

Emma Dyvesveen Myrbekk

Verifisering av kostnadsbesparelser oppnådd ved bruk av kunstig intelligens for optimalisert regulering av oppvarming ved Halsan skole

Masteroppgave i Energi og miljø

Veileder: Vojislav Novakovic

Medveileder: Marko Masic

Juni 2023



NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Emma Dyvesveen Myrbekk

Verifisering av kostnadsbesparelser oppnådd ved bruk av kunstig intelligens for optimalisert regulering av oppvarming ved Halsan skole

Masteroppgave i Energi og miljø
Veileder: Vojislav Novakovic
Medveileder: Marko Masic
Juni 2023

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



Kunnskap for en bedre verden

Forord

Masteroppgaven er skrevet ved institutt for energi- og prosessteknikk ved NTNU Trondheim, og krediteres med 30 studiepoeng. Oppgaven er det avsluttende arbeidet ved sivilingeniørprogrammet Energi og miljø. Hovedmålet ved oppgaven er å verifisere energitiltak basert på kunstig intelligens gjort ved Halsan skole i Levanger kommune. Arbeidet er en videreføring av og tar utgangspunkt i fordypningsprosjektet, med samme tema, skrevet høsten 2022.

Takk til veileder Vojislav Novakovic ved NTNU for veiledning angående utforming og gjennomføring av masteroppgaven. Også takk til Laurent Georges ved NTNU for gode svar på spørsmål angående IDA-ICE. Takk til medveileder Marko Masic ved ISI-Tech for innføring i optimaliseringssystemet ved Halsan skole, samt mange nyttige faglige diskusjoner. Videre ønsker jeg å takke Odd Anders Alstand i Levanger kommune for omfattende informasjon om Halsan skole fra byggeår og gode svar på spørsmål angående driften av skolen. Jeg ønsker også å takke elever og ansatte ved Halsan skole som har latt oss befare skolen i skoletiden.

Avslutningsvis ønsker jeg å takke alle medstudenter som har bidratt til en veldig fin studietid, og venner og familie for støtte gjennom studieløpet og arbeidet med masteroppgaven.

Sammendrag

I begynnelsen av 2019 ble Halsan barneskole i Levanger kommune oppgradert med nye ventilasjons-, varme- og lysanlegg. Som en del av oppgraderingsprosjektet ble det implementert et optimaliseringssystem for regulering av romoppvarming og ventilasjon basert på kunstig intelligens. Forventet energibruk, beregnet på grunnlag av værprognoser, vil bestemme den optimale driften av varme- og ventilasjonssystemer basert på variasjoner i strømprisen og med mål om å redusere maksimalt effektuttak. Optimaliseringssystemets hovedmål er å redusere skolens strøm- og nettleiekostnader. I denne rapporten har delen av systemet som forsøker å redusere strømkostnadene knyttet til romoppvarming blitt undersøkt. Optimaliseringssystemet tilpasser skolens settpunktstemperatur slik at det brukes mer elektrisitet til oppvarming av bygget når strømprisen er lav, og mindre når strømprisen er høy. Her benyttes akkumulering av varmen i den termiske massen i bygget for å oppnå besparelsen. Optimaliseringssystemet benytter kunstig intelligens i sine beregninger. Det er bygningsautomatiseringsselskapet ISI-Tech fra Levanger som har levert systemet som optimaliserer reguleringen.

Effekten av optimaliseringssystemet har imidlertid ikke blitt dokumentert i praksis. Den er egentlig ikke mulig å dokumentere rent fysisk heller, fordi bygget som optimaliseringssystemet anvendes på nå har ikke eksistert i dagens form før oppgraderingen av det opprinnelige bygget ble gjennomført. I denne rapporten presenteres et konsept for verifisering av økonomiske besparelser basert på simulering med simuleringsverktøyet IDA-ICE. Konseptet benytter en simuleringsmodell av skolen, utviklet ved hjelp av tilgjengelige data og målinger, med og uten bruk av optimaliseringssystemet. Modellen er kalibrert ved bruk av avleste data fra skolen etter oppgradering. I denne rapporten vil endringene i strømkostnader undersøkes.

I fordypningsprosjektet ble innledende arbeid gjennomført. En litteraturstudie knyttet til bruk av kunstig intelligens for regulering av inneklima og energibruk i bygninger ble gjennomført. Konseptet for analyse av energiytelse og verifisering av økonomiske besparelser ble utviklet. Videre ble informasjon om skolebygget samlet inn og undersøkt for å danne grunnlaget for simuleringsmodellen av skolen i IDA-ICE. Levanger kommune har bidratt med informasjon om skolebygget fra byggeår. Målinger fra skolens SD-anlegg er levert av ISI-Tech. Simuleringsmodellen ble utviklet med de tilgjengelige dataene. Deretter ble den forsøkt kalibrert, men det ble oppdaget en rekke avvik i målingene fra SD-anlegget som må oppklares før kalibreringen kan fortsette.

I masteroppgaven ble avvikene oppdaget i fordypningsprosjektet oppklart slik at simuleringsmodellen kunne kalibreres. Videre har analysen av energiytelsen, den økonomiske verifiseringen og en økonomisk optimalisering blitt gjennomført. For å analysere ytelsen til optimaliseringssystemet, samt undersøke eventuelle forbedringer og utvidelsesmuligheter, har en rekke faktorer blitt undersøkt; ulike metoder for akkumulering av varme, ulike variasjoner av strømprisen og ulik termisk masse.

Gjennom analyse av skolebyggets energiytelse er viktige observasjoner knyttet til akkumulering av varme i konstruksjonen gjort, herunder påvirkningen til sesongvariasjoner og ulike oppvarmingsenheter. Den økonomiske verifiseringen viste at strømkostnadene er redusert med anslagsvis 5-10 %, samtidig som et akseptabelt termisk

inn klima er ivaretatt. I den økonomiske optimaliseringen kom det frem at når døgnvariasjonene i strømprisen er store lønner det seg å akkumulere mye varme i periodene med lav strømpris, i form av en høy akkumuleringstemperatur og lang akkumuleringsperiode. Byggets termiske masse er også vurdert. Det kommer frem at byggets lave termiske masse ikke setter begrensinger for effektiv akkumulering av varme over korte tidsperioder.

Abstract

At the beginning of 2019, Halsan primary school in Levanger municipality in Norway was upgraded with new ventilation, heating and lighting systems. As a part of the upgrade, an optimization system for ventilation and space heating control based on artificial intelligence was implemented. Expected energy use, calculated based on the weather forecast, will determine the optimal operation of heating and ventilation systems based on the variations in electricity price and with the aim of reducing peak power. The main goal of the optimization system is to reduce the electricity and grid cost. In this report, the part of the optimization system that aims to reduce the electricity costs of space heating is investigated. The optimization system adapts the school's set point temperature so that more electricity is used to heat the building when the electricity price is low, and less when the electricity price is high. Here, accumulation of the heat in the thermal mass of the building is used to achieve the savings. The optimization system, based on artificial intelligence, is delivered by ISI-Tech, a building automation company from Levanger.

However, the effect of the upgrade has not been documented. It is not really possible to document it physically either, since the building where the optimization system is applied did not exist in its current form before the upgrade of the original building was carried out. This report presents a concept for verifying the financial savings. The concept is based on creating a simulation model of the school with and without the optimization system using the simulation tool IDA-ICE. The model will be created with the available data about the building. Then, the model must be calibrated; this will be done using measured data from the school after the upgrade.

In the project report, preliminary work was carried out. A literature study related to the use of artificial intelligence in control of indoor climate and energy use in buildings was carried out. The concept of energy performance analysis and verification of financial savings was developed. Furthermore, information about the school building was collected and examined to form the basis of the simulation model of Halsan primary school in IDA-ICE. Levanger municipality has contributed with information about the building from the years of construction. Measurements from the building management system has been provided by ISI-Tech. The simulation model was developed with the available data. An attempt was then made to calibrate the model, however several deviations were discovered in the measurements from the building management system. These deviations had to be cleared up before the calibration can continue.

In this master thesis, the deviations discovered in the project work were cleared up so that the model could be calibrated. Furthermore, the analysis of the energy performance and the economic verification have been carried out. In order to analyze the optimization system as well as investigate possible improvements and expansion possibilities, several factors have been investigated; different methods of accumulation of heat, different variations of the electricity price and different thermal mass.

Through the analysis of the energy performance of Halsan primary school, important observations related to accumulation of heat in the construction have been made, including the influence of seasonal variations

and different heating units. The economic verification showed that the electricity costs have been reduced by an estimated 5-10 %, while an acceptable thermal indoor climate has been maintained. In the economic optimization, it emerged that when the daily variations of the electricity prices are high, a large amount of heat should be accumulated while the prices are low, in the form of a high accumulation temperature and long accumulation period. The thermal mass of the building is also assessed. It appears that the low thermal mass of the building does not limit efficient accumulation of heat over short periods.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iv
Figurer	x
Tabeller	xiii
Forkortelser	xiii
Symboler	xv
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Mål og metode	1
1.3 Disposisjon	1
2 Litteraturstudie	3
2.1 Tingenes internett	3
2.2 Kunstig intelligens	3
2.3 KI for regulering av inneklime og energibruk i bygninger	5
2.3.1 Termisk komfort	6
2.3.2 Predikativ regulering og termisk komfort	7
2.3.3 Beleggsdeteksjon	8
2.3.4 Lastprognose	9
2.3.5 Energieffektivisering	10
2.3.6 Overvåking av luftkvalitet	11
2.3.7 Feilsøking	11
2.4 Brukerbestemte begrensinger	12
2.4.1 Lønnsomhet	12
2.4.2 Personvern og sikkerhet	12
2.5 Tekniske begrensinger	12
2.5.1 Interoperabilitet	13
2.5.2 Tilgang på data	13
2.5.3 Datakvalitet	13
2.5.4 Datalagring	13
2.5.5 Pålitelighet	14
2.6 Konklusjoner om bruk av KI innenfor regulering av energibruk og inneklime	14

3	Teori	15
3.1	Halsan skole	15
3.1.1	Bygningskroppen	15
3.1.2	Oppvarmingsenheter	15
3.1.3	Ventilasjonsanlegg	16
3.1.4	Optimaliseringssystemet	16
3.2	Simuleringsprogram	18
3.2.1	SIMIEN	18
3.2.2	EnergyPlus	18
3.2.3	IDA-ICE	19
3.2.4	ESP-r	19
3.2.5	TRNSYS	20
3.2.6	Valg av simuleringsprogram	20
3.3	Termisk komfort	20
3.3.1	Adaptiv termisk komfort	21
3.3.2	Operativ temperatur	22
3.4	Interne laster	22
3.4.1	Metabolsk rate	22
3.4.2	CO ₂ generert av personer	23
3.4.3	Tidsinvariant massebalanse	23
3.5	Regulering	23
3.5.1	Regulering i åpen sløyfe	24
3.5.2	Regulering i lukket sløyfe	24
3.5.3	Foroverkoblet regulering i lukket sløyfe	25
3.5.4	Kaskaderegulering i lukket sløyfe	26
3.5.5	Regulering i åpen sløyfe med modelloppfølging	26
3.6	Termisk masse	27
3.6.1	Tidskonstant og dødtid	29
3.6.2	Gulvvarme	30
3.6.3	Panelovn	30
3.7	Strømkostnader	30
3.7.1	Strømprisen	30
3.7.2	Nettleie	31
3.8	Fleksibilitet på etterspørselssiden	31
4	Metode	33
4.1	Konsept for verifisering av besparelser	33
4.1.1	Energimessig ytelse	33
4.1.2	Økonomiske besparelser	34

4.2	Simulering	35
4.2.1	Datagrunnlag	35
4.2.2	Beliggenhet og orientering	35
4.2.3	Rom og soner	36
4.2.4	Bygningskropp	39
4.2.5	Solskjerming	40
4.2.6	Værdata	41
4.2.7	SD-anlegget	41
4.2.8	Interne laster	42
4.2.9	Ventilasjon	42
4.2.10	Lokal romoppvarming	43
4.2.11	Temperatursettpunkt	44
4.3	Kalibrering	44
4.3.1	Iterasjon 1	46
4.3.2	Iterasjon 2	46
4.3.3	Iterasjon 3	50
4.3.4	Iterasjon 4	50
4.3.5	Iterasjon 5	51
4.4	Energiytelse	51
4.5	Økonomisk verifisering	52
4.6	Økonomisk optimalisering	52
4.6.1	Akkumuleringstemperatur- og lengde	52
4.6.2	Økt termisk masse	53
5	Resultater	54
5.1	Kalibrering	54
5.2	Variasjoner av SPT	55
5.2.1	Sesongvariasjoner	56
5.3	Akkumuleringsperiode variasjoner	61
5.3.1	Starttidspunkt	61
5.3.2	Akkumuleringstemperatur	62
5.3.3	Kombinasjoner av starttidspunkt og akkumuleringstemperatur	64
5.4	Økonomisk verifisering	65
5.4.1	Klasserom 2	66
5.4.2	Klasserom 5	68
5.4.3	Termisk komfort	70
5.5	Økonomisk optimalisering	71
5.5.1	Akkumuleringstemperatur og -lengde	71
5.5.2	Termisk masse	74

6	Diskusjon	79
6.1	Kalibrering	79
6.1.1	Valg av rom	79
6.1.2	Valg av periode	80
6.1.3	Resultatene av kalibreringen	80
6.1.4	Vurdering av kalibreringen	81
6.2	Energiytelse	82
6.2.1	Ulike SPT-kurver	82
6.2.2	Sammenligning av rommene	82
6.2.3	Sesongvariasjoner	83
6.3	Variasjoner av akkumuleringsperioden	84
6.3.1	Starttidspunkt	84
6.3.2	Akkumuleringstemperatur	85
6.3.3	Kombinasjoner av starttidspunkt og akkumuleringstemperatur	86
6.4	Økonomisk verifisering	87
6.4.1	Vurdering av verifiseringsresultatene	87
6.4.2	Termisk komfort i verifiseringsperioden	88
6.4.3	Årlige reduksjoner i strømkostnader ved Halsan skole	89
6.4.4	Vurdering av verifiseringskonseptet	90
6.5	Økonomisk optimalisering	91
6.5.1	Akkumuleringstemperatur- og lengde	91
6.5.2	Termisk masse	92
6.6	Potensiale for videre bruk	94
6.6.1	Tilpasningsdyktighet	94
6.6.2	Begrensninger	95
6.6.3	Samfunnsnytte	96
7	Konklusjon	97
8	Videre arbeid	98

Figurer

2.1	KI-læringsprosesser.	4
3.1	Bilder av Halsan skole.	15
3.2	Målt og predikert energibruk Halsan skole uke 12 2023.	17
3.3	Ønsket romtemperatur og strømpriser uke 12 2023.	17
3.4	Overflateareal barn [54].	22
3.5	Visualisering av CO_2 -balansen i et rom.	23
3.6	Regulering i åpen sløyfe, blokkdiagram.	24
3.7	Regulering i lukket sløyfe med tilbakekobling, blokkdiagram.	24
3.8	Illustrering av ulike reguleringsprinsipper [59].	25
3.9	Foroverkoblet regulering i lukket sløyfe, blokkdiagram.	26
3.10	Kaskaderedulering i lukket sløyfe, blokkdiagram.	26
3.11	Regulering i åpen sløyfe med modelloppfølging, blokkdiagram.	27
3.12	Ulike materials volumeteriske varmekapasitet, C_v	28
3.13	Romtemperatur og utetemperatur i bygg med ulik termisk masse [62].	28
3.14	Typisk sprangresponsskurve [64].	29
3.15	Strømpris sone NO3 uten MVA.	31
4.1	Avgrensingen til simuleringen.	33
4.2	Visualisering virkelig bygg versus simuleringmodeller.	34
4.3	Plantegning 1. etasje i 1987-fløyen.	35
4.4	Orientering i Google Maps [36] og IDA-ICE med skyggende elementer.	36
4.5	Bilder av takhøyden. T.v. Bibliotek (77), døra til Helsesøster (65) t.h. i bildet. T.h. Klasserom (63).	36
4.6	Ventilasjonen i rommene i 1987-fløyen.	37
4.7	Rominndelingen implementert i IDA-ICE.	37
4.8	Plantegninger loftsetasje og underetasjen i 1987-fløyen.	38
4.9	Basismodellen i 3D i IDA-ICE.	38
4.10	Flytskjemaet beskriver metoden for kalibrering.	45
4.11	Variasjoner i SPT januar 2022.	45
4.12	CO_2 -konsentrasjon januar 2022 klasserom 5.	48
4.13	Ulike CO_2 -grenseverdier for beleggdeteksjon.	48
4.14	Beleggsplan klasserom 5 implementert i IDA-ICE.	49
4.15	Timeplaner interne laster og ventilasjon.	50
4.16	Egendefinert regulering av panelovner i rom med gulvvarme og panelovner.	51
4.17	Regulering av panelovner og varmekabler med kilde-fil.	52
5.1	Utendørstemperaturen i kalibreringsperioden.	54
5.2	Resultat av kalibrering klasserom 2.	55
5.3	Resultat av kalibrering klasserom 5.	55

