av modellen i sin helhet viste en økning i spesifikt fjernvarmeforbruk og energiforbruk. Lønnsomhetsanalysen viste at kombinasjonen av tiltakene ikke var lønnsomme. Dette skyldes i all hovedsak de økte temperaturene i vannanlegget.

Tabell 5.15: Reduksjon av spesifikt energiforbruk i modell 7 sammenlignet med basemodellen, og økonomisk analyse av modellen.

| Energi- endring: | Spesifikk energi [kWh/m ²] | Spesifikk FV [kWh/m ²] | Spesifikk EL [kWh/m ²] |
|-----------------------------|--|--|--|
| M7 | + 15,7 | + 17,4 | - 1,7 |

| Økonomi- analyse: | Investerings- kostnad [kr] | Energibesparelse per år, [kWh] | Levetid (snitt eller tot) [år] | Nåverdi |
|------------------------------|--|--|---|----------------|
| M7 | 0 | - 112 594 | 30 | - 1 677 000 |

Erfaring fra modell 7:

T2 (LTFV) var et bra tiltak for modellen dersom tappevann kun varmes opp av en elektrisk kjel, og settpunkttemperaturene i vannanlegget er tilpasset LTFV. T2 må implementeres alene i en senere modell for å undersøke om radiatorene er dimensjonert for LTFV uten T1 som i modell 1, og T8 i modell 7, og om tiltaket har noen innvirkning på termisk komfort.

T4 (AHU Foreles) var et bra tiltak som bedret inneklimate og senket energibehov for oppvarming av luft i AHU Forelesning, hvilket vil redusere energikostnaden noe.

T7 (AHU) var et dårlig tiltak, som ikke bedret inneklimate, men økte energibehovet for oppvarming i luft i ventilasjonsanleggene med over 43%. Tiltaket vil ikke være lønnsomt.

T8 (Vannanlegg) var helhetlig et dårlig tiltak som økte fjernvarmebehovet for å holde temperaturene i vannanlegget over 60 °C, men det var interessant å vurdere temperaturene i vannanlegget med hensyn på legionellavekst. Tiltaket kan ikke kombineres med T2 (LTFV) grunnet de høye temperaturene i vannanlegget, og slike temperaturer er urealistisk i et virkelig system.

5.9 Modell 8

Et fellestrekk for modell 1 - 7 var at effekttoppene fra varme til sonene er høyest i Trafikk 1, og alle sonene i fjerde etasje. Hensikten med M8 var å undersøke hvor mye topplastene kunne reduseres ved å oppgradere takets U-verdi. I basemodellen hadde taket en U-verdi på $0.48 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ som i M7 ble oppgradert $0.18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, tilsvarende energikravet for tak i TEK 17.

I master 2018 var et av tiltakene å etterisolere taket med 50 mm mineralull. I rapporten står det ikke noe om den nye U-verdien til taket. Resultatet var en reduksjon i spesifikt energiforbruk med $4.6 \text{ kWh}/\text{m}^2$ og en prosentvis reduksjon av topplaster på 11,1 %.

Resultatet av simuleringen viste at topplastene for levert varme i fjerde etasje ble redusert, og for de fem sonene ble topplastene redusert med gjennomsnittlig 23%. Varmebehovet fra radiatorene i fjerde etasje ble redusert med 50%, sammenlignet med basemodellen. Det må også trekkes frem at M8s høyeste topplast for varme ble redusert med 19,3 %, mot Master 2018s 11,1%. Antall uakseptable temperaturtimer i M8 økte med 1100 timer; dette skyldtes enda høyere operativ temperatur i forelesning 4 grunnet lavere varmetap gjennom taket.

Tabell 5.16 viser en reduksjon i spesifikt energi- og varmebehov for modell 8 sammenlignet med basemodellen. Siden T8 (Tak) var det eneste implementerte tiltaket gjelder også energi- og lønnsomhetsanalysen for dette tiltaket alene. Lønnsomheten for tak-tiltaket fra Master 2018 er også vurdert som "Tak 2" for å se om tiltaket var lønnsomt. Fra Master 2018 var reduksjonen i spesifikk energiforbruk på $4,6 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ved etterisolering av taket [6].

Tabell 5.16: Reduksjon av spesifikt energiforbruk i modell 8 sammenlignet med basemodellen, og en økonomisk analyse av modellen.

| Energi- endring: | Spesifikk energi [kWh/m ²] | Spesifikk FV [kWh/m ²] | Spesifikk EL [kWh/m ²] |
|-----------------------------|--|--|--|
| M8 / T9 | - 6,2 | - 6,2 | 0,0 |

| Økonomi- analyse: | Investerings- kostnad [kr] | Energibesparelse per år, [kWh] | Levetid (snitt eller tot) [år] | Nåverdi |
|------------------------------|--|---|---|----------------|
| M8 / T9 | 2 148 000 | 44 459 | 60 | - 1 399 000 |
| "Tak 2" | 2 148 000 | 32 932 | 60 | - 1 593 000 |

Lønnsomhetsanalysen viste at utskiftning av tak ikke var lønnsomt i M8 eller Mater 2018. For at tiltaket skulle være lønnsomt måtte investeringskostnadene reduseres til 749 000 kr og 554 800 kr for henholdsvis M8 og Master 2018 med de respektive energibesparelsene. Dette ble ansett som svært usannsynlig.

Erfaring fra modell 8:

T9 (Tak) var et bra tiltak for å redusere modellens topplast for varme og varmeenergi i fjerde etasje, men tiltaket var ikke lønnsomt alene.

5.10 Modell 9

Bakgrunnen for denne modellen var å kombinere erfaringer fra modell 2 og modell 7; LTFV skulle implementeres med modellens opprinnelige radiatordimensjoner, men uten T1 (Vindu) og de opprinnelige temperaturene i T8 (vannanlegg). I denne modellen skulle temperaturene i vannanlegget være tilpasset LTFV, og tappevann skulle anses å ha en separat oppvarming og lagring i en varmtvannstank. Derfor ble temperaturen i vannanlegget endret fra den opprinnelige 80/25 °C i basemodellen til 55/25 °C i M10, tilpasset temperaturene i radiatorene på 55/45°. T3 (Enhetssjekk) og T4 (AHU Foreles.) var også implementerte tiltak, da disse tidligere hadde vist å gi bedret komfort og lavere energiforbruk.

Simuleringen av modellen viste reduksjoner i både fjernvarme- og elektrisitetsforbruk, god termisk komfort, og lavere topplaster for elektrisitet. At topplast for pumpeanlegget og varme fra radiatorer var uendret sammenlignet med basemodellen viste at radiatorene er dimensjonert for å kunne å levere nok varme til sonene uten å øke massestrømmen i vannanlegget. Endringen i elektrisitetsforbruk skyldtes redusert energibehov for oppvarming av luft i AHU Forelesning.

I modell 1 kom det frem at radiatorene var svært overdimensjonert da de var dimensjonert med en ideell varmeenhet. Når det ble klart at radiatorene klarte å levere nok varme til sonene med de opprinnelige dimensjonene, ble det interessant å se hvor lave kapasitetene kunne være for å fortsatt kunne gi nok varme til sonene. Topplastene for levert varme til hver sonekategori ble funnet og radiatorene ble dimensjonert etter disse med 10 % overdimensjonering på grunn av varmetap i veggene bak radiatorene. De gamle og nye dimensjoneringene er vist i tabell 5.17.

Tabell 5.17: Ny dimensjonerende radiatorstørrelse ved implementert LTFV. Her er radiatorene overdimensjonert med 10 % for å kunne levere nok varme da noe av varmen går inn i veggen bak radiatoren

| Sone-kategori | Dimensjonerende radiatorkapasitet, basemodellen [W] | Maks effekt fra radiatorer i modell 9 [W] | Ny dimensjonerende radiatorkapasitet, 10 % overdim. [W] |
|---------------|---|---|---|
| Kontor | 33 500 | 6 483 | 7 100 |
| Lab | 31 500 | 18 168 | 20 000 |
| Lesesal | 9 000 | 19 537 | 21 500 |
| Forelesning | 2 000 | Fjernet | Fjernet |
| Trafikk | 38 000 | 26 268 | 28 900 |

En simulering med disse radiatorkapasiteten ble gjennomført og resultatet viste ingen endring i varme levert til sonene eller termisk komfort. Det er vanlig å bruke ideelle varmeenheter for å dimensjonere radiatorer og varmeleveranse til soner i IDA ICE - dette brukes både av studenter og folk i arbeidslivet. Det gir et godt utgangspunkt for å dimensjonere radiatorer, men ved å etterkalibrere radiatorene fra varmeeffekttoppene kan radiatorkapasitetene bli mer korrekte og realistiske. Dette bør gjøres ved for eksempel utforming av nybygg for å ikke overdimensjonere varmeenheter for mye.

I tabell 5.19 presenteres endring i spesifikt energiforbruk sammenlignet med basemodellen. I tillegg er lønnsomheten regnes ut ved nåverdimetoden, og beregningsgrunnlaget er presentert i tabellen. Investeringskostnadene er også her satt til 0 kr.

Tabell 5.18: Reduksjon av spesifikt energiforbruk i modell 9 sammenlignet med basemodellen, og økonomisk analyse av modellen.

| Energi-endring: | Spesifikk energi [kWh/m ²] | Spesifikk FV [kWh/m ²] | Spesifikk EL [kWh/m ²] |
|-----------------|--|------------------------------------|------------------------------------|
| M9 | - 4,8 | - 3,3 | - 1,5 |

| Økonomi-analyse: | Investerings-kostnad [kr] | Energibesparelse per år, [kWh] | Levetid (snitt eller tot) [år] | Nåverdi |
|------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|
| M9 | 0 | 34 445 | 30* | 513 000 |

* levetid basert på lignende tiltak i kilde [7]

Resultatet viste en reduksjon i spesifikt energiforbruk på 6.2 kWh/m². Lønnsomhetsanalysen viste at implementering av LTFV kan gjennomføres uten å kombineres med større tiltak som utskiftning av vinduer, og fortsatt være lønnsomt. De originale radiatorstørrelsene i basemodellen var også store nok for LTFV, men det stilles spørsmål ved dimensjoneringen av radiatorstørrelsene i basemodellen.

Erfaring fra modell 9:

T2 (LTFV) er et bra tiltak som radiatorene i modellen er dimensjonert for, og vil i kombinasjon med T8 (Vannanlegg) med 55/25 °C være lønnsomme tiltak. LTFV vil også fungere dersom radiatorene har lavere kapasiteter tilpasset topplasten for varme i sonekategoriene

T8 (Vannanlegg) med 55/25 °C vil kunne forsyne radiatorene med høye nok temperaturer for å opprettholde et godt inneklima, samtidig som det reduserer fjernvarmeforbruket og topplaster for varme. Dette bidrar til at tiltaket vil være lønnsomt, og er et bedre alternativ for temperaturer enn 70/60 °C som tiltaket opprinnelig hadde.

5.11 Modell 10

De første ni modellene så hovedsaklig på reduksjon av varmeforbruk, topplaster for varme, og forbedring av komfort. I denne modellen var hensikten å redusere modellens elektrisitetsforbruk ved å forbedre virkningsgraden i ventilasjonsanleggenes vifter. Virkningsgraden til de ti viftene i M9 (to vifter per AHU) ble økt fra 0,55 til 0,85 i M10. I denne modellen var også T3 (Enhetssjekk) og T4 (AHU Foreles.) implementert.

Resultatet av smuleringen viste en reduksjon i spesifikt elektrisitetsforbruk med 15.2 kWh/m². Ved å kun analysere energiforbruket til modellens vifter ble det klart at viftene reduserte elektrisitetsbehovet med 15.0 kWh/m². I tabell 5.19 presenteres endring i spesifikt energiforbruk sammenlignet med basemodellen. I tillegg er lønnsomheten regnes ut ved nåverdimetoden, og beregningsgrunnlaget er presentert i tabellen.

Tabell 5.19: Reduksjon av spesifikt energiforbruk i modell 10 sammenlignet med basemodellen, og økonomisk analyse av modellen. Elektrisitetsreduksjon grunnet viftene ble også et grunnlag for energi- og lønnsomhetsanalyse for tiltak T10.

| Energi- endring: | Spesifikk energi [kWh/m²] | Spesifikk FV [kWh/m²] | Spesifikk EL [kWh/m²] |
|-----------------------------|---|---|---|
| M10 | - 18,5 | - 3,3 | - 15,2 |
| T10 | - 15,0 | 0,0 | - 15,0 |

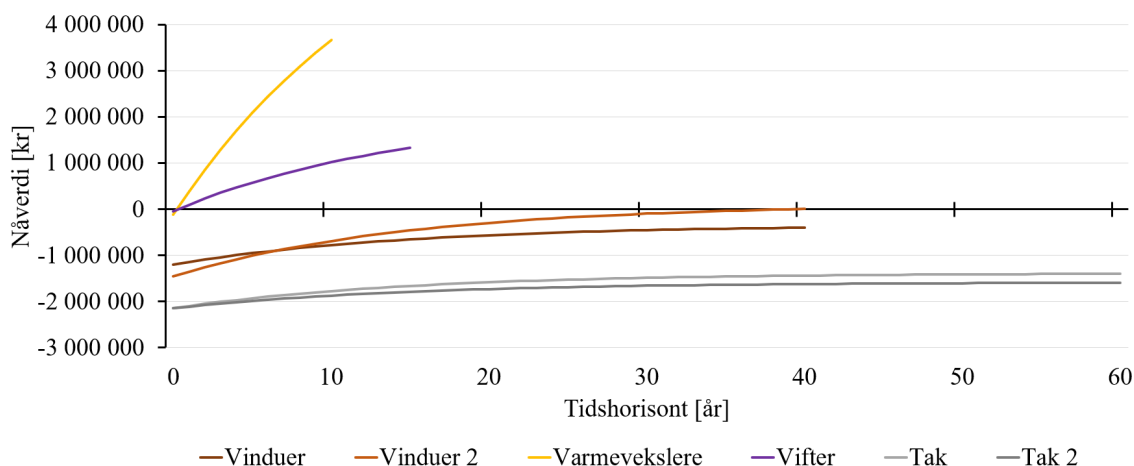
| Økonomi- analyse: | Investerings- kostnad [kr] | Energibesparelse per år, [kWh] | Levetid (snitt eller tot) [år] | Nåverdi |
|------------------------------|---|---|---|----------------|
| M10 | 40 000 | 132 440 | 15 | 1 407 000 |
| T10 | 40 000 | 125 444 | 15 | 1 331 000 |

Erfaring fra modell 10:

T10 (Vifter) er et godt tiltak for å redusere elektrisitetsbehovet, og er et lønnsomt tiltak i modellen både alene og i kombinasjon med T3 (Enhetssjekk) og T4 (AHU Foreles.).

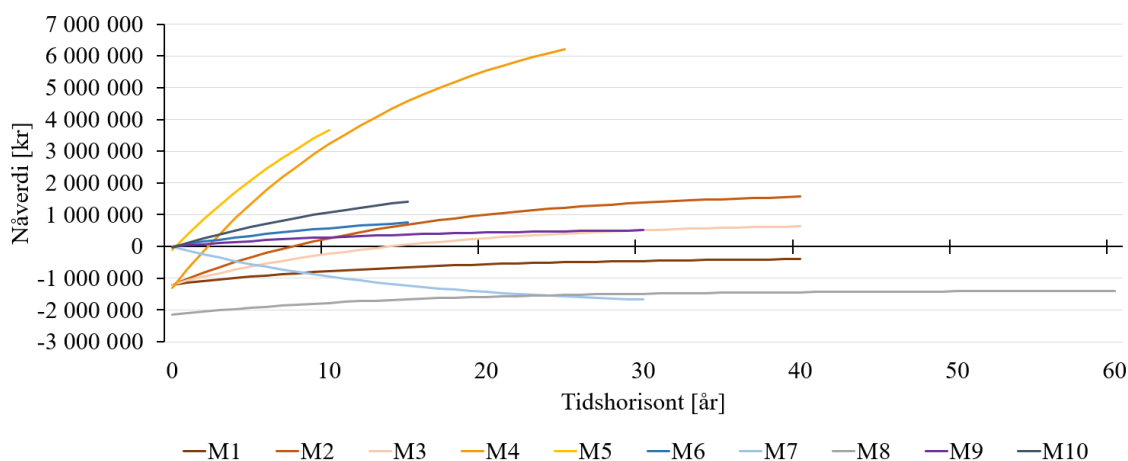
5.12 Oppsummering av økonomisk analyser for modellene

For hver modell ble tiltakenes kombinerte eller separate nåverdi over tiltakenes økonomiske levetid beregnet. I figur 5.12.1 presenteres utviklingen av nåverdien for de fire tiltakene med høye investeringskostnader (vinduer, varmevekslere, vifter og tak). Her er også nåverdien beregnet for tak- og vindutiltaket i Master 2018 presentert for sammenligning. Figuren viser at T6 (varmevekslere) har den høyeste nåverdien.



Figur 5.12.1: Grafisk fremstilling av utviklingen til tiltakenes nåverdi gjennom tiltakenes økonomiske levetid.

Utvikling av nåverdi for hver modell er vist i figur 5.12.2. Her er modelles totale energibesparelse per år og tiltakenes gjennomsnittlig økonomisk levealder brukt i beregningene. Fra figuren er det klart at M4 har den høyeste nåverdien, etterfulgt av M5. Begge disse modellene hadde implementert T6 (Varmevekslere).



Figur 5.12.2: Grafisk fremstilling av utviklingen til modellenes nåverdi gjennom den gjennomsnittlige økonomiske levetiden til de implementerte tiltakene.

For at T1 (Vindu) skal bli lønnsom må den totale investeringskostnaden være under 802 000 kr, og for T9 (Tak) må investeringskostnaden være under 750 000 kr. Dette anses å være umulig, da tiltakene gjør store endringer på bygningskonstruksjonen, i tillegg til at renoveringene vil påvirke bruksmønsteret i hhv. hele bygget og fjerde etasje. Omlokalisering under drift grunnet renoveringen vil øke investeringskostnadene.