5.4	Utendørstemperaturen i de tre undersøkte periodene.	56
5.5	Ulike SPT-kurver, klasserom 2, januar.	57
5.6	Ulike SPT-kurver, klasserom 2, april.	57
5.7	Ulike SPT-kurver, klasserom 2, desember.	58
5.8	Ulike SPT-kurver, klasserom 5, januar.	58
5.9	Ulike SPT-kurver, klasserom 5, april.	59
5.10	Ulike SPT-kurver, klasserom 5, desember.	59
5.11	Energibruk med og uten akkumulering, klasserom 2.	60
5.12	Energibruk med og uten akkumulering, klasserom 5.	60
5.13	Resultat av ulike lengder på akkumuleringsperioden, klasserom 2.	61
5.14	Resultat av ulike lengder på akkumuleringsperioden, klasserom 5.	62
5.15	Overflatetemperaturer ved ulike starttidspunkt for akkumuleringsperioden, klasserom 2.	62
5.16	Resultat av ulike akkumuleringstemperaturer, klasserom 2.	63
5.17	Resultat av ulike akkumuleringstemperaturer, klasserom 5.	63
5.18	Overflatetemperatur ved ulike akkumuleringstemperaturer klasserom 2.	64
5.19	Resultat variasjoner av akkumuleringsperioden, klasserom 2.	64
5.20	Resultat variasjoner av akkumuleringsperioden, klasserom 5.	65
5.21	Strømprisen i verifiseringsperioden.	66
5.22	Utendørstemperaturen i verifiseringsperioden.	66
5.23	Økonomisk verifisering klasserom 2 14.02-10.04.23, romtemperatur og effektbruk.	67
5.24	Økonomisk verifisering klasserom 2 14.02-10.04.23, strømkostnad.	67
5.25	Økonomisk verifisering klasserom 2 12.03-14.03.23, romtemperatur, effektbruk og strømkostnad.	68
5.26	Økonomisk verifisering klasserom 5 14.02-10.04.23, romtemperatur og effektbruk.	69
5.27	Økonomisk verifisering klasserom 5 14.02-10.04.23, strømkostnad.	69
5.28	Økonomisk verifisering klasserom 5 12.03-14.03.23, romtemperatur, effektbruk og strømkostnad.	70
5.29	Termisk komfort (EN-15251, uten kjøling) klasserom 2.	71
5.30	Termisk komfort (EN-15251, uten kjøling) klasserom 5.	71
5.31	Strømkurvene brukt i den økonomiske optimaliseringen.	72
5.32	Resultater økonomisk optimalisering klasserom 2, januar.	72
5.33	Resultater økonomisk optimalisering klasserom 2, april.	73
5.34	Resultater økonomisk optimalisering klasserom 5, januar.	73
5.35	Resultater økonomisk optimalisering klasserom 5, april.	74
5.36	Resultater økonomisk optimalisering, variasjon termisk masse, klasserom 2, januar.	75
5.37	Resultater økonomisk optimalisering, variasjon termisk masse, klasserom 2, april.	75
5.38	Energibalanse 26°C 16:00, original konstruksjon, klasserom 2, januar.	76
5.39	Energibalanse 26°C 16:00, klasserom 2, økt termisk masse, januar	76
5.40	Romtemperatur og effektbruk med økt termisk masse, klasserom 2, april.	77
5.41	Resultater økonomisk optimalisering, variasjon termisk masse, klasserom 5, januar	77
5.42	Resultater økonomisk optimalisering, variasjon termisk masse, klasserom 5, april.	78

6.1	Romgeometri klasserom 2.	80
6.2	Romgeometri klasserom 5.	80

Tabeller

2.1	Algoritmene presentert i 2.3.	5
2.2	Metodene sammenlignet i Huchuk mfl. [19].	9
3.1	Temperaturkategorier NS- EN 16798-1:2019.	22
3.2	Egenskapener til de forhåndsdefinerte byggematerialene i IDA-ICE.	29
4.1	Avvik fra plantegninger.	39
4.2	Innvendige konstruksjoner.	39
4.3	Utvendige konstruksjoner.	40
4.4	Konstruksjonsvariabler.	40
4.5	Solskjerming.	41
4.6	Parameterne i klima-filen.	41
4.7	Data hentet fra SD-anlegget.	42
4.8	Inndata til ventilasjonsaggregatene.	42
4.9	Regulering av tilluftsmengde til rommene med VAV.	43
4.10	Lokale oppvarmingsenheter. *Varmepanel i tak.	44
4.11	Oppsummering av iterasjonene i kalibreringen.	46
4.12	Variabler i massebalansen.	47
4.13	Konstruksjoner med økt termisk masse.	53
5.1	Resultater økonomisk verifisering klasserom 2.	68
5.2	Resultater økonomisk verifisering klasserom 5.	70

Forkortelser

AANN	Auto-Associative Neural Network
ANN	Artificial Neural Network
BA	Bygningsautomatisering
BAS	Bygningsautomatiseringssystemer
BS	Bygningssimulering
CAD	Computer Aided Design
CAV	Constant Air Volume (Konstante luftmengder)
CNN	Convolutional Neural Network
D	Derivat
DDPG	Deep Deterministic Policy Gradients
DFNN	Deep Feedforward Neural Network
DRNN	Deep Recurrent Neural Network
GA	Generisk algoritme
GB	Gradient Boosting
I	Integral
IDA-ICE	IDA Indoor Climate and Energy
IDF	Input Data File
IFC	Industry Foundation Classes
IoT	Internet of Things (Tingenes internett)
KI	Kunstig intelligens
k-NN	k-Nearest-Neighbors
LogR	Logistic Regression
LR	Linear Regression
LSTM	Long Short Term Memory
ML	Maskinl�ring
MLP	Multilayer Perceptron
MVA	Merverdiavgift
NN	Neural Network
P	proporsjonal
R-CNN	Region based Convolutional Neural Network
RF	Random Forest
RNN	Recurrent Neural Network
SD	Sentral driftskontroll
SFP	Specific Fan Power (Spesifikk vifteeffekt)
SPT	Settpunktstemperatur
SVM	Support Vector Machine
SVR	Support Vector Regression
VAV	Variable Air Volume (Behovstyrte luftmengder)

Symboler

c_r	Romkonsentrasjon	$[\mu\text{g}/\text{m}^3] / [\text{ppm}]$
c_e	Avtrekkskonsentrasjonen	$[\mu\text{g}/\text{m}^3] / [\text{ppm}]$
c_{ref}	Ønsket romkonsentrasjon	$[\mu\text{g}/\text{m}^3] / [\text{ppm}]$
c_s	Tilluftskonsentrasjonen	$[\mu\text{g}/\text{m}^3] / [\text{ppm}]$
C_v	Volumetrisk varmekapasitet	$[\text{J}/\text{m}^3\text{K}]$
C_m	Spesifikk varmekapasitet	$[\text{J}/\text{kgK}]$
C	Varmekapasitet	$[\text{J}/\text{K}]$
d	Tetthet	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
e	Avvikssignal	
k	Termisk konduktivitet	$[\text{W}/\text{mK}]$
K_p	Forsterkning	
\dot{M}	Styrken til en forurensende kilde	$[\mu\text{g}/\text{h}]$
q	Varme	$[\text{J}]$
Q	Varmeeffekt	$[\text{W}]$
t_d	Dødtid	
t_s	Tidskonstant	
T_i	Integraltid	
T_l	Lufttemperatur	$[^\circ\text{C}]$
T_{ms}	Middelstråletemperatur	$[^\circ\text{C}]$
T_o	Operativ temperatur	$[^\circ\text{C}]$
u	Pådrag	
v	Forstyrrelse	
\dot{V}	Ventilasjonsraten	$[\text{m}^3/\text{h}]$
y	Utgangssignal	
y_0	Ønsket utgangssignal / Referanseverdi	

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Halsan barneskole i Levanger kommune ble i begynnelsen av 2019 oppgradert med nye ventilasjons-, varme- og lysanlegg. Målet med oppgraderingsprosjektet er å regulere innetemperatur og ventilasjon ved hjelp av kunstig intelligens (KI) og uten påvirkning fra driftspersonell. Styring av effektuttaket skal også være basert på bruk av KI. Forventet energibruk beregnet på grunnlag av værprognoser vil bestemme den optimale driften av varme- og ventilasjonssystemer. Driften optimaliseres med mål om størst mulig økonomiske besparelser, som skal oppnås ved å utnytte strømprisvariasjoner og ved å redusere maksimalt effektuttak. Bygningsautomatisering (BA)-selskapet ISI-Tech fra Levanger har levert systemet som optimaliserer reguleringen.

1.2 Mål og metode

Mål for oppgaven er å undersøke energiytelse og verifisere økonomiske besparelser gjennom sammenligning av energibruk før og etter oppgradering. Oppgraderingen av skolen besto av installasjon av et nytt ventilasjonsanlegg i den eldste delen av skolen, samt implementering av optimaliseringssystemet for regulering av ventilasjon og romoppvarming i hele skolen. Rapportens mål er å analysere energiytelsen og økonomisk verifisere optimaliseringssystemets regulering av romoppvarming. Fordi flere oppgraderinger er gjennomført har det ingen hensikt å sammenligne målinger fra det gamle og nye bygget, derfor vil en simuleringsmodell av Halsan skole utvikles og benyttes for å sammenligne energi- og effektbruk med og uten optimaliseringssystemet.

Rapporten starter med en presentasjon av oppgraderingsprosjektet og hvordan KI brukes for regulering av romtemperatur og effektuttak. Videre skal resultater fra en litteraturstudie angående bruk av KI for regulering av inneklima og energibruk i bygninger presenteres.

Deretter presenteres et konsept for verifisering av økonomiske besparelser. Simuleringsprogrammet IDA Indoor Climate and Energy (IDA-ICE) skal benyttes for å utvikle simuleringsmodellen av Halsan skole. Modellen skal utvikles med tilgjengelig informasjonen om bygget, samt antagelser basert på byggeår, videre må modellen kalibreres for å gjøre ytelsen mest mulig lik ytelsen til det faktiske bygget. Det er tilgang på en stor mengde data om driften av Halsan skole etter oppgraderingen, disse dataene vil benyttes for å kalibrere modellen.

Simuleringsmodellen skal brukes for å sammenligne byggets ytelse med og uten optimaliseringssystemet. Her skal det gjøres en vurdering rundt hvilke data som vil gi det beste grunnlaget for sammenligningen – om det er hensiktsmessig å bruke de avleste dataene i sammenligningen. Dette vil være grunnlaget for å analysere energiytelsen til bygget og å verifisere økonomiske besparelser.

1.3 Disposisjon

Kapittel 1 introduserer bakgrunnen for masteroppgaven, samt mål og metode for rapporten. I kapittel 2 presenteres litteraturstudiet angående bruk av KI for regulering av inneklima og energibruk i bygninger. Kapittel

3 redegjør for den teoretiske bakgrunnen for oppgaven. Herunder, Halsan skole, optimaliseringsystemet, simuleringsprogram, termisk komfort, interne laster, regulering, termisk masse, strømkostnader og fleksibilitet på etterspørselsiden. I kapittel 4 er den overordnede metoden presentert. Dette inkluderer konsept for verifisering, utvikling og kalibrering av simuleringsmodellen, samt metode for gjennomføring av analyse av energiytelse, økonomisk verifisering og økonomisk optimalisering. I kapittel 5 presenteres resultatene av kalibreringen, energiytelse, økonomisk verifisering og økonomisk optimalisering. Kapittel 6 diskuterer resultatene presentert i kapittel 5. Kapittel 7 inneholder rapportens konklusjon og i kapittel 8 er grunnlaget for videre arbeid presentert.

2 Litteraturstudie

I dette kapitlet presenteres et litteraturstudie knyttet til bruk av kunstig intelligens for regulering av inneklima og energibruk i bygninger. Dette litteraturstudiet er gjennomført og hentet direkte fra fordypningsprosjektet [1]. Noen endringer er gjort for å forbedre studiet.

Dagens moderne bygg inneholder en rekke tekniske systemer som er nødvendige for byggenes funksjon. Alt fra innemiljøet til sikkerhetssystemer og intern transport av personell er i dag avhengig av tekniske systemer. Samlebegrepet bygningsautomatiseringssystemer (BAS) er systemer som sørger for overvåking, styring og regulering av de ulike tekniske systemene i et bygg. Sentraliserte BAS gir en mulighet til å se de ulike tekniske systemene i et bygg i sammenheng, og sammen operere de på en optimal måte med tanke på energieffektivitet og innemiljø. Sentral driftskontroll (SD)-anlegg er et samlebegrep for sentralisert BA basert på digital teknikk og digitalt utstyr. [2]

Med fokus på energibruk i bygninger og inneklima, handler de fleste tilfeller vedrørende styringen av de tekniske systemene om å nå to mål; høy energieffektivitet og et komfortabelt inneklima for brukerne. Det er ikke alltid begge målene kan oppfylles til det fulle, de må alltid avveies mot hverandre. Gjennom historien til BAS har det blitt utviklet en rekke metoder for å prøve å oppnå begge målene. Ofte har styringsmetodene blitt mer og mer avanserte. En av de siste metodene som har blitt tatt i bruk, og som fortsatt er under utvikling, er regulering ved hjelp av KI.

2.1 Tingenes internett

Tingenes internett, eller på engelsk, *Internet of Things*, (IoT) er en betegnelse på et IKT-system hvor et stort antall fysiske enheter, ved hjelp av internett, kommuniserer med hverandre. Disse enhetene kan for eksempel være overvåkingssystem, biler eller oppvarmingsenheter, som er utstyrt med forskjellige sensorer og kommunikasjonsutstyr.[3] Med IoT-teknologiens mulighet til økt informasjonsutveksling mellom de tekniske enhetene skapes en større mulighet til å optimalisere driften av bygningens tekniske systemer. En av metodene som kan brukes for å optimalisere driften er ved bruk av algoritmer som baserer seg på KI. KI-algoritmer krever generelt store mengder data som IoT-teknologien kan tilby.

2.2 Kunstig intelligens

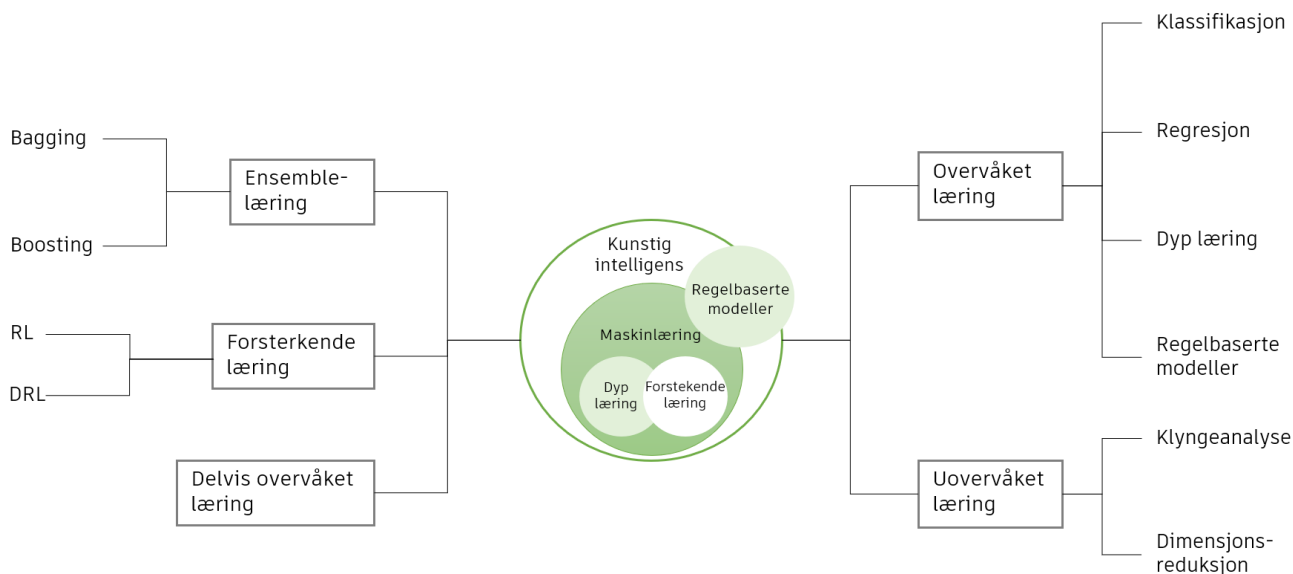
KI er informasjonsteknologi som er i stand til å regulere sin egen aktivitet. Det finnes flere typer KI. Grovt sett kan en dele KI inn i datadrevne modeller, også kalt maskinlæring (ML), og regelbaserte modeller, også kalt ekspertsystemer. Datadrevne modeller eller ML omhandler systemer som ikke kan noen ting når de startes, men som etter hvert lærer gjennom prøving og feiling. Ekspertsystemer eller regelbaserte systemer er hovedsakelig systemer som har en forhåndsdefinert oppførsel basert på en rekke regler. Disse systemene fungerer derfor i forutsigbare miljøer som er begrensede og regelbundet. [4]

Bruken av informasjonsteknologi, sensorer og målinger har økt i dagens BAS, i kombinasjon med større fokus

på lagring av disse dataene har dette åpnet for bruken av stordata-analyser. [5] Begrepet *stordata* brukes om digitale data, analysemetodikk og teknologi knyttet til datamengder som er så store, forskjellige og ustrukturert at man ikke kan bruke vanlige metoder for informasjonsuthenting. [6] Her kommer KI-teknologien inn i bildet. For å analysere disse store mengdene data kan KI-analyseverktøy benyttes. Med stordata får man en omfattende kilde til informasjon og mer målrettede analyser. Dette gjør at informerte datadrevne beslutninger kan tas i alle leddene i en byggeprosess. KI-teknologi ble en del av BAS i 2020, innenfor tidlig brannvarsling og prediksjoner av energietterspørsel. I perioden 2021-2026 antas det at stordataanalyse-markedet i energisektoren vil vokse med en sammenlagt årlig vekstrate på 11,28 %. [5]

KI-algoritmer krever opplæring før de tas i bruk, dette gjøres ved å formidle kunnskap til algoritmen. Opplæringen skjer gjennom en læringsprosess. Læringsprosessen starter ved at data hentes inn, kvaliteten på dataene vil være bestemmende for hvor nøyaktig modellen blir. Videre må dataene forberedes. Under forberedningen deles data vilkårlig inn i to deler som kalles *treningsdata* og *verifiseringsdata*. Neste steg er å trene modellen. Da lærer modellen fra treningsdataene ved å bruke de til å finne mønster og lage prediksjoner. Etter at modellen er ferdig trent må den evalueres, dette gjøres ved å gi den ny, ukjent data nemlig verifiseringsdataen. [7]

Læringsprosess-metoder kan primært deles inn i fire ulike former: overvåket læring, delvis overvåket læring, uovervåket læring og forsterkende læring. Figur 2.1 viser visualisering av sammenhengen mellom de ulike KI-læringsprosessene. [5]



Figur 2.1: KI-læringsprosesser.

Overvåket læring kan brukes når inndataene er godt organisert, selv om dette kan være vanskelig å oppnå i praksis. Metodene har generelt en høy ytelse. Innenfor *uovervåket læring* er det ingen organisering av dataene på forhånd. Oppgaven til disse algoritmene er å finne strukturer i og lære av dataene de blir gitt. Læringsfasen vil ofte være tyngre beregningsmessig og nøyaktigheten vil være lavere enn for overvåket læring. *Forsterket læring* brukes i situasjoner hvor KI-aktøren, med litt forsinkelse, får tilbakemeldinger på om valgene som har blitt tatt er riktige eller ikke. Metodene prøver å oppnå et gitt mål ved hjelp av prøving og feiling ved interaksjon med

omgivelsene. Det kan ofte være vanskelig å skille mellom de ulike kategoriene. Delvis overvåket læring er delvis overvåket og delvis uovervåket, altså er noe av dataen merket, mens store mengder er uorganisert. *Ensemble læringsmetoder* kombinerer flere ulike læringsmodeller for å oppnå en bedre predikativ ytelse.[5][8]

Tabell 2.1: *Algoritmene presentert i 2.3.*

Modell	Underkategori	Algoritme	
Overvåket læring	Klassifisering	Support Vector Machine (SVM)	
		Neural Network (NN)	
		Artificial Neural Network (ANN)	
		Multilayer Perseptron (MLP)	
	Regresjon	k-Nearest-Neighbors (k-NN)	
		Support Vector Regression (SVR)	
		Linear Regression (LR)	
		Logistic Regression (LogR)	
		Dyp læring	Convolutional Neural Network (CNN)
			Region based Convolutional Neural Network (R-CNN)
Recurrent Neural Network (RNN)			
Long Short Term Memory (LSTM)			
Uovervåket læring	Klyngeanalyse	Deep Feedforward Neural Network (DFNN)	
		Auto-Associative Neural Network (AANN)	
		Deep Recurrent Neural Network (DRNN)	
		k-means	
Forsterket læring	Dyp forsterket læring	Deep Deterministic Policy Gradients (DDPG)	
Ensemble metoder	Boosting	Random Forest (RF)	
		AdaBoost	
		Gradient Boosting (GB)	

2.3 KI for regulering av inneklima og energibruk i bygninger

Til nå har vi snakket om bruken av KI innenfor all form for bygningsautomatisering, men BAS er et bredt begrep. I følge Himeur mfl. har KI blitt brukt i systemer for anleggsledelse, prediksjon av energibruk, energi-effektivisering, predikativ regulering av termisk komfort, feildeteksjon og diagnostisering, overvåking av inendørs luftkvalitet, sikkerhet, beleggsprediksjoner og håndtering av vannforbruk [5]. Videre skal denne litteraturstudien sette søkelys på bruk av KI for regulering av inneklima og energibruk i bygninger. Under presenteres en rekke studier og tilfeller hvor KI har blitt brukt for regulering av energibruk i bygninger og inneklima. Eksemplene er grovt kategorisert basert på hva KI-algoritmer brukes til. I tabell 2.1 er algoritmene som presenteres videre i dette kapitlet kategorisert etter læringsmodell. Det overordnede målet i tilfellene beskrevet under er

enten å redusere energibruken eller å øke brukerkomfort, og i de fleste tilfellene kombineres de to målene.

2.3.1 Termisk komfort

Den enkleste måten å regulere innetemperatur på er en fast settpunkttemperatur (SPT). Samtidig som metoden er mye brukt, har den noen begrensinger. Hovedbegrensningen ligger i at brukeren manuelt må justere SPT i henhold til ytre påvirkninger. [9]. Forskjellige opplevelser om hva som er et godt termisk inneklima er også en kjent utfordring i ulike innemiljøer, som for eksempel i et kontorlandskap eller i et klasserom med mange personer med ulike preferanser, som gjør det vanskelig å bestemme en SPT. Et annet aspekt er brukernes evne til å tilpasse seg det termiske klimaet, det adaptive prinsippet. Det adaptive prinsippet går ut på at hvis det skjer en endring som fører til ubehag, vil folk ofte reagere på en måte som gjenoppretter deres komfort [10]. Et eksempel er at folk ofte aksepterer en lavere innetemperatur på vinterstid, når man er kledd for lavere utendørstemperaturer.

Med KI-teknologi kan en samle ulike personers inntrykk for å lage et termisk inneklima flest mulig personer er tilfreds med, og som tar hensyn til ytre påvirkninger i større grad. Videre kan reguleringsystemet lære sammenhengen mellom de ytre faktorene og brukerens oppfatning av en behagelig innendørstemperatur. Dette vil ikke bare sørge for et godt inneklima, men kan også redusere energibruken. [11]

Aparicio-Ruiz mfl. bruker en k-Nearest-Neighbors (k-NN) dynamisk adaptiv-komfort teknikk for å regulere SPT. Artikkelen presenterer en metode basert på teorien om adaptiv termisk komfort ved bruk av k-NN-metoden for å dynamisk analysere og forutsi temperaturen som sørger for høyest brukerkomfort. Informasjon om brukernes komfort er samlet inn gjennom undersøkelser. Resultatene fra undersøkelsene er data-grunlaget for algoritmen. Algoritmens ytelse er derfor avhengig av antall svar på undersøkelsene. Det konkluderes med at dette er en god metode for å lære området for termisk komfort i en bygning og dermed definere SPT for ventilasjon og romoppvarming. Resultatet viser at k-NN algoritmen, i større grad enn den tradisjonelle løsningen, basert på adaptiv komfort teorien, klarer å tilpasse seg mønstrene til termisk komfort-dataene. [9]

Typisk blir innstillingene til varme- og ventilasjonssystem vurdert kun basert på sesong for å ta hensyn til endringer i utendørsklima og antall personer til stede. Brukerne har ofte ikke direkte påvirkning på innstillingene til varme- og ventilasjonssystemet og brukernes preferanser kan ofte være dynamiske og endre seg raskt. Dette kan føre til at systemet bruker unødvendig mye energi fordi det til tider varmer eller kjøler mer enn nødvendig. Dersom brukerne i større grad kan påvirke sitt eget inneklima, kan energibruken, i perioder, reduseres. Ifølge Hesse mfl. [12] kan ventilasjon styrt av etterspørsel føre til en reduksjon i energibruken på 70 %.

Carreira mfl. presenterer et system som sporer brukernes preferanser, lærer fra de og automatisk styrer varme og ventilasjon. Målet med reguleringsystemet er å redusere energibruken, uten at dette går utover brukerens komfort. Først registreres det hvor mange personer som er tilstede i rommet. Brukerne sender så inn tilbakemelding på deres komfort via deres mobilenheter. De kan også velge alternativer som reduserer energibruken, og som da til en viss grad reduserer komforten. Reguleringsystemet består av to algoritmer; en SPT-algoritme og en læringsalgoritme. SPT-algoritmen regner ut en passende SPT basert på brukerens tilbakemeldinger, algoritmen

retter seg etter majoritetens tilbakemelding, og blir ikke påvirket av individuelle stemmer. Læringsalgoritmen lærer seg brukernes oppførsel og kan med dette forutsi en passende reguleringshandling. Læringsalgoritmen er en k-means algoritme, som klassifiserer enheter i grupper. Videre sender reguleringsystemet informasjon om ny SPT til varme- og ventilasjonsanlegget. [11]

Verifisering av resultatene i Carreira mfl. er gjort ved å simulere en forelesningssal i Lisboa i EnergyPlus. Base-case er et system med fast settpunkttemperatur (20-24 °C). Resultatene viser at SPT-algoritmen gir lavere energibruk, og noe lavere komfortnivå enn base-case scenariet, mens læringsalgoritmen reduserer både energibruken og komfortraten ytterligere. Begge algoritmene sørger for en betraktelig reduksjon i energibruk, samtidig som komfortnivået holdes innenfor et akseptabelt nivå. Et redusert komfortnivå skyldes også at studentene har fått valget om å prioritere energieffektivitet over komfort. [11]

2.3.2 Predikativ regulering og termisk komfort

Predikativ regulering handler om å regulere et system med utgangspunkt i både nåværende og fremtidig drift. Utfordringer knyttet til regulering av oppvarmingssystemer, som ikke-lineær dynamikk og tidsvarierende forstyrrelser, systemdynamikk og settpunkter, gjør predikativ regulering til en velegnet metode for regulering av disse systemene. [13] Dagens metoder for predikativ regulering av termisk komfort kan generelt deles inn i to kategorier; modellbaserte og læringsbaserte metoder. Modellbaserte metoder modellerer systemets dynamikk for å bestemme reguleringshandlingene. Metoden bruker forenklete matematiske modeller og data om miljøet. På grunn av alle de ulike faktorene som påvirker det termiske inneklimaet kan det være vanskelig å lage en detaljert nok modell som gjenspeiler det faktiske systemet. Det er også vanskelig å lage en generalisert reguleringsmetode som kan brukes for flere bygg da metodene alltid er designet for hvert enkelt bygningsmiljø. Læringsbaserte metoder utformer regulering ved å lære av interaksjoner med det regulerte miljøet. Dermed kan de læres opp til å fungere i ulike bygninger og de er ikke avhengige av detaljerte beskrivelser av miljøene. [14]

Gao mfl. [14] presenterer en sammensatt reguleringsmetode, *DeepComfort*. Først predikeres brukernes termiske komfort ved bruk av en Deep Deterministic Neural Network (DFNN)-algoritme. Deretter brukes en læringsbasert reguleringsmetode, Deep Deterministic Policy Gradients (DDPG), for læring av optimal regulering av termisk komfort. DeepComfort fokuserer på å redusere energibruket, samt forbedre den termiske komforten. Metoden ble testet ut gjennom simulering i TRNSYS og hver av de to algoritmene, den predikative og reguleringsmetoden, ble sammenlignet med andre baseline-algoritmer brukt i andre artikler. Resultatene viser at denne tilnærmingen kan både sørge for bedre prediksjon av termisk komfort, samt redusert energibruk og forbedret termisk komfort sammenlignet med baseline-tilnærmingene.

Mtibaa mfl. [15] presenterer en løsning hvor et modellbasert rammeverk, modell predikativ regulering (MPC), kombineres med en generisk algoritme (GA), et såkalt MPC-GA reguleringsystem. CAM-Long Short Term Memory (LSTM), som er en *neural nettverk oppmerksomhetsbasert*-modell, brukes for å predikere innendørs lufttemperatur. Med historiske data fra et stort antall sensorer kan løsninger med KI brukes for å komme over de modellbaserte reguleringsmetodenes problem med å oppnå gode nok modeller. For å løse reguleringsoptimali-

seringsproblemet ble det brukt en GA. Reguleringsoptimaliseringsproblemet har som mål å redusere energibruk, maksimal effekt og brukerubehag, innenfor et sett med begrensinger. Testingen av reguleringsmetoden ble utført i et 1000 m^2 stort varehus. Fordelen med denne metoden, kontra vanlig MPC, er at reguleringsløsningen kan brukes i flere tilfeller. Løsningen kan brukes til regulering av alle ventilasjonsanlegg med en takenhet. MPC-GA-løsningen ble sammenlignet med regelbasert regulering, som vanligvis brukes i ventilasjonsanlegg. MPC-GA reguleringen oppnår, sammenlignet med den regelbaserte reguleringen, en 50 % reduksjon i energibruk og 80 % reduksjon av termisk ubehag for brukerne.

2.3.3 Beleggsdeteksjon

Antall personer tilstede er en viktig del av behovsstyrt varme og ventilasjon, både for å redusere energibruk og økte komforten til brukerne. Hver enkelt bruker påvirker luftkvaliteten og temperaturen i rommet. Med personer tilstede i rommene stilles høyere krav til inneklimate, mens når rommet er tomt kan en sette i gang energibesparende tiltak, som reduksjon av tilluft og temperatur. Vanligvis brukes faste settpunkter for styring av enhetene. Ulempen med denne løsningen er at timeplanene for driften må stemme overens med når det er personer tilstede. Når dette ikke er tilfellet vil en få situasjoner hvor klimaanlegget jobber mer eller mindre enn hva det faktisk trenger, dette vil føre til henholdsvis høyere energibruk eller lavere brukerkomfort. [16] Forbedret beleggsdeteksjon for regulering av varme og ventilasjon kan være en effektiv måte å spare energi sammenlignet med investeringer i nye installasjoner [17]. KI kan bidra med å predikere og detektere rombelegget.

Sensorer og annet teknisk utstyr brukes for å hente ut beleggsdata, dette inkluderer; kamera, infrarøde sensorer, akustiske sensorer og CO_2 -sensorer [5]. Passive infrarøde sensorer er mye i bruk i dagens bygg, særlig for på/avstyring av lys. Ulempen til disse sensorene er at de ikke kan oppdage personer som er i ro og de er ikke i stand til å vite hvor mange personer som er tilstede. Det har blitt gjort noe forskning på akustiske sensorer, men for disse har en opplevd problemer med bakgrunnsstøy, og en har ikke mulighet til å registrere personer som ikke lager lyd. Videre blir også CO_2 -sensorer brukt, men problemet med denne løsningen er at antall personer ikke er den eneste faktoren som påvirker CO_2 -nivået i innelufta. [18] Videre presenteres bruk av andre typer teknisk utstyr og sensorer i kombinasjon med KI for beleggsdeteksjon.

Både Huang og Hao [18] og Tien mfl. [16] bruker kamera for å finne belegget i et rom. Huang og Hao bruker en Convolutional Neural Network (CNN)-modell for å predikere antall personer i et rom, samt deres posisjon, som er nyttig for styringen av tilluft til rommet. Alle klimaanlegg-enhetene ble utstyrt med Neural Network (NN)-algoritmer for smart tilpasning av driften til antall personer, deres posisjon og orientering. Modellen oppnådde høy nøyaktighet for deteksjon av mennesker (98 %), og høy, men noe lavere, nøyaktighet for deteksjon av personenes plassering og orientering. Tien mfl. bruker en modell basert på Region based Convolutional Neural Network (R-CNN) for deteksjon av brukernes aktivitet og bruk av teknisk utstyr. Modellen oppnådde 97,09 % nøyaktighet for deteksjon av personer. Den oppnådde også gode resultater for deteksjon av aktiviteten til brukerne og bruken av teknisk utstyr, dette tilsier at modellen vil være i god stand til å beregne interne laster. Begge disse løsningene gir bare informasjon om brukerne i nåtid. Et problem med begge disse løsningene er beskyttelse av privatliv.

Huchuk mfl. [19] sammenligner algoritmer for prognose av personbelastning i boliger ved bruk av termostatdata. Løsningen vil i større grad verne om brukernes privatliv da databehandlingen ikke er fjernstyrt, reguleringen skjer inne i selve termostaten. Studien bruker et datasett med 100 boliger med både infrarøde sensorer og termostater. Modellene i tabell 2.2, som er delt inn i tre forskjellige grupper, bruker termostat-dataene. Modellenes evne til å forutsi belegg sammenlignes med de faktiske dataene fra de infrarøde sensorene. Studien konkluderer med at en enkel Random Forest (RF) modell er noe bedre enn Logistic Regression (LogR) og Markov Model (MM), og mye bedre enn de enkle baseline-modellene, Hidden Markov Model (HMM) og Recurrent Neural Network (RNN).

Tabell 2.2: *Metodene sammenlignet i Huchuk mfl. [19].*

Gruppe	Modell
Enkle baseline-modeller	Forrige tilstand; Hyppigste tilstand i tidsperioden; Hyppigste tilstand
Standard klassifiseringsmodeller	LogR ; RF
Sekvensielle modeller	MM; HMM; RNN

Pesic mfl. [20] utnytter Bluetooth- og WIFI-signaler fra enheter for å predikere og analysere brukerinformasjon. Pesic mfl. ønsker å utnytte at personer ofte har med seg sine mobile enheter, som mobiltelefoner og datamaskiner. Løsningen reduserer behovet for å investere i dyrt overvåkingsutstyr som sensorer og kamera. Bluetooth og WIFI gjør det mulig å bestemme den eksakte posisjonen til enhetene, og dermed også enhetenes eier. En utfordring med løsningen er skillet mellom stasjonære og mobile enheter. Videre i artikkelen presenteres en metode for å forutsi binær tilstedeværelse over en lang tidshorison, altså om en person er tilstede eller ikke, ved bruk av LSTM. Løsningen har blitt testet ut i en boligblokk og det fremheves at det er vanskeligere å forutsi belegg i boligbygg på grunn av mer varierende handlingsmønster enn i kommersielle bygg.