5.13 Oppsummering tiltakenes vurdering

- T1 (Vindu) er et bra tiltak for å redusere energiforbruket til modellen, men tiltaket er et større bygningskonstruksjonelt tiltak som vil ha en høy investerings- og monteringskostnad, og som alene ikke er lønnsomt. Dersom tiltaket kombineres med flere energisparende tiltak, som T2, T3, T4 og spesielt T6 vil energibesparelsen bli høy nok til at investeringen kan rettferdiggjøres som lønnsom.
- T2 (LTFV) var et bra tiltak for å redusere fjernvarmebehov *dersom* tappevann varmes opp i en separat elektrisk kjel for å unngå legionella. Radiatorene i modellene har stor nok kapasitet til å levere nok varme til sonene med LTFV. Tiltaket vil være lønnsomt alene, uten at det påvirker inneklima.
- T3 (Enhetssjekk) var et bra tiltak som viste at kjøleren i laboratoriene og radiatorene i forelesningsrommene var unødvendige. Tiltaket reduserte elektrisitetsbehovet for kjøling og fjernvarmebehovet for oppvarming av enkelte soner, og da det ikke er noen investeringskostnader knyttet til tiltaket vil det være lønnsomt.
- T4 (AHU Foreles) var et bra tiltak som bedret inneklima og senket energibehov for oppvarming av luft i AHU Foreles. med 55%. Temperaturene i sonene var fortsatt litt høye, men å redusere ventilasjonstemperaturene til under 16 °C vil gi dårlig komfort for personer som får luften på huden. Siden tiltaket ikke krever noen investeringer, og energiforbruket reduseres er det et lønnsomt tiltak.
- T5 (Radiatorkontroll) er et dårlig tiltak med tanke på toppaster fra radiatorene og redusert varmebehov i første og fjerde etasje, men et godt tiltak i andre og tredje etasje. Etter analyser av kontrolleren knyttet det usikkerhet til hvor god kontrolleren kunne vært i virkeligheten.
- T6 (Varmeveksler) er et bra tiltak, og det tiltaket som alene gir størst reduksjon i spesifikt energibehov og høyest lønnsomhet.
- T7 (AHU) var et dårlig og ikke lønnsomt tiltak, som ikke bedret inneklima, men økte energibehovet for oppvarming i luft i ventilasjonsanleggene.
- T8 (Vannanlegg) var helhetlig et dårlig tiltak som økte fjernvarmebehovet for å holde temperaturene i vannanlegget over 60 °C, men det var interessant å vurdere temperaturene i vannanlegget med hensyn på legionellavekst. Tiltaket kan ikke kombineres med T2 (LTFV) grunnet de høye temperaturene i vannanlegget, og slike temperaturer er urealistisk i et virkelig system. Økningen i fjernvarmebehov ga tiltaket negativ nåverdi. I en revidert versjon av tiltaket med ble temperaturene i vannanlegget endret til 55 °C/25 °C, som var tilpasset LTFV. Dette var en lønnsom endring som tilpasset vannanleggets temperaturer til LTFV.
- T9 (Tak) var et bra tiltak som reduserte toppasten for varme i modellen og oppvarmingsbehovet for sonene i den øverste etasjen, men separat er ikke tiltaket lønnsomt.
- T19 (Vifter) var et bra tiltak, og det tiltaket som alene reduserte elektrisitetsbehovet mest. Utskiftning av vifter vil være et lønnsomt tiltak, selv om investeringskostnadene kan være høyere enn antatt.

Kapittel 6

Resultat fra simulering av den endelige modellen

Den endelige modellen var basert på erfaringer fra de M1 - M10. I dette kapitlet vil modellens implementerte tiltak presenteres og energieresultatene sammenlignes med de tidligere modellene. En lønnsomhetsanalyse av den endelige modellen vil bli presentert til slutt.

6.1 Implementerte tiltak i Endelig modell

I den endelige modellen ble innføringen av tiltakene basert på erfaringer fra tidligere modeller, hvor hensikten var å finne tiltak som ikke forstyrrer driften av universitetsbyggene, hadde god nåverdi og lav tilbakebetalingstid. Det var ønskelig å bruke tiltak som ikke berørte bygningskroppen, da motivasjonen for å gjennomføre ENØK-tiltak kan være større ved tiltak som ikke forstyrrer den vanlige driften, og som krever et entreprenørselskap for å gjennomføre renoveringen. De implementerte tiltakene var T2 (LTFV), T3 (Enhetssjekk), T4 (AHU Foreles.), T6 (Varmevekslere), T8 (Vannanlegg) med 55 °C/25 °C settpunkttemperaturer, og T10 (Vifter).

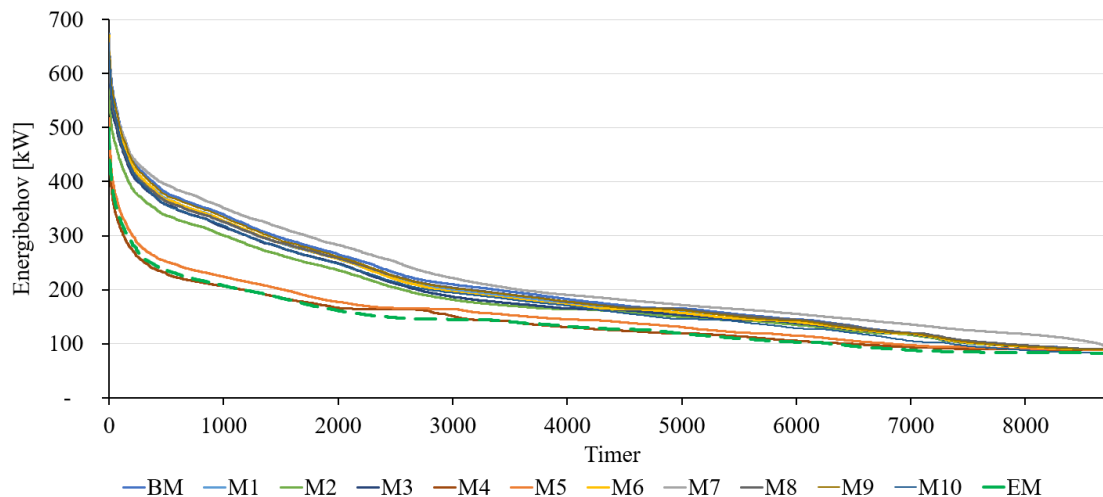
6.2 Energianalyse av den endelige modellen

Sammenlignet med basemodellen fikk EM en reduksjon i spesifikt fjernvarmebehov på 62,7 kWh/m², spesifikt elektrisitetsbehov ble redusert med 15,4 kWh/m² og for modelles totale spesifikke energiforbruk ble reduksjonen 78,1 kWh/m². Med et gulvareal på 7160 m² tilsvarte dette omtrent 560 000 kWh per år i energibesparelse. Dette resulterte i en endring i energikarakter fra F i basemodellen til D i den endelige modellen. Tabell 6.1 oppsummerer det spesifikke energiforbruket til basemodellen og den endelige modell, og reduksjonen fra BM til EM i kWh og prosent.

Tabell 6.1: Presentasjon av endring i spesifikt energiforbruk i den endelige modellen sammenlignet med basemodellen.

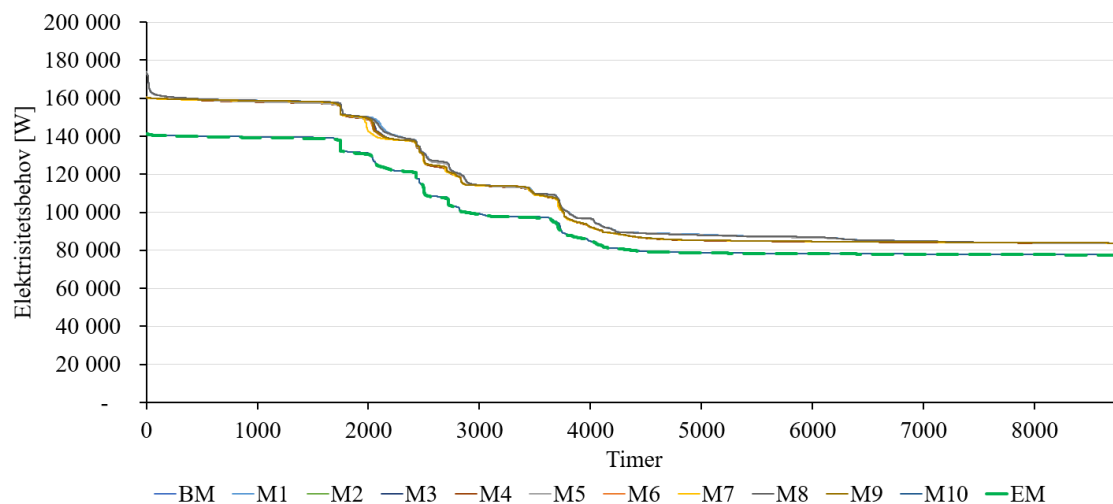
| Energi- endring: | Spesifikk energi [kWh/m²] | Spesifikk FV [kWh/m²] | Spesifikk EL [kWh/m²] |
|-----------------------------|---|---|---|
| Basemodell | 247,3 | 111,9 | 135,5 |
| Endelig modell | 169,2 | 49,2 | 120,0 |
| Reduksjon | 78,1 kWh | 62,7 kWh | 15,4 kWh |
| | 31,6 % | 56,5 % | 11,4 % |

For å sammenligne den EM med de andre modellene er varighetskurver av modellenes totale energibehov og elektrisitetsbehov presentert i henholdsvis figur 6.2.1 og 6.2.2. I figur 6.2.1 er det de tre modellene med varmevekslere som klart har det laveste energiforbruket (M4, M5 og EM). For modellene uten nye varmevekslere har M2 (Vindu + LTFV) det laveste energiforbruket, mens det økte fjernvarmeforbruket grunnet T8 (Vannanlegg) i M7 gir denne modellen det høyeste energiforbruket. Varighetskurven for fjernvarmeprofilen er svært lik som for det totale energiforbruket. Den høyeste topplasten for fjernvarme i den endelige modellen var 28,5 % lavere enn i basemodellen.