2.3.4 Lastprognose

Å lage prognoser for energibruk er viktig for energifleksibiliteten på brukersiden. Med lastprognoser kan spillet mellom strømmettet og reguleringsstrategiene i bygningen forbedres for mer effektiv bruk av energi. Ved å forutsi fremtidig energibruk kan en sørge for en balanse mellom forsynings- og forbrukersiden, for økt stabilitet og sikkerhet i strømmettet. Videre kan økonomiske besparelser oppnås med utgangspunkt i strømprisene. Lastprognosemetodene bruker ofte historiske data for energibruk og været, samt værprognoser.

Typisk skilles det mellom 3 ulike metoder for å forutsi energibruk. En kan bruke detaljerte data med fysiske og termodynamiske lover. Denne metoden er avansert og tidkrevende. En annen mulighet er å bruke regelbaserte modeller. Disse kan være lite nøyaktige og fleksible. Videre kan ML brukes, hvor algoritmen, ved bruk av historiske data lærer seg sammenhengen mellom inn- og utdata. ML-metodene kan både være mer fleksible og mer effektive enn metodene nevnt over. [21]

Somu mfl. [21] presenterer en kCNN-LSTM algoritme som ved bruk av registeret data for energibruk gir nøyaktige energibrukprognoser. k, som indikerer klyngeanalyse, brukes for å forstå trender i energibruken. CNN brukes i dette tilfellet for å trekke ut komplekse funksjoner med ikke-lineære interaksjoner som påvirker bruken av energi. LSTM brukes for å håndtere langsiktige avhengigheter. Algoritmen ble testet og sammenlignet med en k-means algoritme ved bruk av sanntidsdata fra en fireetasjes bygning ved IIT-Bombay, India. Algoritmen ga nøyaktige prognoser på grunn av dens evne til å lære seg romlige- og tidsavhengigheter i forbruksmønsteret.

Moon mfl. [22] evaluerer og sammenligner to populære ML-metoder, Artificial Neural Network (ANN) og Support Vector Regression (SVR), for bruk til lastprognose for en kortere tidshorisont. Dette gjøres ved analyse av energibruket til grupper av campus-bygninger. Studien viser at ANN presterte bedre enn SVR i dette tilfellet. Særlig for undervisningsbyggene trekkes det frem at bruk av timeplaner og arbeidstimer, i tillegg til normaltid og værddata, ga gode resultater.

2.3.5 Energieffektivisering

Energibruken til en bygning kan variere mye og er avhengig av en rekke ulike faktorer; antall brukere, brukernes vaner, mengden teknisk utstyr, byggets utforming, materialer, type energikilde, etc. Påvirkningen til disse faktorene på den totale energieffektiviteten til bygget kan være vanskelig å forutse ved prosjekteringen og installeringen av de tekniske systemene. For å unngå sløsing av energi, samt opprettholde et komfortabelt innemiljø, er det viktig å kjenne byggets energibruksmønster, for å oppnå et energieffektivt bygg.

Al-Ali mfl. [23] presenterer et energistyringssystem som kan brukes av ulike interessenter; alt fra boligeiere til eiere av kommersielle bygninger og kommuner. Løsningen utnytter fordelene ved IoT og lar brukeren samhandle med bygningen(e)s tekniske systemer. Data fra de tekniske installasjonene og inneklima sendes til en sentralisert server som lagrer dataene og produserer rapporter og grafer som brukerne kan se gjennom en mobil-applikasjon. Rapportene og grafene sier noe om energieffektiviteten til systemet i nåtid, som er vanskelig å forutsi under prosjektering og installering av de tekniske systemene. Brukeren kan så samhandle med serveren. Brukeren bruker rapportene og grafene, som for eksempel kan vise energibruk eller estimert strømregning, for å fjernstyre systemene. Dette systemets formål er å motivere og hjelpe brukeren til å gjøre valg som øker energieffektiviteten.

Gevinsten ved å optimalisere driften av en enkelt komponent i et oppvarmings- eller ventilasjonssystem kan være stor. Vanligvis når en forsøker å optimalisere driften til slike systemer brukes fysiske modeller av systemet. Begrensingen ved en slik optimaliseringsmetode er at en må gjøre en rekke antagelser rundt systemets dynamikk og begrense seg til et sett med driftstilstander. I tillegg vil driftsforholdene til det aktuelle systemet endre seg gjennom dets livsløp. Med dagens moderne SD-anlegg og IoT kan en, istedenfor å bruke disse fysiske modellene, bruke ML-modeller for å optimalisere driften. Yu presenterer en måte for å optimalisere driften av en kjøleenhet for ventilasjonsluft ved bruk av historiske data fra en lokal værstasjon og SD-anlegget. En dyp læringsmodell (RNN-LSTM) brukes for å forutsi energibruk og kjølebehov, og for å løse optimaliseringsproblemet brukes en GA. Ved å optimalisere driften av kjøleenheten sparte en 10,8 % energi. [24]

2.3.6 Overvåking av luftkvalitet

God luftkvalitet er avgjørende for å skape et godt inneklima, og det har blitt funnet tydelige sammenhenger mellom økt CO_2 -konsentrasjon og reduksjon i produktivitet. Overvåkingssystemer kan ved hjelp av KI identifisere ulike inneklimaproblemer. For eksempel redusert luftkvalitet på grunn av byggeaktivitet eller vannskader. [5] Etter COVID-19 pandemien fikk overvåking av luftkvalitet økt oppmerksomhet, da det ble viktig å analysere og kontrollere innendørs luftkvalitet for å redusere smittefaren.

Mumtaz mfl. [25] presenterer en løsning som ikke bare overvåker luftkvaliteten, slik som mange andre eksisterende systemer, men løsningen skal predikere fremtidig luftkvalitet. Målet med løsningen er at den skal kunne brukes av personer i risikogruppen for COVID-19, slik at de kan se fremtidig luftkvalitet. Systemet baserer seg på IoT og ML, mer spesifikt NN og LSTM. Datagrunnlaget for trening og testing av systemet, som ble gjort i et forskningslaboratorium (IoT-lab), er målinger fra en IoT-node bestående av flere sensorer for 8 ulike forurensninger, samt omgivelsestemperatur og luftfuktighet. For å klassifisere de målte dataene ble flere ulike ML-algoritmer testet, men NN presterte klart best. LSTM ble brukt for prediksjon, og oppnådde gode resultater.

Som nevnt i Mumtaz mfl. finnes det mange ulike ML-algoritmer en kan bruke for predikering av luftkvalitet. Taheri mfl. [26] fokuserer på CO_2 -konsentrasjon og forsøker å finne den beste algoritmen for å predikere fremtidig CO_2 -konsentrasjon over ulike tidshorisonter. Modellene forsøker å ta hensyn til brukernes dynamiske og adaptive oppførsel. Algoritmene som ble testet ut var Support Vector Machine (SVM), AdaBoost, RF, Gradient Boosting (GB), LogR og Multilayer Perseptron (MLP). De ble testet i et campus-klasserom. MLP presterte best. Ved analyse av de dynamiske variasjonene i luftkvaliteten kunne driften av ventilasjonen optimaliseres, dette resulterte i at energibruken til vifta i ventilasjonsanlegget ble redusert med over 50 %.

ML er ikke bare egnet for prediksjon av luftkvalitet, ML-algoritmer kan også brukes for mer detaljert analyse av inneluften. Mad Saad mfl. [27] presenterer et system som forsøker å finne kilden til ulike forurensninger av inneluften. Studien oppnådde en 100 % klassifikasjonsrate for fem ulike forurensningskilder: uteluft, forbrenningsaktivitet, tilstedeværelse av kjemikalier, tilstedeværelse av dufter og tilstedeværelse av mat og drikkevarer. Løsningen klarer også å oppdage to kilder samtidig, men sliter når tre eller flere kilder påvirker innelufta samtidig. Slike analyser kan være nyttig da forurensningskildene kan påvirke brukerens helse og det er ikke alle kilder brukeren selv klarer å oppdage. Særlig i innemiljø med sårbare grupper, som på et sykehus, eller i miljø som er utsatt for forurensning, f.eks. innenfor industri, kan en løsning som dette være nyttig.

2.3.7 Feilsøking

Feil på de tekniske anleggene i en bygning kan føre til energitap og ekstra kostnader dersom feilen ikke blir rettet opp. Derfor er også feilsøking og diagnostisering på de tekniske anleggene viktig for energieffektiv drift av bygninger. På grunn av høy deteksjonsnøyaktighet har dyp lærings-algoritmer fått økt oppmerksomhet innenfor feilsøking og diagnostisering av oppvarmings- og ventilasjonsanlegg. Kjennetegnene til feilene i slike systemer er at de ofte er komplekse, usikre og tidsavhengige, og derfor brukes ofte Deep Recurrent Neural Networks (DRNN) fordi den er i stand til lære disse kjennetegnene. [28]

Taheri mfl. [28] undersøker sju ulike DRNN konfigurasjoner for å utføre feildiagnostisering på oppvarmings- og ventilasjonssystem. Den beste av disse konfigurasjonene, basert på presisjon og beregningstid, ble sammenlignet med RF og GB. DRNN-konfigurasjonen utkonkurrer begge disse med god margin.

En viktig forutsetning for optimal drift av en bygnings tekniske systemer er at måleutstyr og aktuatorer fungerer som tenkt, men dette er ikke alltid tilfellet. Dette problemet prøver Elnour mfl. [29] å finne en løsning på ved hjelp av Auto-Associative Neural Network (AANN). Metoden sørger for at data fra sensorer rettes opp i om det oppdages feil eller unøyaktigheter, reduserer målestøy og erstatter data fra sensorer som er utilgjengelige. I tillegg utfører algoritmen feildiagnostisering.

2.4 Brukerbestemte begrensinger

Selv om løsningene presentert over virker lovende og i sum kan føre til store globale energikutt, kan aspekter ved de begrense deres utbredelse. En forutsetning for at løsningene blir tatt i bruk er at de er attraktive, tilgjengelige og trygge for brukere og eierne av byggene å bruke.

2.4.1 Lønnsomhet

Et aspekt som må vurderes er lønnsomheten til systemene. Mange av de avanserte reguleringsmetodene presentert over krever smarte enheter, samt et stort antall sensorer som kan hente inn data. I tillegg skal styringssystemet installeres og tilpasses bygget. Dette utgjør en stor investeringskostnad som må veies opp mot besparelse av energikostnader og økt brukerkomfort. Gevinsten til disse systemene vil være avhengig av flere faktorer, blant annet omgivelser/sted og brukermønster.[30]

2.4.2 Personvern og sikkerhet

Ettersom mer og mer av BAS er koblet til internett har personvern og bevaring av sikkerhet blitt en større utfordring. IP-basert kommunikasjon benyttes mellom enhetene i BAS og mye av dataene fra disse enhetene lagres over lenger tid. [5] Personvernet er utsatt fordi BAS krever omfattende informasjon om handlingene og vanene til byggets brukere. Ikke alle systemene benytter like detaljert data, men i mange tilfeller vil større datamengder med høyest mulig nøyaktighet gi forbedret styring av byggets systemer. Huang og Hao [18] og Tien mfl. [16] benytter data som filmer personene i et rom for å tilpasse styring av ventilasjon og varme. I slike tilfeller må en veie mellom nytten av et nøyaktig reguleringsystem og beskyttelse av privatlivet til personene som blir filmet.

Økt tilknytning til internett kan også utgjøre en sikkerhetsrisiko. Uvedkommende kan ved hjelp av hacking få tilgang til kritisk informasjon om bygget og dets systemer. Og siden reguleringen av systemene også foregår over internett kan de fjernstyres av hvem som helst som får tilgang.

2.5 Tekniske begrensinger

I tillegg til brukerbestemte begrensinger, kan de tekniske løsningene og forutsetningene være begrensende for bruk av KI i BAS.

2.5.1 Interoperabilitet

For å utvikle effektive BAS er det en forutsetning at alle de tekniske enhetene og reguleringsystemene er i stand til å forstå hverandre og dele informasjon. Interoperabilitet er et IKT-systems evne til å dele informasjon og utveksle data. En forutsetning for god interoperabilitet er at de ulike teknologiene bruker samme språk og transmisjonsprotokoller. [31] Utviklerne av BAS bruker ofte egne protokoller og programvare som er utilgjengelig for tredjepart. Dette gjelder særlig for systemene som er under utvikling i dag som belager seg på IoT og KI. Det finnes foreløpig ingen standard kommunikasjonsprotokoller, men det finnes noen systemer som er såpass utbredt at de nærmer seg å være uoffisielle standarder, de to systemene med størst utbredelse er LonWorks og KNX. Bruken av disse standardene vil øke interoperabiliteten i nye, smarte BAS, men vil også utgjøre en investerings- og driftskostnad, og kan føre til integrasjonsbegrensinger.[5]

2.5.2 Tilgang på data

Flere av algoritmene presentert over, særlig de som bruker dyp læring, krever store mengder historiske data til trening for å kunne oppnå høy ytelse. I mange tilfeller vil ikke denne typen data være tilgjengelig. [5] Dette kan være tilfellet for nye bygninger som ikke har vært i drift enda, eller eldre bygg hvor et nytt reguleringsystem installeres og det ikke har blitt gjort målinger tidligere. Som tidligere nevnt, baserer bruken av KI i BAS seg mye på IoT-teknologi. I eksisterende bygg, med eldre tekniske installasjoner, vil installering av IoT-enheter for bruk til datainnsamling utgjøre en betydelig investeringskostnad.

Mangel på nok data trenger ikke kun å omhandle historisk data for trening. I flere tilfeller vil algoritmer være såpass avanserte at mengden data som hentes inn fra systemet i nåtid ikke er tilstrekkelig. Yu [24], som presenterer hvordan KI kan brukes for å optimere kjøling av ventilasjonsluft, trekker frem at i tilfeller hvor tilgangen på data er begrenset vil tradisjonelle algoritmer/modeller, samt kunnskap om installasjonene, være den riktige metoden for optimering av driften av systemet. Og i andre tilfeller vil modellering av individuelle komponenter være den beste løsningen.

2.5.3 Datakvalitet

En utfordring knyttet til innhenting av data fra en bygning, er høy nok kvalitet på dataene. Typiske problemer kan være støy, dupliserte data, inkonsistente data og manglende verdier. For å overkomme disse problemene kan KI-teknikker brukes i forhåndsbehandlingen av dataene. Dette øker imidlertid kompleksiteten til systemet og det beregningsmessige arbeidet økes. [5] En er også avhengig av at sensorer og annet måleutstyr som brukes til innhenting av data er tilstrekkelig kalibrert og fungerer. Ukalibrerte sensorer vil gi algoritmen et feilaktig inntrykk av bygget og de tekniske installasjonenes tilstand. Siden reguleringen av byggets tekniske systemer baserer seg på den målte tilstanden bygget er i, er det essensielt at dataene som hentes inn er riktige .

2.5.4 Datalagring

Algoritmer som krever store mengder historiske data for trening, samt algoritmer som i seg selv krever lagring av store mengder data under selve utregningen, fører til økt datalagring. I Mad Saad mfl. [27], hvor en KI-algoritme

brukes for å gjenkjenne kilder til luftforurensning, velges MLP over KNN fordi KNN krever stor lagringsplass. Dette er fordi KNN-algoritmen lagrer alle data den mottar. Større behov for lagring vil gå ut over lønnsomheten til det totale systemet.

Man kan også se på økt datalagring som et problem i et større bilde. Innen 2030 antas det at 8 % verdens energiforbruk vil gå til lagring av data i form av fysiske servere som krever energi [32]. Dette utgjør en stor belastning på klima. Om en ukritisk bruker lagringsintense metoder for regulering, uten å tenke gjennom kost-nytte effektene, vil dette kunne bidra til økning av den totale mengden lagret data i verden.

2.5.5 Pålitelighet

Påliteligheten til et system refererer til systemets kapasitet til å oppfylle dets oppgaver til enhver tid, uavhengig av omstendighetene. Påliteligheten til et system kan påvirkes av både utregninger basert på KI utført i skyen eller av IoT-enheter hvor KI benyttes. Påliteligheten til skytjenester har økt ved økt implementering av KI på grunn av de intelligente analysene KI kan utføre, som kan oppdage feil og mangler. Samtidig gjør avanserte algoritmer, basert på KI, at BAS blir mindre tilgjengelig for brukeren. Dermed vil det være vanskeligere å oppdage og/eller fikse feil som oppstår. [33] Når feil i BAS oppstår er det viktig å få løst de som tidlig som mulig, både for å unngå økt energibruk, men viktigst, sørge for at inneklimate er akseptabelt.

2.6 Konklusjoner om bruk av KI innenfor regulering av energibruk og inneklimate

I dette litteraturstudiet har det blitt presentert en rekke måter for hvordan bruke KI i BAS for økt energi-effektivitet og brukerkomfort. Løsningene presentert kan kategoriseres ut ifra KI-algortimene de benytter, samt hva de brukes til. Studiene presentert viser at det er mange ulike metoder som kan benyttes for å redusere bygningers energibruk og forbedre inneklimate, alt fra bedre regulering basert på informasjon om brukernes vaner til å effektivisere driften av en enkelt komponent. Generelt oppnår studiene presentert over gode resultater, hvor energibruken reduseres samtidig som brukerkomforten opprettholdes eller forbedres. Samtidig er det gjort få studier hvor disse systemene er installert i virkelige bygninger, med ordinært brukermønster over lang tid.

Bruk av KI innenfor regulering av energibruk og inneklimate kan også by på utfordringer som kan begrense deres utbredelse, både brukerbestemte og tekniske begrensninger. Blant annet personvern, lønnsomhet, tilgang til data og drift av systemene. Samtidig er dette teknologi som er under utvikling og det arbeides derfor med å løse problemene og begrensningene de fører med seg [5].

3 Teori

3.1 Halsan skole

Halsan skole er en barneskole i Levanger kommune med omtrent 200 elever fra første til sjuende trinn, samt 30 ansatte. Den første delen av bygget sto ferdig i 1987, og i 1997 ble det bygget et tilbygg som mer enn doblet det totale bruksarealet. I 2019 ble ventilasjonsanlegget i 1987-fløyen oppgradert, i 1997-fløyen står det originale ventilasjonsanlegget. I tillegg ble det installert et avansert styringssystem som skal regulere innetemperatur og ventilasjon ved hjelp av KI i hele bygget, dette systemet er installert i hele skolebygget. Skolen varmes opp med elektrisitet. Før oppgraderingen brukte skolen rundt 500 000 kWh strøm i året, målet er at gjennom mer intelligent styring av bygget vil skolen spare 50 000 kWh i året.[34]

Skolen har et samlet gulvareal på omtrent 3200 m^2 over to plan, 1.etasje og en kjelleretasje. Bygget består av to fløyer. I bildene i figur 3.1 ser man fløyen bygget i 1987 til venstre og 1997-fløyen til høyre, sammen danner fløyene en U-form. Skolen har mange ulike typer rom: klasserom, skolekjøkken, kunst- og håndverksrom, musikkrom, bibliotek, garderober, administrasjon og mer. Skolen driftes av Levanger kommune.



(a) Sørsiden. [35]

(b) Satellittbilde. [36]

Figur 3.1: Bilder av Halsan skole.

3.1.1 Bygningskroppen

De innvendige veggene er kledd med gips og panel i tre. Takflatene er dekket av panel i tre og på gulvene er det et gulvbelegg. Gulvdekket mellom 1. etasje og kjelleretasjen, samt gulvet mot grunnen er i betong. Bærekonstruksjonen fra 1. etasje opp mot loftet er i tre. Ytterveggene er kledd i trepanel.

3.1.2 Oppvarmingsenheter

All oppvarming av skolen gjøres av lokale enheter i rommene. Her brukes elektriske varmekabler, elektriske panelovner, elektriske rørovnere og takpanel. Det antas at alle disse enhetene er fra byggeår. Panelovnene, rørovnene og takpanel reguleres med SPT for romtemperatur (lufttemperatur), romtemperaturen måles av vegghengte sensorer. Varmekablene styres av SPT for gulvtemperaturen. Gulvtemperaturen måles av sensorer i gulvet.

3.1.3 Ventilasjonsanlegg

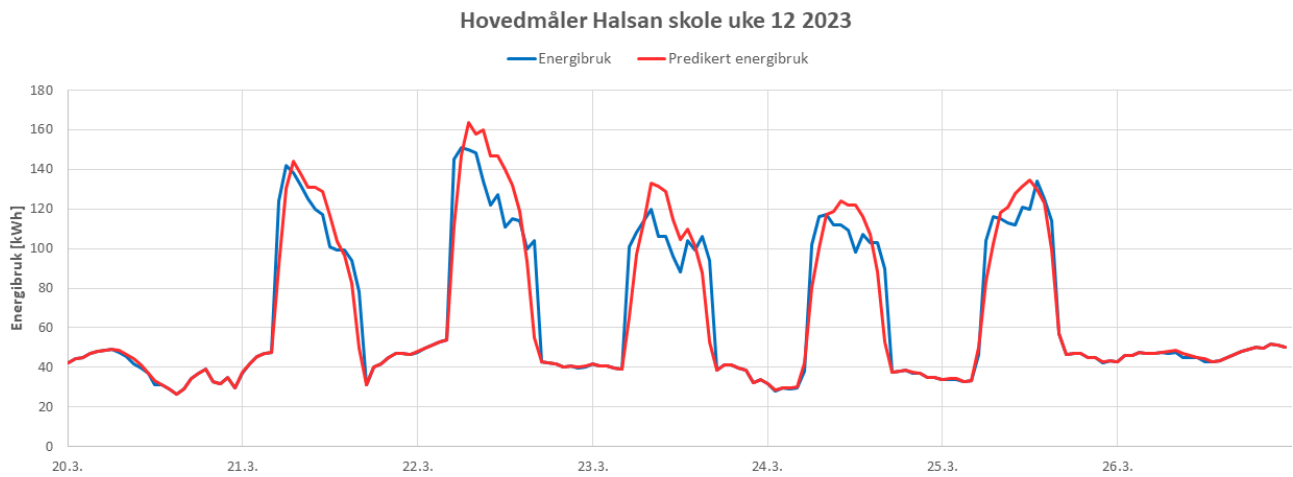
Alle oppvarmede rom har omrøringsventilasjon. I alle oppholdsrom, klasserom, arbeidsrom, osv., er det balansert og behovsstyrt (VAV). Under oppgraderingen av skolen gjennomført i 2019 ble det installert et nytt ventilasjonsanlegg i 1987-fløyen, mens i 1997-fløyen ble det ikke gjort noen endringer. For det nye ventilasjonsanlegget er det nok tilgjengelig informasjon til at anlegget kan simuleres på en detaljert måte. Disse karakteristikene presenteres i metodekapittelet.

Selv om det er mindre informasjon om ventilasjonen i 1997-fløyen var det mulig å hente ut en del informasjon fra databladene. 1997-fløyen forsynes av to ventilasjonsaggregat, nummerert 36.01 og 36.02. 36.01 har en total luftmengde på $13\,500\text{ m}^3/h$ og 36.02 har total luftmengde på $7\,500\text{ m}^3/h$. De to aggregatene er like med elektrisk varmebatteri, vann/glykol-varmegjenvinner og uten kjøling. Virkningsgraden for en typisk vann/glykol-varmegjenvinner installert på denne tiden er 45-55 % [37]. Det er ikke oppgitt noen SFP for anleggene.

3.1.4 Optimaliseringssystemet

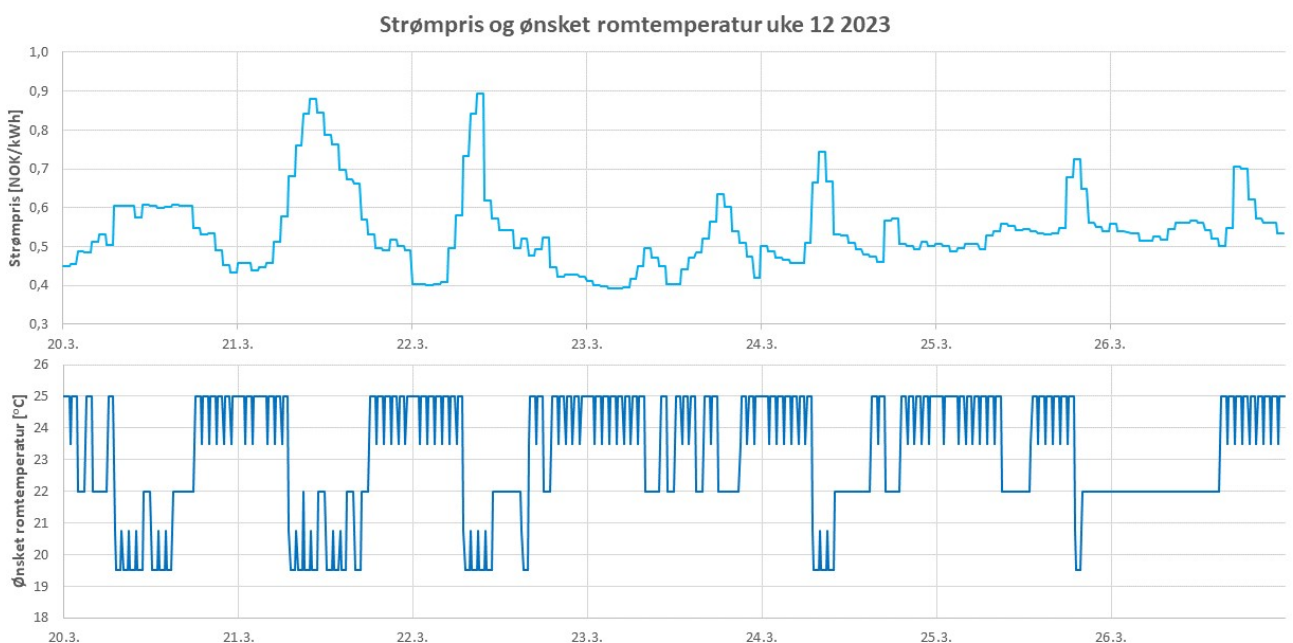
Det er ISI-Tech som har levert optimaliseringssystemet for reguleringen ved Halsan skole. Dette kjøres på en egen plattform, Bigsave EMIS, som er adskilt fra SD-anlegget. EMIS sender ulike settpunkter som overstyrer SD-anlegget. Settpunktene forandres for å unngå høye effektuttak og redusere strømkostnader. Hovedmålet til optimaliseringssystemet kan deles i to; 1) redusere effektkostnader ved å redusert effektuttak, og 2) redusere strømkostnadene ved å justere energibruken etter variasjonene i strømprisen. For å sikre at tiltak utført for å oppnå økonomiske besparelser skjer på en optimal måte, som ivaretar inn klima, brukes beregninger basert på KI. KI brukes for å vekte parameterne i en statistisk modell. Som en del av datagrunnlaget til beregningene brukes værprognoser og fremtidige strømpriser. Med informasjon om fremtidige påvirkninger kan bygget forberedes på de effektreducerende tiltakene ved å, for eksempel, akkumulere varme. De omfattende målingene fra SD-anlegget er en viktig forutsetning for beregningene, i tillegg brukes historiske data fra undermålere, som måler effektforbruket til lokal romoppvarming, og hovedmåleren ved skolen og historiske vær- og forbruksdata. Som diskutert i litteraturstudiet er store datamengder viktig i beregninger hvor KI benyttes.

Hovedmotivasjonen bak å redusere effektuttaket er den nye nettleiemodellen, hvor kunden belønnes for å redusere sine effekttopper, dette forklares nærmere i 3.7.2. Når effektuttaket er høyt startes tiltak for å redusere dette, tiltakene kan være å redusere oppvarming av rommene eller redusert luftmengde i rommene. I figur 3.2 er energibruk predikert av optimaliseringssystemet vist i forhold til faktisk energibruk etter iverksetting av effektreducerende tiltak.



Figur 3.2: Målt og predikert energibruk Halsan skole uke 12 2023.

I tillegg til å redusere effektuttaket ved skolen har optimaliseringssystemet som mål å redusere strømkostnadene. For å redusere strømkostnadene utnyttes svingningene i spotprisen, disse svingningene forklares nærmere i 3.7. I hovedsak betyr dette at når strømprisen er lav justeres SPT opp slik at varme kan akkumuleres, mens når strømprisen er høy settes SPT ned og den akkumulerte varmen brukes for å holde en akseptabel romtemperatur. Variasjonene i settpunkt for romtemperatur og gulvtemperatur er ulike. De samme endringene i SPT gjøres i alle rommene i skolebygget. Et viktig aspekt med denne reguleringen av SPT er at NordPool offentliggjør strømprisene for den kommende dagen, dette gjør det mulig å planlegge energibruken. Et eksempel på hvordan dette fungerer i praksis er vist i figur 3.3, hvor strømprisen og SPT for uke 12 i 2023 er presentert. For eksempel, midt på dagen 22.03 kommer strømprisen til å bli veldig høy i forhold til hva den er den foregående natta. Derfor iverksettes det en akkumuleringsperiode natt til 22.03 ved at SPT justeres opp, og dermed kan SPT senkes på dagen som gir lavere energibruk når strømprisen er høy.



Figur 3.3: Ønsket romtemperatur og strømpriser uke 12 2023.

3.2 Simuleringsprogram

For å lage en simuleringsmodell må et egnet simuleringsprogram velges. Fem relevante bygningssimuleringsverktøy er i dette delkapittelet presentert og sammenlignet; SIMIEN, EnergyPlus, IDA-ICE, ESP-r og TRN-SYS. En rekke egenskaper skiller disse verktøyene; detaljeringsgrad, brukergrensesnitt, krav til forkunnskaper, bruksområde, fleksibilitet og nøyaktigheten til resultatene. Disse egenskapene er sammenlignet for å finne simuleringsprogrammet som er best egnet til å utvikle simuleringsmodellen av Halsan skole, samt gjennomføre verifisering av optimaliseringssystemet.

3.2.1 SIMIEN

SIMIEN er et program som simulerer bygningers ytelse over en bestemt periode. SIMIEN 6 bygger på NS3031:2014, mens SIMIEN PRO er basert på SN-NSPEK 3031:2021. Ofte brukes SIMIEN til energimerking. Programmet evaluerer byggets ytelse opp mot TEK17 og tidligere standarder, samt passivhus gitt i NS3700/NS3701. Programmet simulerer energibruk, oppvarmings- og kjølebehov og tilbyr relativt detaljerte simuleringer av innklimaet. [38]

Inn-data legges inn via et relativt enkelt brukergrensesnitt. Når det kommer valg av værdata må en spesifikk by i Norge velges. Videre defineres interne laster, materialer, U-verdier og ulike settpunktsverdier. Når det gjelder byggets geometri brukes det ikke en 3D-modell av bygget, byggets fasade i hver retning legges inn med vinduer, solskjerming, dører, osv. Oppvarmings- og kjølesystemer defineres enkelt med ønsket maksimal effekt, temperaturer og sesongvirkningsgrad. Simuleringene baserer seg på en dynamisk modell av det brukerdefinerte bygget med et konstant tidstrinn på 15 minutter. Sammenlignet med nyere og mer avanserte simuleringsprogram gir SIMIEN mindre nøyaktige resultater. [39]

3.2.2 EnergyPlus

EnergyPlus er et annet program som brukes for å simulere bygningers energibruk. Basert på brukerens beskrivelse av byggets geometri, konstruksjonsmaterialer, funksjon og systemer, regner programmet ut oppvarmings- og kjølingsbehovet nødvendig for å nå gitte settpunktsverdier. [39]

EnergyPlus er et konsollbasert program som leser input og skriver output som tekst-filer, og har derfor ikke et eget grensesnitt. [40] I IDF (*Input Data File*) Editor kan EnergyPlus-filer endres. IDF Editor kan i praksis brukes i hele designprosessen til bygget, men dette kan være noe utfordrerne på grunn av et vanskelig brukergrensesnitt. Byggets geometri kan importeres gjennom en Computer Aided Design (CAD)-fil fra ønsket program. EnergyPlus tillater veldig detaljert design av bygninger og deres VVS-systemer, men i mange tilfeller krever dette at brukeren har kunnskap om programmeringsspråket programmet er skrevet i, *Fortran 90* eller *C++*. [39]

3.2.3 IDA-ICE

IDA-ICE levert av EQUA Simulation AB er et simuleringsprogram for studier av termisk inneklime og bygningers totale energibruk. Med IDA-ICE kan en modellere bygningen, byggets systemer og regulering av disse systemene på en nøyaktig måte. [41] Programmet har et relativt intuitivt brukergrensesnitt.

Byggets geometri kan defineres ved å enten importere en CAD eller IFC-fil eller ved å tegne geometrien i programmet direkte. Videre kan brukeren blant annet definere orientering, skygge fra omgivelser, konstruksjonsmaterialer, informasjon om kuldebroer, trykkkoeffisienter og infiltrasjon. I 3D-fremstillingen av bygget kan brukeren enkelt bevege seg rundt, samt visualisere ulike resultater, som innendørstemperatur eller luftkvalitet, gjennom animasjoner.

I IDA-ICE er det mulig å bygge og simulere både enkle og avansert modeller. En stor fordel med programmet er at elementer enkelt kan defineres, deretter kan en med større detaljeringsnivå gå inn og endre på f.eks. ytelse, styring eller geometri. Dette gjør det lett å først bygge opp en forenklet modell for så å dykke ned og justere på detaljene.

Hvert rom defineres som en termisk sone. I disse sonene defineres lokale oppvarmings- og kjøleenheter, dette kan være enheter koblet til et sentralt system, som vannradiatorer eller vannbåren gulvarme, eller enheter som er uavhengig av de sentrale systemene, som elektriske radiatorer eller elektrisk gulvarme. I de termiske sonene defineres også interne laster, settpunktverdier og luftmengder. Etter at de termiske sonene er laget, kan de sentrale systemene for luftbehandling, oppvarming og kjøling defineres og kobles til sonene.

Når det kommer til simuleringen, har brukeren en rekke valg. I IDA-ICE kan en velge mellom ulike typer simulering (f.eks. oppvarming, kjøling, eller egendefinert), simuleringsperiode og tidstrinn. Resultatene kan enkelt analyseres i en oppsummeringstabell eller undersøkes i detalj gjennom en rekke grafer, i tillegg kan resultatene eksporteres til Excel-filer.

3.2.4 ESP-r

ESP-r (*Environmental Systems Performance - Research*) er et annet verktøy for simulering av bygningers ytelse. Programmet kan modellere oppvarming, luftkvalitet, fukt, lys og elektrisk flyt med romlig og tidsmessig oppløsning bestemt av brukeren [42]. I ESP-r kan byggets geometri defineres i 3D, deretter kan en rekke parametere knyttet til bygningskroppen defineres, som konstruksjonsmaterialer og infiltrasjon. Interne laster legges inn og fenomener som vindusåpning og styring av belysning kan modelleres. Oppvarmings- og kjølesystemer, samt ventilasjonssystemer defineres som et nettverk av komponenter. Det er også mulig å legge inn egendefinerte reguleringssystemer.

Ofte brukes programmet til å enten modellere bygningskroppens ytelse eller spesifikke installasjoner inne i en bygning, men programmet skal være i stand til å kombinere de to for å modellere et bygg med alle dets systemer [43]. En ulempe med programmet er at det er veldig detaljert og komplekst slik at en bør ha god kompetanse

om de spesifikke systemene, og det er derfor vanskelig å lære seg uten en mentor [44] [45].