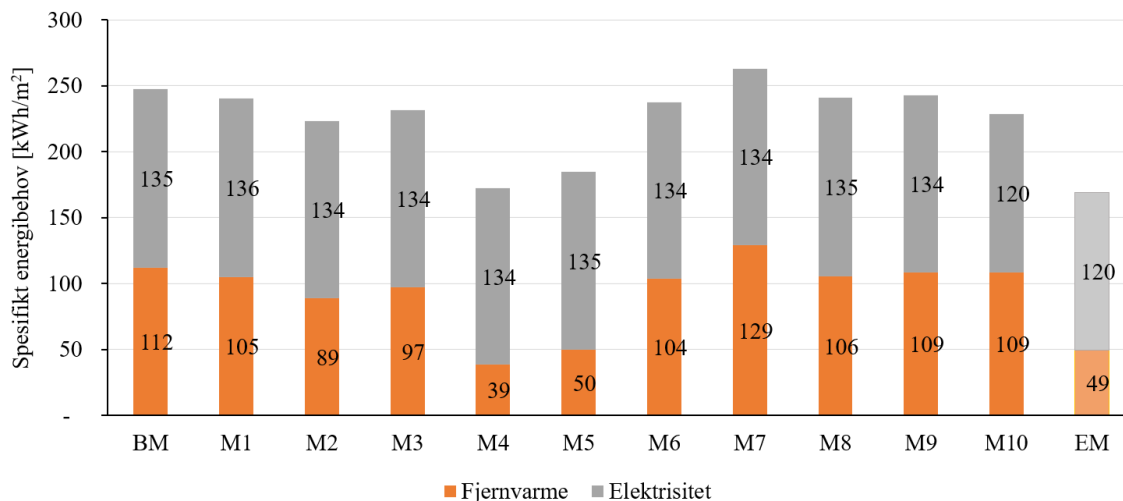
Figur 6.2.1: Sammenligning av den endelige modellens totale energibehov mot tidligere modeller

Figur 6.2.2 viser varighetskurven til alle modellens elektrisitetsforbruk. Det er lite variasjoner i alle modellene foruten M10 og EM, hvor T10 (Vifte) er implementert. Modellen med de høyeste effekttoppene for elektrisitet er M8 hvor forbedring av takets U-verdi førte til økt kjølebehov i sone Lab 4. Den høyeste topplasten for elektrisitet i den endelige modellen var 26,0 % lavere enn i basemodellen.



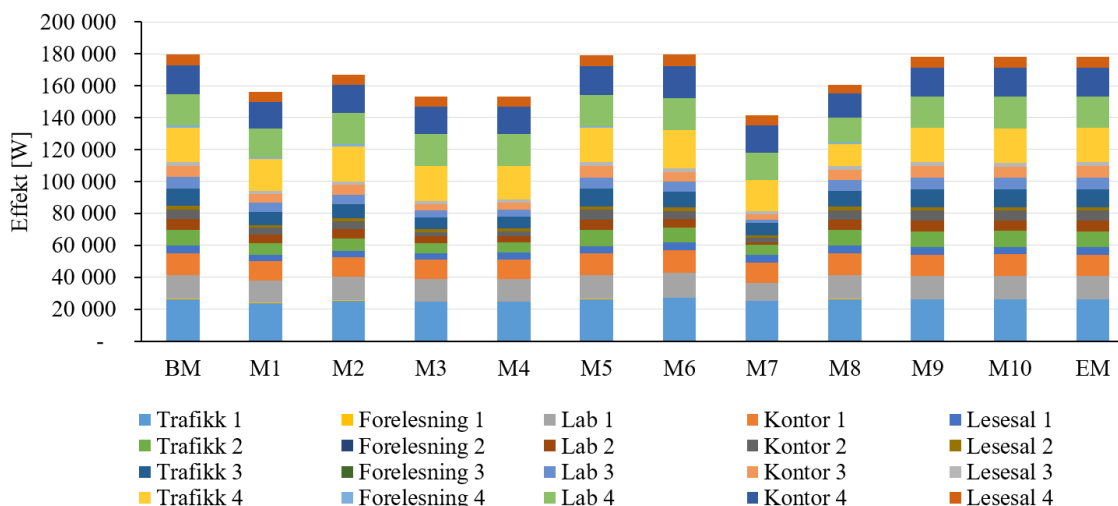
Figur 6.2.2: Sammenligning av den endelige modellens totale elektrisitetsbehov mot tidligere modeller

Figur 6.2.3 viser en sammenligning av modellens spesifikke energiforbruk med fordeling i fjernvarme- og elektrisitetsbehov. Her kommer det tydelig frem at M4 har det laveste spesifikke fjernvarmeforbruket mens M10 og EM har lavest elektrisitetsforbruk. Totalt sett har EM lavest energiforbruk.



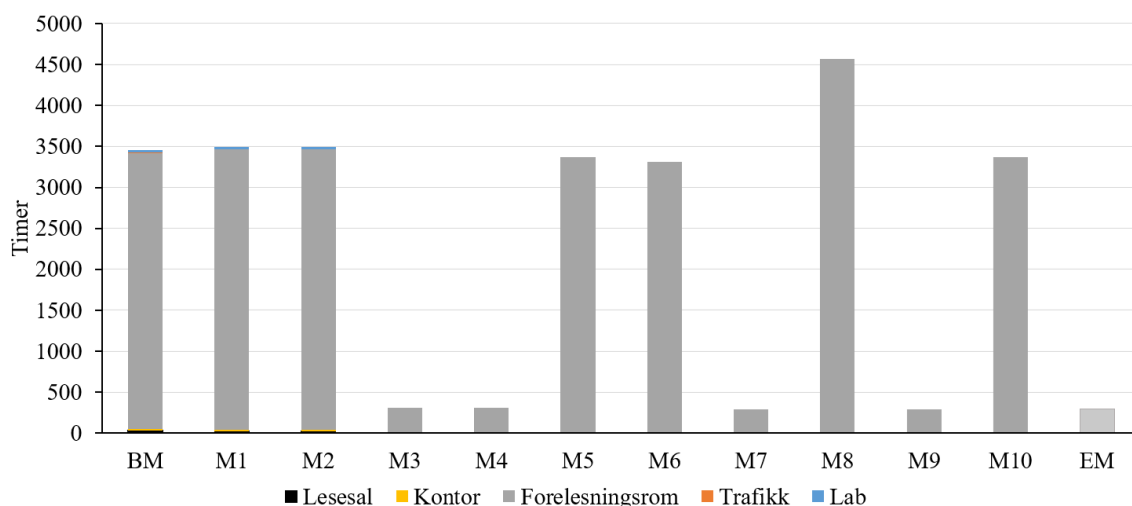
Figur 6.2.3: Sammenligning av den endelige modellens spesifikke energibehov mot tidligere modeller

For å illustrere hvordan topplastene for varme fra radiatorne endres ved de ulike tiltakene, er effekttoppene fra hver sone i hver modell vist i figur 6.2.4. Topplastene er lavest i M7 grunnet de høye temperaturene i vannanlegget, men topplastene var også lave i de tre modellene med PI-kontroller og hvor kun vinduer er skiftet ut. For EM ble effekttoppene for levert varme til sonene tilnærmet lik som i basemodellen.



Figur 6.2.4: Sammenligning av den endelige modellens høyeste målte topplast for varme til alle soner mot tidligere modeller

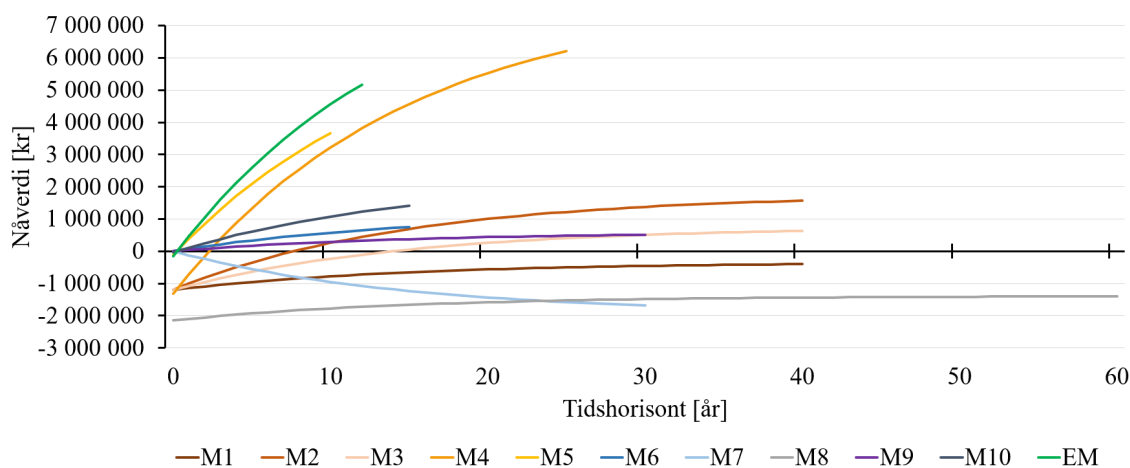
For å illustrere analysene av termisk komfort viser figur 6.2.5 fordelingen av uakseptable temperaturtimer i de fem sonekategoriene for hver modell. I modeller hvor T4 (AHU Foreles.) er implementert er antall UT sterkt redusert. I M8 økte antallet da etterisoleringen av taket førte til høyere operativ temperatur i etasjens øverste soner.