3.2.5 TRNSYS

TRNSYS (Transient System Simulation tool) er et fleksibelt grafisk basert programvaremiljø. TRNSYS brukes til å simulere hvordan flyktige systemer oppfører seg. TRNSYS kan brukes til å modellere en rekke ulike typer dynamiske systemer, men brukes hovedsakelig til å undersøke ytelsen til termiske og elektriske energisystemer. TRNSYS består av to deler, motoren, som kalles *kernelen*, samt et omfattende bibliotek med komponenter. Dette biblioteket inneholder omtrent 150 modeller, alt fra enkeltkomponenter i et VVS-system til bygninger med flere soner. Modellene er laget slik at brukeren kan endre på de eksisterende modellene eller skrive sine egne i ønsket programmeringsspråk. Alle delene i en modell lages separat før de senere kobles sammen. [46]

I det visuelle grensesnittet *Simulation Studio* kan brukeren lage modeller av VVS-systemer ved å sette sammen ulike komponenter fra biblioteket. [39] TRNSYS gir nøyaktige resultater, men kan være vanskelig å operere uten mye forkunnskap.

3.2.6 Valg av simuleringsprogram

En liste med krav brukes for å avgjøre hvilket simuleringsverktøy som skal brukes i rapporten. Simuleringsverktøyet tilbyr:

- Mulighet for detaljert modellering av inneklima og energibruk på sonenivå.
- Mulighet til å legge inn egen klima-fil.
- Mulighet til nøyaktig modellering av bygget i 3D, samt nøyaktig modellering av et moderne ventilasjonsanlegg.
- Mulighet til å justere på og definere egne reguleringsmetoder for forhåndsdefinerte oppvarmingsenheter.
- Et brukervennlig brukergrensesnitt som gjør programmet enkelt å bruke. Programmet må være relativt enkelt å lære og ikke kreve kunnskap om programmeringsspråket programmet er skrevet i.

SIMIEN gir ikke stor nok mulighet til å legge inn detaljer om bygget, særlig byggets geometri og systemer. SIMIEN er i tillegg et mindre nøyaktig simuleringsverktøy enn de andre verktøyene som er presentert. Ved bruk av EnergyPlus og TRNSYS bør brukeren ha kunnskap om programmeringsspråk som brukes i de to systemene. TRNSYS og ESP-r er nøyaktige verktøy med god ytelse, men for å oppnå gode resultater er kunnskap om hvordan de opereres viktig.[47] IDA-ICE ble valgt på grunn av god kjennskap til programmet, tilstrekkelig nøyaktighet, mulighet til å orientere seg i en 3D-modell av bygget og det gir utdata som er enkle å analysere.

3.3 Termisk komfort

Termisk inneklima påvirkes av mange faktorer, blant annet lufttemperatur, strålingstemperatur, luftfuktighet og lufthastighet. Kombinasjonen av disse faktorene bestemmer opplevelsen av termisk komfort eller diskomfort. Sinnstilstanden hvor en person er tilfreds med det termiske miljøet defineres som termisk komfort. I denne tilstanden vil ikke personen ønske omgivelsene varmere eller kaldere. Opplevelsen av det termiske miljøet er imidlertid svært individuelt, det vil derfor være umulig å tilfredsstille alles komfortnivå samtidig. Å tilfredsstille så mange som mulig og/eller akseptere en maksimal andel misfornøyde er derfor målet i dagens bygningsdesign-

og drift.

Hvordan personer oppfatter sin egen termiske komfort påvirkes av tre mekanismer; psykologiske, fysiske og fysiologiske mekanismer. Disse faktorene danner grunnlaget for to hovedretninger innenfor vitenskapen om termisk komfort; teorier om varmebalanse mellom menneskekroppen og omgivelsene, basert på fysiske og fysiologiske teorier, og antagelsen om at mennesker er tilpasningsdyktige, basert på psykologiske teorier. Det er utviklet sofistikerte analytiske, empiriske og statistiske modeller både innenfor varmebalanseretningen (f.eks. PMV/PPD modellen av Fanger implementert i NS EN ISO 7730 og NS-EN 16798-1:2019) og den adaptive modellen (i NS-EN 16798-1:2019). På grunn av krav og anbefalinger til nivåer for operativ temperatur i nasjonale veiledere er det likevel vanlig å bruke operativ temperatur til å vurdere termisk komfort. [48]

Et godt inn klima har stor betydning for barn og unges helse og trivsel. Dårlige innklimaforhold knyttet til ventilasjon, temperatur og belysning i skoler og barnehager kan påvirke barnas arbeidsevne og skoleprestasjoner. Barn er spesielt følsomme for innklimaforurensninger og dårlig inn klima. Lufttemperatur er det viktigste målet innenfor termisk komfort. For høy temperatur kan blant annet føre til trøtthet og nedsatt prestasjon og velvære. Høy lufttemperatur kan også føre til dårligere oppfatning av luftkvaliteten. Dersom temperaturen i oppvarmings sesongen overstiger $22^{\circ}C$ bør den senkes for å motvirke tørr luft og andre inn klimaplager. [49]

3.3.1 Adaptiv termisk komfort

Den adaptive modellen for termisk komfort baserer seg på ideen om at utendørstemperaturen påvirker innendørs termisk komfort fordi mennesker tilpasser seg ulike temperaturer gjennom ulike sesonger [50]. Et annet viktig aspekt ved den adaptive modellen er det adaptive prinsippet. Det adaptive prinsippet går ut på at hvis en endring som fører til diskomfort oppstår vil folk reagere på en måte som vil gjenopprette deres komfort. Dette kan være å regulere varmetapet fra kroppen med klær, regulere det termiske inn klima ved åpning av vinduer eller dører, eller å velge et annet inn klima ved å flytte seg til et nytt rom. [51] En viktig forutsetning for at adaptive komfortteorier skal kunne brukes i bygningsdesign og -drift er at brukerne har adaptive muligheter [48]. Ifølge Folkehelseinstituttet og Helsedirektoratet er det i skoler og barnehager viktig med mulighet til å åpne vinduer for å lufte i alle oppholdsrom. [49]

Standarden NS-EN 16798-1:2019 *Bygningers energiytelse - Ventilasjon i bygninger - Del 1: Inn klimaparametere for dimensjonering og vurdering av bygningers energiytelse inkludert inneluftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustikk*, kan benyttes for å vurdere det termiske inn klimaet. Standarden omhandler en adaptiv metode for bygninger uten kjøling. Denne metoden er primært tilpasset bygninger hvor brukeren i stor grad kan påvirke sin opplevelse av inn klimaet. I den adaptive modellen varierer den øvre og nedre grensen for operativ temperatur med utetemperaturen, dvs. grenseverdiene er høyere på sommeren fordi utetemperaturen er høyere. Altså, ved hvilken operativ temperatur ulike grader av termisk komfort oppnås er avhengig av utendørstemperaturen. I tabell 3.1 er temperaturkategoriene i EN-NS-16798:2019 forklart. [52] I IDA-ICE beregnes termisk komfort basert på EN 15251. Dette er en tidligere versjon av NS-EN 16798-1:2019, som nå er tilbaketrasket, og vil gi de samme resultatene.

Tabell 3.1: *Temperaturkategorier NS- EN 16798-1:2019.*

Kategori	Forklaring
I (Best)	Høyt forventingsnivå: Anbefalt i rom der svært sensitive og sårbare personer med spesielle behov oppholder seg, f.eks. mennesker som har nedsatt funksjonsevne, er syke, spedbarn eller gamle.
II (Good)	Normalt forventningsnivå: Bør brukes i nye og rehabiliterte bygninger.
III (Acceptable)	Akseptabelt, moderat forventingsnivå: Kan brukes i eksisterende bygninger.
IV (Unacceptable)	Verdier utenfor kriteriene for kategoriene ovenfor. Denne kategorien bør bare godtas i en begrenset tid av året.

3.3.2 Operativ temperatur

Den operative temperaturen beskriver hvordan mennesker opplever temperaturen i et rom. Når lufthastigheten er lavere enn $0,2 \text{ m/s}$ kan den operative temperaturen, T_o [$^{\circ}\text{C}$], uttrykkes som i 3.1,

$$T_o = \frac{T_l + T_{ms}}{2}, \quad (3.1)$$

hvor T_l [$^{\circ}\text{C}$] er lufttemperatur og T_{ms} [$^{\circ}\text{C}$] er middelstrålingstemperatur. Middelstrålingstemperaturen beskriver den termiske strålingen fra omliggende flater som treffer en person. [53] I tillegg til lufttemperaturen, kan den operative temperaturen simuleres i IDA-ICE.

3.4 Interne laster

Dette delkapittelet (3.4) er hentet fra fordypningsprosjektet [1]. Interne varmelaster er varme som genereres av personers fysiske aktivitet (metabolsk rate), varmeutslipp fra kunstig belysning, samt varme som genereres ved bruk av teknisk utstyr som datamaskiner. Personer påvirker også innneklima ved å være en betydelig CO_2 -kilde.

3.4.1 Metabolsk rate

Den metabolske raten til en person sier noe om hvor mye varme den genererer. $1,0 \text{ met}$ tilsvarer 58 W/m^2 , hvor arealet det refereres til er personers overflateareal. Det gjennomsnittlige overflatearealet til en voksen skandinavisk person er $1,77 \text{ m}^2$. I følge Feber og Krásničanová [54] kan overflatearealet til et barn estimeres med grafen i figur 3.4. Grafen viser at overflatearealet til en elev i alderen 5-13 år vil være omtrent $0,6$ til $1,3 \text{ m}^2$, altså ganske mye mindre enn for en voksen person. Metabolsk rate er avhengig av aktivitetsnivået til personen. $1,0 \text{ met}$ tilsvarer en sittende, avslappet person, mens $1,6 \text{ met}$ tilsvarer en stående person i lett aktivitet.[55]

**Figur 3.4:** *Overflateareal barn [54].*

3.4.2 CO₂ generert av personer

Et viktig aspekt i dette tilfellet er at personene tilstede i klasserommene hovedsakelig er barn i alderen 5-13 år. For barn er forholdet mellom CO₂-produksjon og metabolsk rate andresledes enn for voksne personer. Barn i barnehage (3-6 år) med et aktivitetsnivå på 2,7 met produserer 18 L CO₂/h per person. Mens for eldre barn i skoler (14-16 år; 1-1,2 met) er CO₂ produksjonen nærmere det en voksen person med samme metabolsk nivå produserer, 19 L CO₂/h per person.[55]

3.4.3 Tidsinvariant massebalanse

CO₂-konsentrasjonen i et rom er avhengig av luften som leveres til rommet, luften som trekkes ut av rommet, ventilasjonsraten og eventuelle kilder til CO₂ inne i rommet, ofte mennesker. Den tidsinvariante CO₂-konsentrasjonen i rommet kan uttrykkes som,

$$\dot{V}c_s + \dot{M} = \dot{V}c_e, \quad (3.2)$$

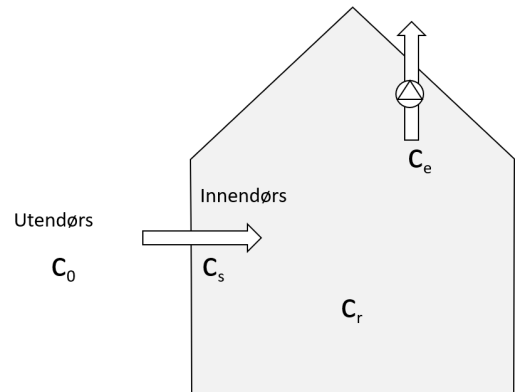
hvor

c_e = avtrekkskonsentrasjonen [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

c_s = tilluftskonsentrasjonen [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

\dot{M} = styrken til de forurensende kildene [$\mu\text{g}/\text{h}$]

\dot{V} = ventilasjonsraten [m^3/h].



Figur 3.5: Visualisering av CO₂-balansen i et rom.

Figur 3.5 visualiserer de ulike verdiene i CO₂-balansen. Om en antar blandeventilasjon med fullstendig blanding av luften, kan en sette $c_e = c_r$, der c_r [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] er den uniforme CO₂-konsentrasjonen i rommet. For å gi et anslag på hvor mange personer som oppholder seg i rommet kan 3.2 brukes for å finne styrken til de forurensende kildene, \dot{M} . For at den tidsinvariante massebalansen skal være gyldig må følgende kriterier være oppfylt; CO₂-konsentrasjonen varierer ikke over tid, styrken til CO₂-kildene varierer ikke over tid og det finnes ikke noen andre mekanismer enn ventilasjonen som fjerner CO₂ fra rommet.[55]

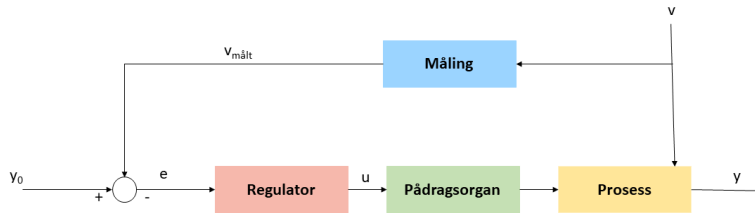
3.5 Regulering

Reguleringsteknikk beskriver hvordan dynamiske systemer kan stabiliseres og reguleres. Regulatorens oppgave er å endre pådraget i forhold til målte verdier fra prosessen som reguleres. Pådragsorganet er den komponenten i reguleringssløyfen som endrer prosessverdien, for eksempel en ventil som regulerer massestrømmen gjennom et rør. [56]

Reguleringssystem kan karakteriseres ved dets reguleringshandling. Systemer som ikke inneholder en reguleringsløyfe kalles åpne systemer. Et system som inneholder en eller flere reguleringsløyfer kalles et lukket system. Reguleringssløyfen er realisert ved at utgangssignalet y trekkes fra referanseverdien (ønsket utgangsverdi) y_0 . Dette gir et avvikssignal e , som regulatoren benytter til å beregne pådraget u . Reguleringssystemene kan deles inn i 4 typer, disse er presentert under. [57]

3.5.1 Regulering i åpen sløyfe

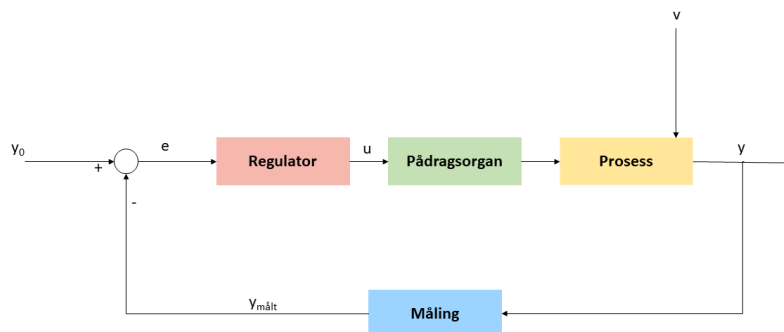
Regulering i åpen sløyfe, eller styring, er i realiteten ikke ekte regulering fordi sløyfen ikke er lukket. Styring baserer seg på målinger av forstyrrelsen v , men ikke den faktiske reguleringsvariabelen, y . Dersom prosessen er oppvarming av et rom, y er romtemperaturen og pådragsorganet er en panelovn, kan v for eksempel være utendørstemperaturen. Regulering i åpen sløyfe er visualisert i blokkdiagrammet i figur 3.6. [57] [58]



Figur 3.6: Regulering i åpen sløyfe, blokkdiagram.

3.5.2 Regulering i lukket sløyfe

Regulering i lukket sløyfe, eller regulering med tilbakekobling, betyr at en har uavbrutt signaloverføring mellom målingen av y til systemet som sammenlignes med y_0 . Sammenligningen av y og y_0 gir e som benyttes av regulatoren til å regne ut u . Bruker vi samme eksempel som over, et rom som skal varmes opp, vil y typisk være romtemperaturen og y_0 være ønsket romtemperatur. En visualisering av regulering i lukket sløyfe med tilbakekobling er vist i blokkdiagrammet i figur 3.7. [57] [58]



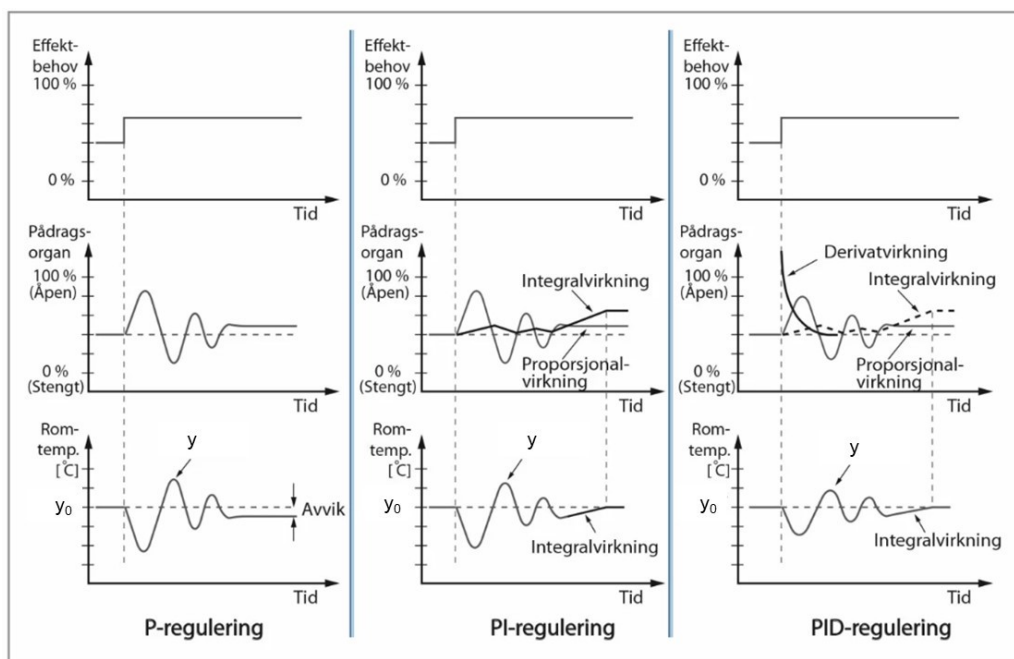
Figur 3.7: Regulering i lukket sløyfe med tilbakekobling, blokkdiagram.