Figur 6.2.5: Sammenligning av den endelige modellens sum av uakseptable temperaturtimer fordelt etter sonekategori mot tidligere modeller.

6.3 Lønnsomhetsanalyse for den endelige modellen

For den endelige modellen ble viste lønnsomhetsanalysen at kombinasjonen av de implementerte tiltakene vil være en lønnsom investering. For tiltakenes gjennomsnittlige økonomiske levetid ble nåverdien beregnet til 5 316 000 kr. Tilbakebetalingstiden på disse tiltakene vil være 0,2 år. I figur 6.3.1 er nåverdien for EM sammenlignet med de andre modellene.



Figur 6.3.1: Grafisk fremstilling av utviklingen til modellenes nåverdi gjennom den økonomiske levetiden til de implementerte tiltakene.

6.4 Potensiell energiforbruk og lønnsomhet ved sammenslåing av modeller

Selv om hovedmålet var å finne flere mindre tiltak, var det også interessant å undersøke energibesparelsen og lønnsomheten for andre sammensetninger av tiltak fra ulike modeller. Tre potensielle kombinasjoner av enkelttiltak eller modeller ble vurdert, og presenteres i figur 6.2. Disse potensielle sammenslåingene av tiltak ble simulert i IDA ICE, men her var det kun ønskelig å sammenligne det spesifikke energiforbruket og mulig lønnsomhet uten dypere analyse av tiltakene.

Den første sammensetningen var M4 og M10, som var en kombinasjon av de modellene med lavest fjernvarme- og elektrisitetsforbruk. Den andre sammensetningen var M5 og M10, som var en kombinasjon av henholdsvis det beste tiltaket for å redusere fjernvarmeforbruket og elektrisitetsforbruket. Den tredje sammensetningen var M4, M8 og M9, hvor det var ønskelig å undersøke hvilken energikarakter modellen kan få ved implementering av større bygningskonstruksjonelle tiltak.

Tabell 6.2: Energireduksjon og energikarakter til tre potensielle kombinasjoner av tiltak fra tidligere modeller, sammenlignet mot den endelige modellen.

| Modell | Estimert energisparing [kWh] | Spes. energi-forbruk [kWh/m ²] | Spes. FV-forbruk [kWh/m ²] | Spes. EL-forbruk [kWh/m ²] | Modellens energikarakter |
|--------|------------------------------|--|--|--|--------------------------|
| EM | 559 000 | 169,2 | 49,2 | 120,0 | D |

Potensiell kombinasjon av modeller:

| | | | | | |
|---------------|---------|-------|------|-------|---|
| M4 + M10 | 633 000 | 158,8 | 38,5 | 120,3 | C |
| M5 + M10 | 545 000 | 171,0 | 49,8 | 120,4 | D |
| M4 + M8 + M10 | 660 000 | 155,1 | 29,0 | 121,0 | C |

Resultatet av analysen viste at energikarakteren kan løftes til en C dersom tiltak for å redusere modellens varmetap implementeres (T1 (vifter) eller T9 (Tak)). Disse tiltakene vil gi et spesifikt energiforbruk under 160 kWh/m². Ved å kun implementere nye varmevekslere og vifter i ventilasjonsanleggene (M5 + M10) vil ikke energiforbruket reduseres like mye som i EM. Dette viser viktigheten av flere små tiltak på temperaturregulering og kontroll.

Lønnsomhet

Lønnsomheten for de potensielle tiltakssammensetningene ble også beregnet. Analysen viste at alle de potensielle tilfellene kan være lønnsomme, og at alle tilfellene har tilbakebetalingstid på under 5 år. I tabell 6.3 sammenlignes lønnsomhetsanalysen for de potensielle sammensetningene med den endelige modellen. Resultatene viste at nåverdien til tiltak med T1 (vindu) og/eller T9 (Tak) var høyere enn for den endelige modellen, selv om disse to tiltakene alene hadde negativ nåverdi. Tilbakebetalingstiden til disse sammensetningene blir likevel høyere enn for den endelige modellen.

Tabell 6.3: Lønnsomhetsanalyse for den endelige modellen og tre potensielle tilfeller, hvor investeringskostnader fra tidligere tiltak kombineres med simulert energireduksjon

| Modell | Invest.- kostnad [kr] | Energi- besparelse [kWh/år] | Gj.snittlig levetid [år] | Nåverdi | Tilbake- betalingstid [år] |
|--------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------|----------------------------------|
| EM | 155 000 | 559 000 | 13,0 | 5 316 000 | 0,2 |

Potensiell lønnsomhet ved andre kombinasjon av tiltakene i andre modeller:

| | | | | | |
|---------------|-----------|---------|------|-----------|-----|
| M4 + M10 | 1 335 000 | 633 000 | 21,6 | 6 991 000 | 1,8 |
| M5 + M10 | 155 000 | 545 000 | 12,5 | 5 096 000 | 0,2 |
| M4 + M8 + M10 | 3 503 000 | 660 000 | 41,7 | 7 137 000 | 4,4 |

Implementering av vinduer og etterisolering av tak vil være lønnsomt selv om investeringskostnaden kan øke ved omlokalisering av driften i bygget. Det må likevel presiseres at energibesparelsen kan være mindre når flere større tiltak kombineres. Kalkulasjoner viser at så fremt til at energibesparelsen er mer enn 102 700 kr for M4 + M10, og over 217 300 kr for M4 + M8 + M10 vil tiltakene være lønnsomme. Dette som sannsynlig gitt energibesparelser over 500 000 kWh i alle simuleringene.

Kapittel 7

Diskusjon

Hvert enkelt tiltak og kombinasjonen av disse har vært diskutert i de to foregående kapitlene. Dette kapittelet drøftes tiltakenes aktualitet for implementering på Gløshaugen, og usikkerheter rundt simuleringene. Til slutt blir forslag til videre arbeid presentert.

7.1 Aktuelle tiltak for implementering på Gløshaugen

De tiltakene som ble vurdert aktuelle for implementering på Gløshaugen ble presentert i den endelige modellen (EM). Resultatet viste et godt redusert energiforbruk uten å gjøre endringer på bygningskonvolutten, og tiltakene hadde god nåverdi og kort tilbakebetalingstid. Tiltakene krever ingen endringer i rutiner for drift av bygget, kun noen endringer i temperaturinnstillinger og installasjon av nye varmevekslere og vifter. Disse tiltakene vil kreve liten innsats men gi stor belønning i energisparing.

Modell 4 og modell 8 må likevel trekkes frem som gode alternativer for videre anbefalinger av tiltak. I M4 var de implementerte tiltakene T1 (vindu), T2 (LTFV), T3 (Enhetssjekk), T4 (AHU Foreles.), T5 (Radiatorkontroll) og T6 (Varmevekslere). Denne modellen hadde 10 kWh/m² lavere spesifikt fjernvarmeforbruk enn EM. I tillegg viste M8 med T9 (Tak) at etterisolering av tak vil redusere effekttopper for varme og varmebehovet i øverste etasje. Disse tiltakene var likevel ikke implementert i den endelige modellen, selv om de i kombinasjon med andre tiltak kunne blitt lønnsomme. Ved utskiftning av vinduer og etterisolering av tak må forstyrrelse av den normale driften vurderes. For å unngå økte kostnader ved omlokalisering eller stans av driften i universitetsbyggene bør tiltakene bli implementert om sommeren når studentene og mange ansatte har ferie. Da vil også forstyrrelser fra anleggsstøy under normal drift unngås.

Av de tiltakene som har større investeringskostnader (vinduer, tak, varmevekslere og vifter) er varmevekslere og vifter tiltakene som alene er lønnsomme. Disse tiltakene har relativt lave investeringskostnader og gir stor reduksjon i energiforbruk. Lønnsomhetsanalyser av modeller med flere tiltak viser at utskiftning av vinduer og etterisolering av tak kan "rettferdiggjøres" i kombinasjon med nye varmevekslere og vifter for å sikre lavere varmebehov. Det er likevel viktig at eksisterende vinduer blir brukt ut sin levetid både for å minimere materialkostnader men også med hensyn på miljø. Kombinasjonen av flere disse tiltakene til tiltakene i den endelige modellen vil gi bygningene bedre energikarakter og løfte kvaliteten på bygget.