I regulering med tilbakekobling (regulering i lukket sløyfe) benytter regulatoren tre ulike reguleringsprinsipper, proporsjonal (P), integral (I) og derivat (D), som bestemmer u avhengig av y og y_0 . [56] [59]

Proporsjonalregulering: Ved proporsjonalregulering eller P-regulering er u proporsjonalt med behovet eller e , med en gitt faktor, forstrekningen K_p . Ligningen for P-leddet:

$$K_p \cdot e \quad (3.3)$$

For en oppvarmingskilde kan K_p være 10W per grad, det vil si dersom avviket er 5°C til pådraget være 50W. Et typisk reguleringsforløp for et varmeanlegg ved P-regulering er illustrert i figur 3.8. Effektbehovet øker på grunn av en ytre påvirkning, v . Temperaturen synker og pådragsorganet åpner proporsjonalt med avviket. Fordi



Figur 3.8: Illustrering av ulike reguleringsprinsipper [59].

pådragsorganet over lang tid er åpnet mer enn nødvendig, stiger temperaturen over y_0 . Med P-regulering vil en alltid oppleve svingninger før y stabiliserer seg. Av 3.3 ser en at dersom e er lik null vil P-leddet være lik null. Dermed vil det alltid være et avvik mellom y og y_0 , som vist i figur 3.8. Dette avviket kalles proporsjonalavviket. [56] [59]

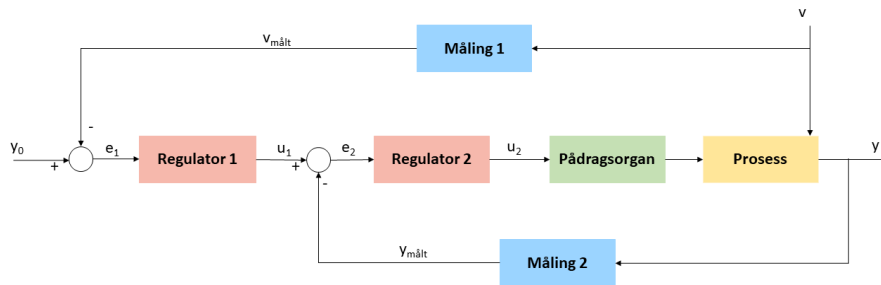
PI-regulering: PI-regulering er proporsjonal og integral regulering. Ved integralvirkning integreres proporsjonalavviket slik at det over tid fjernes. Integraltiden, T_i , er en doseringsfaktor som bestemmer hvor raskt regulatoren skal fjerne proporsjonalavviket. Regulatoren måler proporsjonalavviket over en gitt periode og integrerer det slik at pådragsorganet først står i null når avviket er lik null. Som vist i figur 3.8 vil avviket mellom y og y_0 forsvinne, men svingningene rundt y_0 vil ofte bli noe kraftigere. PI-regulering er en vanlig reguleringsmetode i større bygg. [59]

PID-regulering: PID-regulering består av alle de tre reguleringsprinsippene. Målet med derivatvirkningen er å dempe svingningene rundt y_0 . Som vist i figur 3.8, vil derivatvirkningen øke pådraget hurtigere og høyere enn proporsjonalvirkningen, dette gir raskere regulering uten mer svingninger. PID-regulering egner seg særlig bra i systemer hvor endringene i effektbehov er store og brå. Vanligvis brukes ikke PID-regulering til romtemperaturregulering. [59]

3.5.3 Foroverkoblet regulering i lukket sløyfe

Med foroverkoblet regulering i lukket sløyfe kompenseres det for både forstyrrelser og avvik. Foroverkobling kan brukes når systemet utsettes for en målbar forstyrrelse v , for eksempel endring i utendørstemperaturen. I noen tilfeller vil det være fordelaktig å bruke den målte verdien av v til å justere y_0 . Dette vil redusere tiden det tar før systemet starter å kompensere for endringer i v . [2] Målingen av v sammenlignes med y_0 for å finne e_1 som

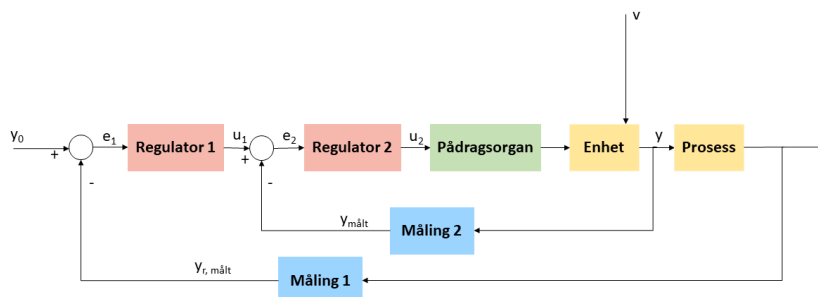
sendes til i regulator 1 hvor u_1 beregnes. Deretter sammenlignes u_1 og y for å finne e_2 som regulator 2 bruker for å finne u_2 . Dette er visualisert i blokkdiagrammet i 3.9.[57] [58]



Figur 3.9: Foroverkoblet regulering i lukket sløyfe, blokkdiagram.

3.5.4 Kaskaderegulering i lukket sløyfe

Kaskaderegulering i lukket sløyfe kan også kalles pådragsverdikompenisering eller regulering med intern tilbakekobling. Reguleringssystemet kan brukes dersom det finnes flere komponenter som representerer store tregheter eller lange tidsforsinkelser i anlegget. Da er det fordelaktig å ha én liten og rask krets inne i den store og langsomme kretsen. Reguleringssystemet er visualisert med et blokkdiagram i figur 3.10. I dette blokkdiagrammet ser man at den raske kretsen er bygget opp rundt pådragsorganet. Målingen i den store kretsen, primærkretsen, regulerer referanseverdien for den raske kretsen. Dette bedrer reguleringskvaliteten ved å eliminere forstyrrelser som kan komme gjennom pådragsstrømmen før de rekker å påvirke tilstanden som reguleres. [57] [58]



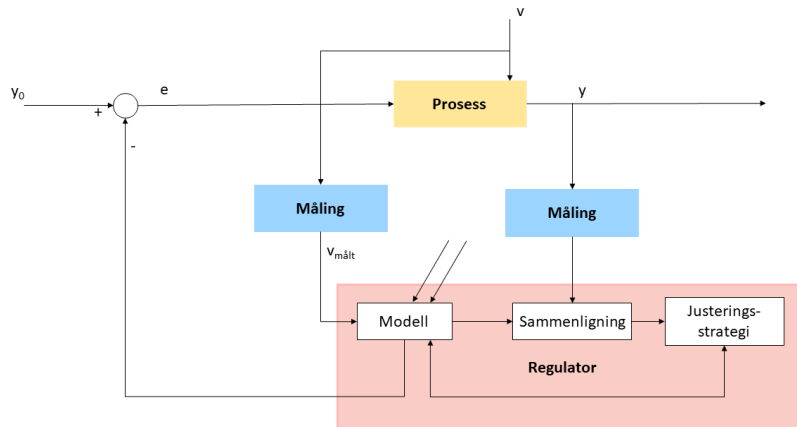
Figur 3.10: Kaskaderegulering i lukket sløyfe, blokkdiagram.

3.5.5 Regulering i åpen sløyfe med modelloppfølging

Regulering i åpen sløyfe med modelloppfølging er en avansert metode for prosessregulering. Alle former for intelligent regulering hører til i denne formen for regulering. Bygg hvor intelligent regulering brukes kan betegnes som intelligente bygg. Intelligente bygg kan, ved hjelp av intelligent regulering, bruke data fra IoT-enheter til å lære seg oppførselen til systemer, komponenter og bruker for å regulere bygget på en energioptimal måte. [58]

Metoden bruker en modell til å forutse fremtidig utvikling. Dette kan være en matematisk modell eller en modell basert på KI, en læringsmodell. Ved Halsan skole brukes en slik læringsmodell. Denne modellen, enten matematisk eller læringsbasert, gis nødvendig informasjon om prosessen og dens omgivelser. Dersom prosessen er oppvarming av et rom, kan omgivelsene være for eksempel værprognoser, belegg og/eller strømpriser. Mo-

dellen bruker denne informasjonen til å beregne fremtidig utvikling, slik at forstyrrelsene kan kompenseres for før avviket oppstår. Metoden er visualisert i blokkdiagrammet i figur 3.11. Når de fremtidige forstyrrelsene er predikert beregner modellen de optimale reguleringshandlingene basert på en optimaliserings-kostnadsfunksjon. Ved å forutse fremtidige forstyrrelser kan reguleringshandlinger i nåtid optimaliseres basert på fremtiden. Dette gjøres ved å optimalisere en begrenset tidsperiode, men den optimale reguleringshandlingen implementeres kun i den nåværende tidsperioden. I tillegg til de predikerte forstyrrelsene bruker modellen historiske regulerings-handlinger for å optimalisere reguleringen. [58]



Figur 3.11: Regulering i åpen sløyfe med modelloppfølging, blokkdiagram.

3.6 Termisk masse

Termisk masse, vitenskapelig beskrevet som varmekapasitet, beskriver byggets evne til å absorbere varme, holde på varmen og senere avgi varmen. En konstruksjon med høy termisk masse, en termisk tung konstruksjon, virker som et energilager for rommene konstruksjonen er eksponert mot.[60] Termisk masse kan også betegnes som volumetrisk varmekapasitet C_v [J/m^3K]. VHC kan defineres ved:

$$C_v = C \cdot d \quad (3.4)$$

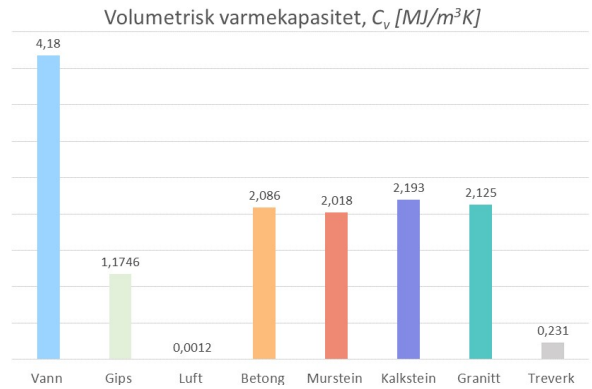
Hvor C [J/K] er materialets varmekapasitet og d [kg/m^3] er tettheten til materialet. Dersom man tilfører varmen Δq [J] til et materiale vil temperaturen til materialet øke med ΔT [K]. Varmekapasiteten C [J/K] er definert som

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta T} \quad (3.5)$$

[61] [62]

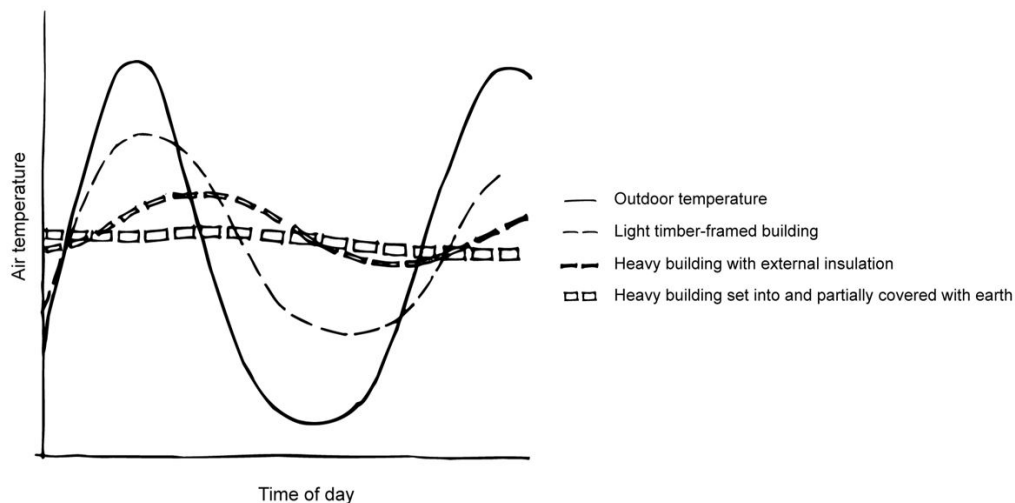
Termisk etterslep beskriver hvor fort varme absorberes og frigjøres fra konstruksjonen til rommet. Forholdet mellom konstruksjonen og rommet påvirkes først og fremst av konstruksjonens varmekapasitet C og konduktivitet k . Andre faktorer som påvirker forholdet er temperaturforskjellen mellom ulike sider av materialet, materialets tykkelse, overflaten til materialet, tekstur, farge og hvordan luften beveger seg ved overflaten. Konstruksjonens varmekapasitet beskriver hvor godt materialet holder på varme, mens konduktiviteten er materialets evne til å lede varme. [60]

Konstruksjonens termiske egenskaper kan bidra med å redusere temperatursvingninger i bygninger gjennom et døgn, som vil redusere oppvarmings- og kjølebehov. I perioder med høy temperatur, for eksempel med høy solinnstråling, absorberer konstruksjonen varme, og når omgivelsestemperaturen reduseres vil varmen lagret i konstruksjonen overføres til rommene. På sommeren kan varme overføres til den termiske massen på dagen, slik at kjølebehovet på dagen reduseres. På natta slippes denne varmen fri slik at varmebehovet reduseres. På vinteren kan varmen lagres i kortere perioder. Varme kan da lagres i løpet av dagen for lavere energibruk på ettermiddagen og kvelden. Stor termisk masse bør kombineres med godt isolerte konstruksjoner, for å holde varmen inne på vinteren og holde varmen ute på sommeren. Den termiske massen plasseres ut mot rommet slik at den er eksponert for lufta i rommet, bak den termiske massen bør det isoleres godt.[63]



Figur 3.12: Ulike materialers volumeteriske varmekapasitet, C_v .

Figur 3.12 viser volumetrisk varmekapasitet for ulike materialer. Her ser vi at det vil være stor forskjell på en trekonstruksjon og en betongkonstruksjon. Figur 3.13 viser hvordan innnetemperaturen påvirkes av utetemperaturen i bygg med ulik termisk masse. [62]



Figur 3.13: Romtemperatur og utetemperatur i bygg med ulik termisk masse [62].

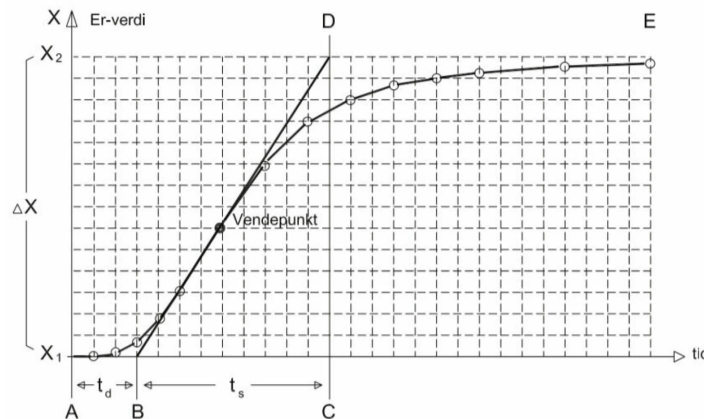
Tabell 3.2 viser materialegenskapene de til de forhåndsdefinerte byggematerialene i IDA-ICE.

Tabell 3.2: Egenskaper til de forhåndsdefinerte byggematerialene i IDA-ICE.

Materiale	Termisk konduktivitet, k	Tetthet, d	Spesifikk varmekapasitet, C_m
	W/mK	kg/m^3	J/kgK
Gips	0,22	970	1090
Isolasjon	0,045	20	750
Lett isolasjon	0,036	20	750
Treverk	0,14	500	2300
Betong	1,7	2300	880
Lettbetong	0,15	500	1050
Gulvbelegg	0,15	500	1050
Stein	3	2700	880
Luft	0,02	1,2	1006.0

3.6.1 Tidskonstant og dødtid

Figur 3.14 viser en typisk kurve for en sprangrespons. Før et system påsettes et sprang er pådragsorganets posisjon Y_1 og systemet står i posisjon X_1 . Når pådragsorganet gjør et sprang fra Y_1 til Y_2 kalles endringen i systemet systemets sprangrespons. Sprangresponsen vil bevege seg mot X_2 . Om systemet som undersøkes er lufttemperaturen i et rom, vil pådragsorganet typisk være oppvarmingskilden i rommet, f.eks. en panelovn eller varmekabler. [64]



Figur 3.14: Typisk sprangresponskurve [64].