Enkelte tiltak fremsto som bra i modellene for å redusere energibehovet, men tiltakene er ikke nødvendigvis compatible med bygningsmassen på Gløshaugen. Eksempler på dette T3 (Enhetssjekk) og T5 (Radiatorkontroll). T3 var tiltaket hvor kjøleenheter i laboratoriene og radiatorene i forelesningsrommene ble fjernet. Fra simuleringene kom det frem at det

brukes ca. 4 000 kWh energi til kjøling per år, og at eliminering av disse kjøleenehetene ikke påvirket termisk komfort. Dette kan derfor være et aktuelt tiltak på Gløshaugen. I forelesningsrommene derimot var de operative temperaturene opp mot 27 grader i basemodellen og simuleringen viste en dårlig termisk komfort. Med bakgrunn i empiriske observasjoner ble det stilt spørsmål til om disse resultatene er representative for forelesningsrommene i de bygningene på Gløshaugen som referansemodellen var basert på (figur 4.1). Temperaturene oppleves lavere og mer komfortabelt enn hva simuleringen viste. Dette stiller spørsmål ved simuleringens kredibilitet knyttet til innetemperaturene i disse sonene. Dersom temperaturene i forelesningsrommene ikke overstiger settpunkttemperaturene på 21 °C vil ikke fjerning av radiatorene (eller stans av massestrømmen gjennom radiatorene) være en aktuell del av tiltaket for bygningsmassen.

Det knyttet også en usikkerhet til om energi- og effektreduksjonen fra tiltak T5 (Radiatorkontroll) var representativ for en faktisk ending i radiatorkontrollen på Gløshaugen. I virkeligheten vil små endringer i radiatorkontrollerens PI-parametre gi store endringer i pådrag av massestrøm gjennom radiatorene, i motsetning til analysen i kapittel 5.7. Det er vanskelig å si noe om hvor godt kontrolleren i IDA ICE ville fungert i realiteten siden kontrollerenes parametre er ukjent, og forfatteren av denne rapporten har ikke hatt tilgang til den sentrale driftskontrollen på NTNU for å forstå hvordan radiatorene kontrolleres i dag. Likevel viser resultatene av simuleringene at endring av kontroll *kan* ha en positiv innvirkning på fjernvarme-forbruk og kontroll i enkelte soner. Dette viser viktigheten av kalibrering av radiatorkontrollere og at det kan være potensial for forbedret kontroll i bygningsmassen.

I miljøutviklingsplanen til NTNU var målene knyttet til energi å redusere eget forbruk med minimum 50 % per årsverk i forhold til 2019. Under dette var et det ene delmålet å gjennomføre en spesifikk vurdering av tiltak for redusert energibruk for alle bygg. Energiforbruket knyttet til bygningene i denne rapporten ble ikke halvert, men i den endelige modellen var reduksjonen av spesifikt energiforbruk 31,6 % sammenlignet med basemodellen. I EM var fjernvarme-forbruket over halvert, men det ville vært nødvendig med flere tiltak knyttet til elektrisitetsforbruk for å nå en halvering av totalt energiforbruk. Ved implementering av tiltakene i den endelige modellen kan bygningsmassen oppnå energikarakter D, og tiltakene har en tilbakebetalingstid på 0,2 år. For bygninger med energistandard lik TEK 10 eller eldre vil energikarakter C være en øvre grense. Potensialet for å oppnå denne energikarakter er til stede ved implementering av tiltakene T1 (vindu) og T9 (Tak) til den endelige modellen. Tiltakene i den endelige modellen er likevel et godt steg i retning av å halvere energiforbruket i bygningsmassen.

Det andre delmålet i miljøutviklingsplanen var at energiøkonomiseringstiltak med lavere tilbakebetalingstid enn 5 år skal identifiseres og som hovedregel innføres på NTNUs campus. Kombinasjonen av tiltakene i den endelige modellen ga en tilbakebetalingstid på 0,2 år, hvilket møter delmålet fra utviklingsplanen med god margin. Ved implementering av T1 (Vindu) og T9 (Tak) for økt energibesparelse vil tilbakebetalingstiden øke til 4,4 år. Dette er også innenfor kravet for tilbakebetalingstid i miljøutviklingsplanen, og bør derfor vurderes som tiltak for bygningsmassen i kohorten 1951 - 1970.

7.2 Usikkerheter

Det knyttet noen usikkerheter til de faktiske energibesparelsene mot simulerte besparelser. I år med høyere utetemperaturer vil varmebehovet reduseres, og energibesparelsen kan bli mindre. I andre år eller perioder med svært lave temperaturer kan ENØK-tiltakene gi økt energibesparelse. Dette er en faktor som kan påvirke lønnsomheten og tilbakebetalingstiden. I klimaprofilen brukt i simuleringene var spennet i utetemperaturer fra -17.5°C til 28.6°C ; det var et stort temperaturspenn i simuleringen, men de siste vintrene har vist at temperaturen i Trondheim også kan komme ned i -20°C over flere dager. Simuleringene av energibesparelsene gir derfor et bilde av hvordan besparelsen kan bli, men resultatene kan endres ved høyere eller lavere utetemperaturer.

En annen usikkerhet knyttet energiforbruk i fremtiden knyttet til mulige endringer i bruksmønsteret på universiteter som følge av Covid-19. Ved at hjemmekontor og hjemmeundervisning kan bli mer vanlig i kommende år kan dette føre til at færre studenter og ansatte oppholder seg på universitetet. Dette kan redusere behovet for utskiftning av luften i rommene og elektrisitetsbehovet til ventilasjonsanlegg og utstyr vil da bli redusert. På den andre siden kan varmebehovet øke når varmetilskuddet fra personer i rommene minsker.

Det knyttet også usikkerheter rundt enkelte funn i simuleringene. Ved å vurdere antall timer i komfortkategorien “uakseptable temperaturtimer” ble modellenes termiske komfort sammenlignet. Nærmere undersøkelser viste at summen av okkupertimer i de ulike komfortkategoriene ble endret mellom noen modeller, selv om okkupertimeplanen forble uendret. Dette stiller spørsmål ved beregningen av termisk komfort i IDA ICE, men ved å vurdere de operative temperaturene i sonene ble det likevel klart at de har noe for seg.

Kapittel 8

Konklusjon

I denne rapporten ble energieffektiviseringstiltak for mulig implementering på Gløshaugen kartlagt. Energisparingspotensialet ble funnet ved bruk av simuleringsverktøyet IDA ICE, og nåverdi- og tilbakebetalingsmetoden ble brukt i lønnsomhetsanalyser av tiltakene. Tiltakene skulle vurderes opp mot NTNUs miljøutviklingsplan frem mot 2030 og målene for energireduksjon i NTNUs bygningsmasse. I miljøutviklingsplanen var forbedring av byggenes energikarakter, og tiltakenes tilbakebetalingstid i fokus. Simuleringene av tiltakene tok utgangspunkt i en modell av en typisk bygning på Gløshaugen i IDA ICE, lagd i en tidligere masteroppgave i 2018. Denne modellen ble referert til som “Modell 2018”.

Ved å kalibrere Modell 2018 ble gjennomsnittlig årlig avvik mellom den faktiske og simulerte elektrisitets- og fjernvarmeprofilen redusert. Kalibreringen besto av å regulere bruksmønsteret for den første uken i januar, endre kontroll av ytterdøren fra “aldri åpen” til “åpen i perioder mellom forelesninger”, og en redusere i virkningsgraden til ventilasjonsanleggenes vifter fra 0,6 til 0,55. Dette førte til at gjennomsnittlig avvik fra simulert og faktisk forbruk ble redusert med 62 % for elektrisitet og 13 % for fjernvarme i den kalibrerte modellen sammenlignet med Modell 2018. Kalibreringen var viktig for å gjøre modellen mer realistisk og lik den faktiske energiprofilen og dannet en god basemodell (BM) for videre simuleringer.

Ti energieffektiviseringstiltak var simulert alene eller i kombinasjon med andre tiltak i ti IDA ICE modeller. Sparingspotensialet for energi og topplast, rommenes termiske komfort og lønnsomhet ble analysert for hver modell. Det tiltaket som alene reduserte fjernvarmeforbruket mest var T6 (Varmeveksler) som besto av å implementere varmevekslere i ventilasjonsanlegg hvor det ikke eksisterer, og skifte ut eksisterende varmevekslere slik at virkningsgraden øker. Tiltak T10 (Vifter) besto av å øke virkningsgraden til viftene i ventilasjonsanleggene, og var tiltaket som reduserte elektrisitetsbehovet mest. Det ble funnet temperaturregulerende tiltak som forbedret den termiske komforten i modellen, og det ble bevist at radiatorene er dimensjonert for å kunne levere nok varme til rommene ved bruk av temperaturer for lavtemperatur fjernvarme i vannanlegget.

ENØK-tiltakenes lønnsomhet ble analysert. Viktigheten av “små” tiltak som endring av settpunkttemperaturer i rom og vannanlegg, og endring av kontroll av radiatorer var tydelig da disse tiltakene reduserte energibehovet og hadde lave eller ingen investeringskostnader. Det mest lønnsomme tiltaket var T6 (Varmeveksler) som alene halverte modellens fjernvarmebehov og hadde en nåverdi på 3 663 000 kr. Lønnsomhetsanalysen viste at tiltak som ikke gikk på bygningskonvoluttene var lønnsomme. Etterisolering av tak og utskiftning av vinduer er tiltak som separat ikke ga positiv nåverdi, men nåverdien kan bli positiv og investeringene kan rettferdiggjøres dersom disse tiltakene kombineres med andre tiltak. En slik renovering av bygningsmassen vil i kombinasjon med de foreslåtte tiltakene fra EM kunne redusere det spesifikke energibehovet betraktelig, forbedre byggenes energikarakter og har tilbakebetalingstid på

4,4 år. Ulempen med disse tiltakene er at renoveringen av bygningskroppen kan gå ut over den daglige driften av universitetsbyggene. Dersom investeringskostnadene øker ved omlokalisering av den normale driften for renoveringen, vil tilbakebetalingstiden raskt overstige fem år. Da vil ikke disse tiltakene være innenfor grensen for tilbakebetalingstid i NTNUs miljøutviklingsplan.

Erfaringene fra de ti simulerte modellene ble brukt i en “endelig modell” (EM) hvor energisparing, komfort og lønnsomhet i fokus. Det var ønskelig å bruke tiltak som ikke berørte bygningskroppen, da motivasjonen for å gjennomføre ENØK-tiltak kan være større ved tiltak som ikke forstyrrer den vanlige driften og som krever et entreprenørselskap for å gjennomføre renoveringen. Av de ti tiltakene ble følgende seks tiltak implementert i den endelige modellen:

- T2 (LTFV): temperaturene i radiatorne ble endret fra 80/60 °C til 55/45 °C, og det var antatt at tappevann ble varmet opp av en elektrisk kjel separat fra vannanlegget.
- T3 (Enhetssjekk): radiatorer i forelesningsrom og kjøleenheten i laboratorium ble fjernet for å bedre termisk komfort og redusere elektrisitets- og fjernvarmebehov.
- T4 (AHU Foreles): reduserte temperaturen i ventilasjonsanlegget i forelesningsrommene fra 18 °C til 16 °C for å bedre termisk komfort.
- T6 (Varmevekslere): virkningsgraden i ventilasjonsanleggenes varmevekslere ble økt fra 0,55 til 0,80, da dette tiltaket alene vil gi stor reduksjon i fjernvarmeforbruk.
- T8 (Vannanlegg): endret settpunkttemperaturer i vannanlegget fra 80/25 °C i basemodellen til 55/25 °C. Dette tiltaket ville redusere topplasten for varme og fjernvarmebehovet og ha temperaturer tilpasset radiatorne.
- T10 (vifter): virkningsgraden i ventilasjonsanleggenes vifter ble økt fra 0,55 til 0,85 for å redusere elektrisitetsbehovet.

Kombinasjonen av disse tiltakene førte til en reduksjon i spesifikt fjernvarmebehov fra 112 kWh/m² i basemodellen til 49 kWh/m² i den endelige modellen, og en reduksjon i spesifikt elektrisitetsforbruk fra 135 kWh/m² i basemodellen til 120 kWh/m² i den endelige modellen. Det totale spesifikke energibehovet i den endelige modellen ble 169 kWh/m², som var en reduksjon på 32 % sammenlignet med basemodellens 247 kWh/m². Dette løftet energikarakteren fra F i basemodellen til D i den endelige modellen, og tiltakene hadde en tilbakebetalingstid på 0,2 år.

Fra den endelige modellen ble det klart at følgende tiltak bør vurderes for implementering i Gløshaugens bygningsmasse: 1) implementere eller erstatte varmevekslere i ventilasjonsanleggene for å øke virkningsgraden i systemet, 2) erstatte viftene i ventilasjonsanleggene for å øke virkningsgraden i systemet, 3) tilpasse temperaturene i vannanleggene og radiatorne mot lavtemperatur fjernvarme og la tappevann varmes opp av elektriske kjeler gjennom hele året. Simuleringene viste også at forbedrede eller kalibrerte kontrollsystemer kan gi god energisparing, men dette er tiltak hvis resultat vanskelig kan sammenlignes direkte mot de eksisterende systemene på Gløshaugen slik simuleringgrunnlaget foreligger i dag. Renovering av bygningskroppens tak og vinduer kan gi bygningsmassen energikarakter C, men tilbakebetalingstid nærmere 5 år og mulig forstyrrelser i driften av universitetsbyggene gjør tiltakene mindre attraktive enn de foreslåtte tiltakene.

Kapittel 9

Videre arbeid

Forslag til videre arbeid:

- Undersøke hvordan bruk av termisk lagring av varme og kulde kan brukes for å redusere energibehovet på dagtid
- Undersøke hvordan de implementerte tiltakene i denne modellen påvirker energiforbruket i referansem modellene fra de tre andre kohortene fra Master 2018
- Samle inn data om eksisterende varmepumper på Gløshaugen og implementere dette i basemodellen

Referanser

- [1] International Energy Agency. “Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings”. In: *Deploying Renewables: Principles for Effective Policies*. OECD, Oct. 20, 2008, pp. 15–198.
- [2] IEA. *Data & Statistics of energy data*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics> (visited on 03/23/2021).
- [3] Norges Energi og Vassdragsdirektorat. *Energibruk i bygg*. URL: <https://www.nve.no/energibruk-effektivisering-og-teknologier/energibruk/energibruk-i-bygg/?ref=mainmenu> (visited on 05/31/2021).
- [4] Zero Sweco. *Energisparing i norske bygg mot 2030*. June 10, 2019.
- [5] NTNU. *Miljøutviklingsplan 2020 - 2030*. Dec. 1, 2020.
- [6] Eirik Andre Nesgård and Minh Huy Ngo. *Framtidens energiveier for bygninger - muligheter for energieffektivisering og konvertering til fornybar energikilde i bygningsmasser*. Norges teknisk- og naturvitenskapelige universitet i Trondheim, June 2018.
- [7] NTNU and Sintef. *Energy Management in Buildings*. 3rd ed. Norge: Universitetsforlaget AS, 2007. ISBN: 78-82-05-37496-6.
- [8] Enova. *Støttetilbud til bygg og eiendom*. Enova. May 12, 2021. URL: <https://www.enova.no/bedrift/bygg-og-eiendom/> (visited on 05/12/2021).
- [9] Karin Ibenholt and Kristine Fiksen. *Energieffektivisering i eksisterende bygg*. Vista Analyse / THEMA Consulting, Dec. 7, 2011.
- [10] Kjell Rune Verlo et al. *Oppsummering av høring og anbefaling til endringer i nettleiestrukturen*. Norges vassdrags- og energidirektorat, June 2020.
- [11] SSB. *Elektrisitetspriser*. ssb.no. May 14, 2021. URL: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/statistikker/elkraftpris/kvartal/2021-05-14> (visited on 05/25/2021).
- [12] *Fjernvarme - prismodell*. Statkraft. URL: <https://www.statkraftvarme.no/produkter-og-tjenester/prismodell/> (visited on 05/25/2021).
- [13] Energi Norge. “Hva er egentlig nettleie og hva påvirker den?” 2020.
- [14] Lovinda Ødegården and Sajan Bhandari. *Status of prognoser for kraftsystemet 2018*. Norges vassdrags- og energidirektorat, 2018.
- [15] Jonas S. Amundsen, Gudmund Bartnes, and Eirik Øyslebø. *Kraftmarkedsanalyse 2016 - 2030*. Norges vassdrags- og energidirektorat, Dec. 2016.

- [16] Ole Lislebø et al. *Nettplan Stor-Oslo: Alternativer til nettinvesteringer*. Statnett SF: EC-group AS og Xrgia AS, Jan. 27, 2012.
- [17] Marie Sveen Olsen. *Reduksjon av effekttopper i kontorbygg*. NTNU, June 2018.
- [18] Hanne Marit Dalen and Bodil Merethe Larsen. *Formålsfordeling av husholdningenes elektrisitetsforbruk i 2006*. Statistisk sentralbyrå, Sept. 2009.
- [19] Enova. *Potensial- og barrierestudie: Energieffektivisering i norske bygg*. Jan. 2012.
- [20] SSB. *Bygningsmassen i Norge*. URL: <https://www.ssb.no/bygg-bolig-og-eiendom/statistikker/bygningsmasse/aar/2021-02-09> (visited on 05/12/2021).
- [21] *Bygg for fremtiden - Miljøhandlingsplan for bolig- og byggesektoren 2009-2012*. Kommunal- og regionaldepartementet, Sept. 2009.
- [22] Energimerking.no. *Energimerkeordningen - Karakterskalaen*. Oct. 13, 2009. URL: <https://www.energimerking.no/no/energimerking-bygg/om-energimerkesystemet-og-regelverket/karakterskalaen/> (visited on 05/31/2021).
- [23] Direktoratet for Bygningskvalitet. *TEK 17*. Sept. 15, 2017.
- [24] R. J. Cole and N. S. Sturrock. *The Convective Heat Exchange at the External Surface of Buildings*. 1977.
- [25] Alfred Moser. *Buildings and heat transfer*. Thermopedia. URL: <https://thermopedia.com/content/603/>.
- [26] Jørn Stene. “Varmepumper og grunnleggende termodynamikk for varmpumpeprossenes, TEP4260”. Norges teknisk- og naturvitenskapelige universitet i Trondheim, 2020.
- [27] Halvor Røstad and Vidar Havellen. *Ventilasjon og varmebatteri*. In: *Store norske leksikon*. Feb. 20, 2018. URL: <http://snl.no/ventilasjon> (visited on 06/01/2021).
- [28] Mohamed Hamdy. “Building Performance Simulation, TBA4166”. Norges teknisk- og naturvitenskapelige universitet i Trondheim, Jan. 6, 2020.
- [29] Norsk Fjernvarme. *Kort historikk*. URL: www.fjernvarme.no/fakta/kort-historikk (visited on 03/24/2021).
- [30] Henrik Lund et al. “4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems”. In: 68 (Apr. 15, 2014). ISSN: 0360-5442.
- [31] Norsk Fjernvarme. *Fjernvarme*. URL: <http://www.fjernvarme.no/fakta/fjernvarme> (visited on 03/23/2021).
- [32] Laurent Georges. “BPS Airflow evaluation using ventilation networks, TBA4166”. Norges teknisk- og naturvitenskapelige universitet i Trondheim, Feb. 2020.
- [33] *Interne vannfordelingsnett som forsyner dusjer og andre aerosoldannende tappepunkter*. Folkehelseinstituttet. URL: <https://www.fhi.no/nettpub/legionellaveilederen/>

- temakapitler/interne-vannfordelingsnett-som-forsyner-dusjer-og-andre-aerosoldannende-tappepunkter/ (visited on 06/01/2021).
- [34] Patrick White. *The Basics of Process Control Diagrams*. Technology Transfer Services. URL: <https://www.techtransfer.com/blog/basics-process-control-diagrams/> (visited on 05/29/2021).
- [35] Brian Douglas. *The Fundamentals of Control Theory*. June 11, 2019.
- [36] Gunnar Grini, Isak Oksvold, and Ruth Astrid Sæter. *Potensialstudie - Kostnadseffektive energitiltak i eksisterende bygninger*. Gehøyr Strategi og Rådgivning, Aug. 14, 2017.
- [37] *Næringsbygg – Hvordan utøve god energiledelse under bygging*. Enova. (Visited on 05/27/2021).
- [38] EQUA. *IDA ICE - Simulation Software*. URL: <https://www.equa.se/en/ida-ice#> (visited on 05/12/2021).
- [39] Guangy Cao. “Atmospheric indoor environment - Indoor Air Quality, TEP4315”. Norges teknisk- og naturvitenskapelige universitet i Trondheim, Aug. 24, 2020.
- [40] Vojislav Novakovic. “Humid Air, TEP4315”. Norges teknisk- og naturvitenskapelige universitet i Trondheim, Sept. 17, 2020.
- [41] EQUA. *IDA Indoor Climate and Energy - User Manual, version 4.5*. Feb. 2013.
- [42] Vojislav Novakovic. “Fans and pumps - design, construction, characteristics, operating characteristics and selection. TEP4245”. Norges teknisk- og naturvitenskapelige universitet i Trondheim, Feb. 7, 2020.
- [43] *Lav kraftpris medfører lavere inntektsrammer for 2020 - NVE*. NVE. Feb. 16, 2021. URL: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/nytt-fra-rme/nyheter-reguleringsmyndigheten-for-energi/lav-kraftpris-medforer-lavere-inntektsrammer-for-2020/> (visited on 05/19/2021).
- [44] Norgesvinduet. *Prisliste, Vinduer og balkongdører*. URL: <https://norgesvinduet.no/uploads/file/Brosjyrer/Prisliste%20april%202019.pdf>.
- [45] Gilje. *Prisliste Vinduskolleksjon*. Apr. 2020.
- [46] SystemAir. *Systemair Prisliste for varmevekslere*. May 19, 2021.
- [47] *Etterisolering: Hva koster det? (2021-pris)*. URL: <https://www.byggstart.no/pris/etterisolering> (visited on 05/28/2021).
- [48] Halvor Haugsvold. *Design av ventilasjonsvifte*. Norges teknisk- og naturvitenskapelige universitet i Trondheim, June 2010.

Vedlegg A Utklipp av NS-EN 16798

**Norsk
Standard****NS-EN 16798-1:2019**

Publisert: 2019-08-01

Korrigert: 2019-08-21

Språk: Engelsk

**Bygningers energiytelse
Ventilasjon i bygninger
Del 1: Inneklimaparametere for
dimensjonering og vurdering av
bygningers energiytelse inkludert
inneluftkvalitet, termisk miljø,
belysning og akustikk (Modul M1-6)***Energy performance of buildings**Ventilation for buildings**Part 1: Indoor environmental input parameters for design
and assessment of energy performance of buildings
addressing indoor air quality, thermal environment,
lighting and acoustics (Module M1-6)*

Referansenummer:

NS-EN 16798-1:2019 (en)

© Standard Norge 2019



NS-EN 16798-1:2019

EN 16798-1:2019 (E)

Table B.4 — Indoor operative temperature correction ($\Delta\theta_o$) applicable for buildings equipped with fans or personal systems providing building occupants with personal control over air speed at occupant level

| Average Air Speed (v_a) 0,6 m/s | Average Air Speed (v_a) 0,9 m/s | Average Air Speed (v_a) 1,2 m/s |
|--|--|--|
| 1,2 °C | 1,8 °C | 2,2 °C |

NOTE An air speed over 0,8 m/s moves the normal office paper from the desk.

B.2.4 Default indoor temperatures for energy calculations

Table B.5 — Temperature ranges for hourly calculation of cooling and heating energy in four categories of indoor environment

| Type of building or space | Category | Temperature range for heating seasons, °C Clothing approximately 1,0 clo | Temperature range for cooling seasons, °C Clothing approximately 0,5 clo |
|--|----------|---|---|
| Residential buildings, living spaces (bed room's, kitchens, living rooms etc.) Sedentary activity ~1,2 met | I | 21,0 - 25,0 | 23,5 - 25,5 |
| | II | 20,0 - 25,0 | 23,0 - 26,0 |
| | III | 18,0 - 25,0 | 22,0 - 27,0 |
| | IV | 17,0 - 25,0 | 21,0 - 28,0 |
| Residential buildings, other spaces (utility rooms, storages etc.) Standing-walking activity ~1,5 met | I | 18,0 - 25,0 | |
| | II | 16,0 - 25,0 | |
| | III | 14,0 - 25,0 | |
| Offices and spaces with similar activity (single offices, open plan offices, conference rooms, auditoria, cafeteria, restaurants, class rooms) Sedentary activity ~1,2 met | I | 21,0 - 23,0 | 23,5 - 25,5 |
| | II | 20,0 - 24,0 | 23,0 - 26,0 |
| | III | 19,0 - 25,0 | 22,0 - 27,0 |
| | IV | 17,0 - 25,0 | 21,0 - 28,0 |
| During the between heating and cooling seasons (with θ_{rm} between 10 and 15°C) temperature limits that lie in between the winter and summer values may be used. Air velocity is assumed < 0,1 m/s and RH~40% for heating season and 60% for cooling season. | | | |

The mean design operative temperature can vary from the values shown to take account of e.g. local custom or a desire for energy saving so long as the within-day variation from the design temperature is within the given range, and the occupants are given time and opportunity to adapt to the modified design temperature.

During between the heating and cooling seasons (with θ_{rm} between around 10 and 15 °C), adjusted upper and lower temperature limits may be used that lie in between the winter and summer values mentioned in Table B.5.

NS-EN 16798-1:2019 provided by Standard Online AS for NTNU Universitetsbiblioteket 2020-01-26

Vedlegg B Økonomisk analyse av tiltak og modeller

Tabell B.1: Økonomisk analyse av tiltak med investeringskostnader og alle modellene ved bruk av nåverdimetoden, en forenklet tilbakebetalingsmetode og antall år med gevinst. Her presenteres også antatt investeringskostnad, energibesparelse, energikostnadsbesparelse og økonomisk levetid

| Metode | Nåverdimetoden | | | Økonomisk levetid | | | Tilbakebetalingstid | |
|---------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------|-------------------------------|---------------------|--|
| | Investeringskostnad [kr] | Energibesparelse [kWh] | Energikostnad, besparelse [kr/år] | Økonomisk levetid | Nåverdi | Forenklet tilbakebetalingstid | År med gevinst | |
| Vinduer | 1 200 000 | 50125 | 60 150 | 40 | - 398 000 | 20 | 20 | |
| Vinduer 2 | 1 460 000 | 91638 | 109 965 | 40 | 6000 | 13 | 27 | |
| Varmevekslere | 115 000 | 448210 | 537 852 | 10 | 3 663 000 | 0 | 10 | |
| Vifter | 80 000 | 125444 | 150 533 | 15 | 1 291 000 | 1 | 14 | |
| Tak | 2 148 000 | 44459 | 53 351 | 60 | - 1 399 000 | 40 | 20 | |
| Modell | | | | | | | | |
| M1 | 1 200 000 | 50 125 | 60 150 | 40 | - 398 000 | 20 | 20 | |
| M2 | 1 200 000 | 173 061 | 207 673 | 40 | 1 569 000 | 6 | 34 | |
| M3 | 1 200 000 | 114 746 | 137 696 | 40 | 636 000 | 9 | 31 | |
| M4 | 1 315 000 | 538 153 | 645 783 | 25 | 6 211 000 | 2 | 23 | |
| M5 | 115 000 | 448 210 | 537 852 | 10 | 3 663 000 | 0 | 10 | |
| M6 | - | 68 505 | 82 205 | 15 * | 749 000 | - | 15 | |
| M7 | - | - 112 594 | - 135 112 | 30 | - 1 677 000 | - | 30 | |
| M8 | 2 148 000 | 44 459 | 53 351 | 60 | - 1 399 000 | 40 | 20 | |
| M9 | - | 34 445 | 41 333 | 60 * | 580 000 | - | 60 | |
| M10 | 80 000 | 132 439 | 158 927 | 15 | 1 367 000 | 1 | 14 | |
| EM | 195 000 | 559 123 | 670 947 | 13 | 5 276 000 | 0 | 12 | |

* anslag basert på lignende verdier fra kilde [7]