Når vi snakker om ulike oppvarmingsenheter og termisk masse er det sentralt å snakke om tidskonstant og dødtid. Tiden det tar fra pådragsorganet i enheten har utført en endring til denne endringen kan måles i rommet, kalles dødtid t_d . Når t_d har utløpt beskriver tidskonstanten t_s hvor raskt temperaturen i rommet endrer seg. Tidskonstanten avhenger av de massene som skal varmes opp eller kjøles ned. [65] Både t_d og t_s kan teoretisk defineres ved tangenten i vendepunktet til responskurven. I figur 3.14 er det vist hvordan t_d og t_s finnes. [64]

3.6.2 Gulvvarme

Elektrisk gulvvarme er ofte av elektriske varmekabler bygget inn i gulvet. For å oppnå størst mulig lønnsomhet ved bruk av elektrisk gulvvarme bør det kombineres med en høy termisk masse, for eksempel betonggulv. Med en høy termisk masse oppnår systemet en lang dødtid. Den termiske massen kan «lades opp» med varme utenfor *topplasttimene*. Periodene hvor effektforbruket i nettet er høyest kalles *topplasttimer* [66]. Hvis den termiske massen er og døgnvariasjonene i utendørstemperatur er store nok, kan temperaturen i rommene holdes på et komfortabelt nivå i opptil 8 til 10 timer uten noen tilførsel av elektrisk energi. [67]

3.6.3 Panelovn

Panelovnene ved skolen er gjennomstrømningsovner. I disse ovnene strømmer luft inn i bunnen av ovnen og varmes opp av varmeelementene før den varme luften strømmer ut gjennom åpninger i toppen av ovnen. Sammenlignet med lukkede panelovner avgis en større andel av varmen ved konveksjon. Omtrent 60 % av varmen avgis ved konveksjon mens 40 % avgis ved stråling. Elektriske panelovner har en kort t_d og liten t_s , som gjør at den samlede responstiden er på rundt 15 minutter. [68] På grunn av en liten metallmasse har disse gjennomstrømningsovnene liten varmetreghet, altså liten t_s . [69]

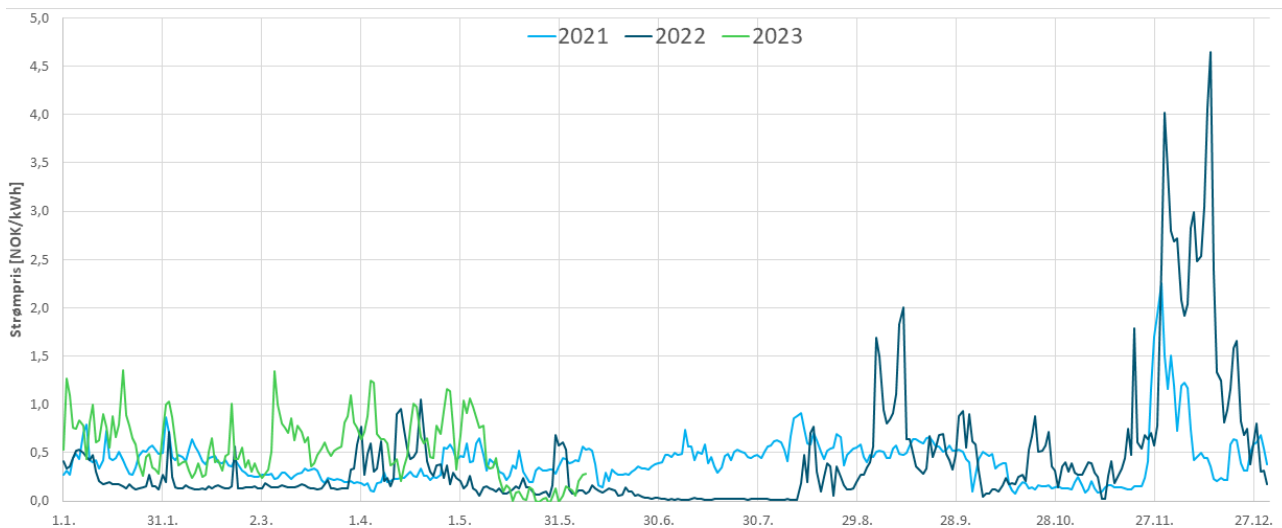
3.7 Strømkostnader

Deler av dette delkapittelet (3.7) er hentet fra fordypningsprosjektet [1]. Den økonomiske verifiseringen vil basere seg på Halsan skoles endring i energibruk. Strømregningen er satt sammen av flere priselementer: selve strømprisen, nettleie, strømleverandørens påslag og skatter og avgifter. [70] Siden all oppvarming av skolen er elektrisk vil strømprisen og nettleie være avgjørende for de økonomiske besparelsene. Her presenteres nødvendig informasjon for å forstå hvordan strømpriser og nettleie påvirker skolens kostnader.

3.7.1 Strømprisen

Det faktiske strømforbruket kjøpes fra strømselskapene. Strømselskapene tilbyr ulike typer strømprisavtaler; fast-, spot- og variabelpris. Halsan skole har en spotprisavtale, hvor strømprisen følger prisen i markedet time for time. I Norge har vi fem ulike strømprissoner, Halsan skole ligger i sone NO3 - Midt-Norge. [70] Skolen betaler, i likhet med alle andre norske skoler, ikke merverdiavgift (MVA) på innkjøp, dette inkluderer også strøm. De siste årene og særlig i 2022 har strømprisene vært historisk høye. Høyeste spotpris noensinne for sone NO3 ble nådd 14. desember 2022, figur 3.15 viser hvor høy denne prisen er sammenlignet med tidligere år. Det kan også være store variasjoner i spotprisen i løpet av et døgn.[71] Særlig det siste året har det vist seg at det er utfordrende å forutsi fremtidig pris. Faktorer som ressurstilgang, overføringskapasitet, økonomisk utvikling og konflikter påvirker alle strømprisen.[72]

Norge er del av et felles nordisk kraftmarked, som er en del av det Europeiske markedet. På Nord Pool fastsettes markedsprisen for strøm. Nord Pool er et aksjeselskap eid av Euronext og TSO Holding som representerer de nordiske og baltiske stamnettoperatorene, deriblant norske Statnett. Selskapet organiserer og driver en markeds plass for handel med elektrisk energi.[73] Nord Pool kan også betegnes som en kraftbørs hvor man kan forhandle



Figur 3.15: *Strømpris sone NO3 uten MVA.*

kraft på tvers av landegrenser. Kraftutvekslingen gjør at ulike landenes kraftsystemer kan utfylle hverandre, ved at kraften til enhver tid skal gå fra områder med lav pris til områder med høy pris.[74]

Ulempen med elektrisk strøm sammenlignet med andre energikilder er at den egner seg dårlig for lagring. På grunn av dette må det til enhver tid være balanse mellom forbruk og produksjon. Strømmens markedspris bestemmes av tilbud og etterspørsel. I Norge, hvor mye av kraften kommer fra vannkraft, har nedbørmengde og vanntilsig til magasinene stor påvirkning på produksjonskapasiteten, som dermed påvirker strømprisen. Og når utetemperaturen er lav øker forbruket til oppvarming, dermed øker også strømprisen. I tillegg vil overføringsforholdene mellom ulike områder påvirke prisene. Prisene varierer både gjennom sesonger og gjennom døgnet. [75] [74]

3.7.2 Nettleie

Nettleien er kostnaden kunden betaler til nettselskapene for at strømmen fraktes til kunden. Nettleien består av tre ledd; statlige avgifter, et fastledd og et energiledd.[76] I 2021 vedtok regjeringen at en ny nettleiemodell skulle innføres, denne ble innført 1. juni 2022. Hovedforskjellen fra forrige nettleiemodell er et energiledd som varierer mellom dag og natt og et fastledd som avhenger av effektuttak. Energileddet bestemmes av strømforbruket, og hvor stor andel av dette som brukes dag og natt. Fastleddet regnes ut ifra snittet av de tre timene hver måned (fordelt på tre forskjellige dager) med høyest effektuttak. Jo høyere dette snittet er, desto høyere blir fastleddet, denne økingen skjer trinnvis. Målet for den nye nettleieordningen er å øke fleksibiliteten på etterspørselsiden og redusere effektbruken i topplasttimene. [77]

3.8 Fleksibilitet på etterspørselssiden

En økt andel fornybare energikilder i energimiksen gjør at kraftsystemene må være mer fleksible. Fornybare energikilder som vindkraft og solkraft er avhengige av når vinden blåser og sola skinner, og siden elektrisiteten som produseres ikke kan lagres, må energien brukes med en gang. [78] I 2030 kommer effektbalansen til å være

strammere. Tidligere ble kraftnettet og -produksjonen utviklet med hensyn til vekst og variasjon i forbruket. Fremover når flere uregulerbare, fornybare energikilder skal implementeres i kraftmarkedet, må nye kilder til fleksibilitet finnes, og på forbrukersiden finnes mange av løsningene. [79]

En måte å oppnå økt fleksibilitet på er å justere behovet for elektrisitet slik at det passer bedre med produksjonen av fornybar energi. Fleksibiliteten på etterspørselssiden (eng. Demand-side flexibility) refererer til mengden etterspørsel som kan reduseres, økes eller flyttes i et spesifikt tidsrom. Denne fleksibiliteten kan oppnås ved at systemoperatøren gis tilgang til å regulere eller gi prissignaler til aktørene på etterspørselssiden. Det finnes mange ulike teknologier som vil gi økt fleksibilitet på etterspørselssiden, blant annet lagring av varme, lagring i elektriske kjøretøy eller smarte apparater. [78]

For å øke etterspørselsfleksibiliteten hos forbrukeren er strømprisen viktig. Den nye nettleieordningen i Norge har som mål å øke fleksibiliteten til brukerne ved å redusere deres effekttopper. I tillegg er strømprisen i seg selv en motivasjon for forbrukerne å justere sitt forbruk etter tilbudet i markedet. Som sagt, avhenger strømprisen av tilbud og etterspørsel, som betyr at strømmen er dyrest når folk flest bruker mest strøm. Dette er som regel på morgenen, kl. 07:00-11:00, og ettermiddagen og kvelden, kl. 17:00-19:00. På natta, fra 02:00-05:00, er prisen ofte lavest. Dette gjelder særlig for vintermånedene, hvor knappheten i markedet er størst. [80] [79] Om forbrukerne stimuleres til å bruke mindre strøm i topplasttimene kan investeringer i nettet utsettes eller reduseres. Derfor vil det gi samfunnsøkonomiske gevinster om forbruket i topplasttimene reduseres. [66]

Energikommisjonen trekker frem i sin rapport om utviklingen i det norske kraftmarkedet, *NOU 2023:3 Mer av alt - raskere*, viktigheten av forbrukerfleksibilitet. Utvikling av fleksibilitet på etterspørselssiden vil være en viktig del av videreutviklingen av dagens markedssystem som følge av endrede forbruks- og produksjonsmønstre. For å oppnå dette må mekanismer og lagringsløsninger som gjør det lettere å flytte forbruket vekk fra topplasttimene utvikles. [79]

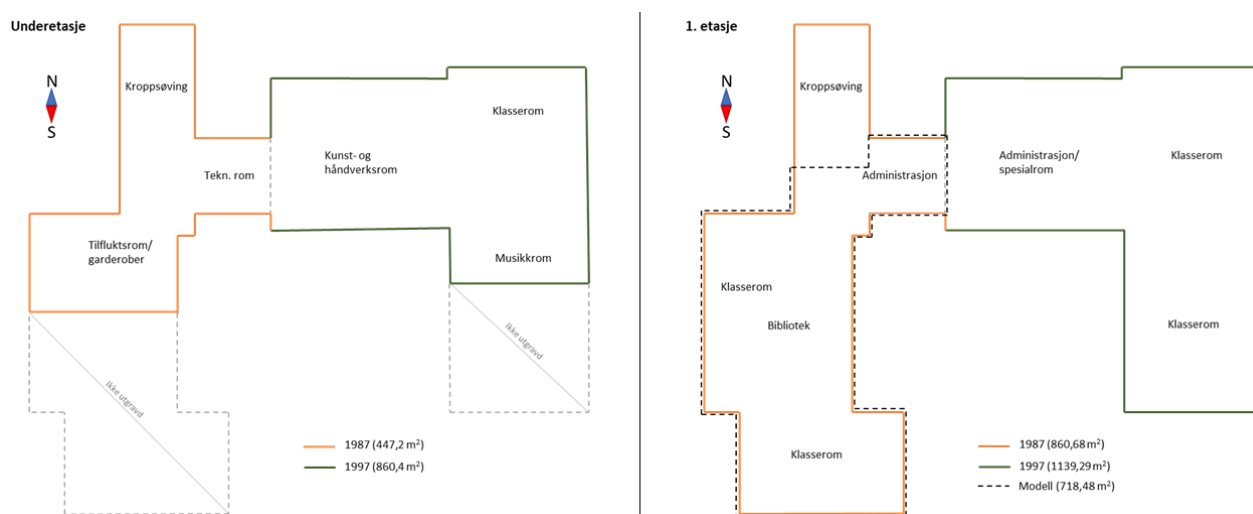
4 Metode

4.1 Konsept for verifisering av besparelser

4.1.1 Energimessig ytelse

For å verifisere de forbedringene som har blitt gjort skal det utvikles en simuleringmodell av skolebygget i simuleringssystemet IDA-ICE. I dag har bygget avansert og utbredt måling av ulike parametere som gjør det mulig å undersøke skolens energibruk og inneklima, men en har ikke tilgang til data som beskriver byggets energibruk og inneklima før oppgraderingen ble utført. Derfor skal bygget simuleres for å se hvordan optimaliseringssystemet påvirker ytelsen til bygget.

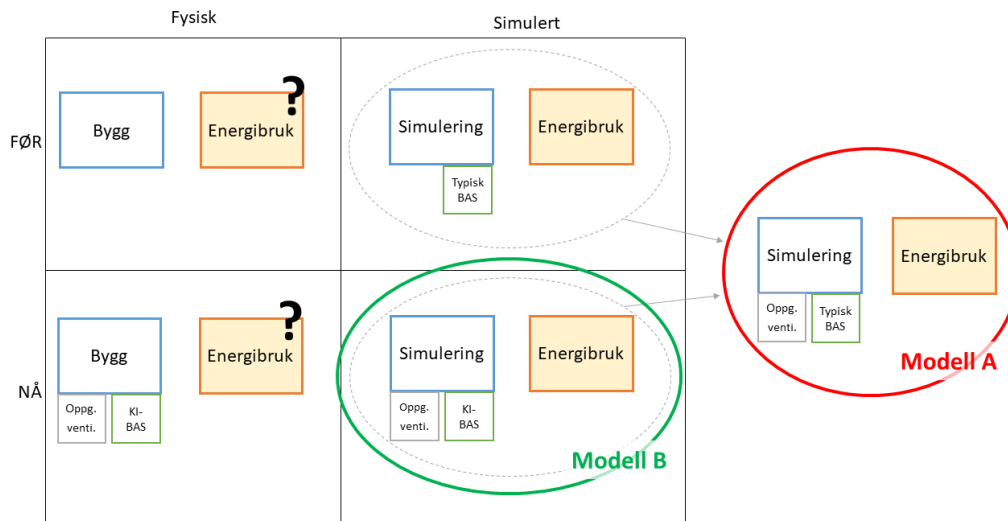
For å redusere arbeidsmengden skal kun en del av bygget modelleres. Det antas at dette likevel vil være av et tilstrekkelig omfang for å vurdere optimaliseringssystemet. Den utvalgte delen er 1. etasje i 1987-fløyen. Det ble valgt å fokusere på 1987-delen fordi det var tilgang på informasjon om ventilasjonssystemet i denne delen, i motsetning til 1997-delen. Videre ble det fokusert på 1. etasje da det er flere rom som brukes her enn i underetasjen. Dette er vist i figur 4.1. I underetasjen er det mye areal som ikke er bygget ut, samt flere rom, blant annet et tilfluktsrom, som ikke er oppvarmet. Denne avgrensningen er mulig fordi det finnes undermålere for strøm.



Figur 4.1: Avgrensningen til simuleringen.

Siden det i 2019 ble gjort flere oppgraderinger for å redusere energibruken, nytt ventilasjonsanlegg i 1987-fløyen og optimaliseringssystemet, skal det nye ventilasjonsanlegget implementeres i modellen for å kunne se effekten av optimaliseringssystemet. Figur 4.2 visualiserer modellen som skal lages. Modellen som skal lages og brukes i verifiseringen, modell A, er en kombinasjon av det nye og det gamle skolebygget. Modellen har et ventilasjonsanlegg tilsvarende det nye, forbedrede anlegget i 1987-fløyen, mens reguleringsmetoden tilsvarende reguleringen før 2019. *Typisk BAS* beskriver hva en kan anta var styringsmetoden før BAS basert på KI ble implementert i 2019. Forskjellen mellom typisk BAS og KI-BAS er hvordan SPT for KI-BAS blir overstyrt for å redusere strømkostnadene.

Innledningsvis var planen å sammenligne det virkelige bygget etter oppgraderingen, nederst til venstre i figur 4.2, med modellen beskrevet over. Men etter analyse av de avleste dataene kom det frem at de avleste dataene for effektbruk ikke kan være reelle. Effektbruken var tydelig for lav i forhold til bygningskroppen og lokale oppvarmingsenheter. Årsaken er trolig at strømmålerne som brukes ikke er egnet for IT-nett, som brukes i de fleste norske bygg, inkludert Halsan skole. Målerne er ment for bruk i bygg med TN-nett, som er vanligst ellers i Europa. På grunn av feilen i disse målingene skal modellen sammenlignes med en modell av dagens bygg, modell B i figur 4.2.



Figur 4.2: Visualisering virkelig bygg versus simuleringmodeller.

4.1.2 Økonomiske besparelser

Når de økonomiske besparelsene skal verifiseres må kostnadene deles inn i to kategorier, strømkostnader og nettleiekostnader. Optimaliseringssystemet har, som forklart i 3.1.4, to hovedmål; 1) bruke strøm når den er billigst for å redusere strømkostnadene, og 2) redusere nettleiekostandene ved å redusere effekttoppene. I denne rapporten vil de økonomiske besparelsene knyttet til strømkostnader verifiseres og analyseres.

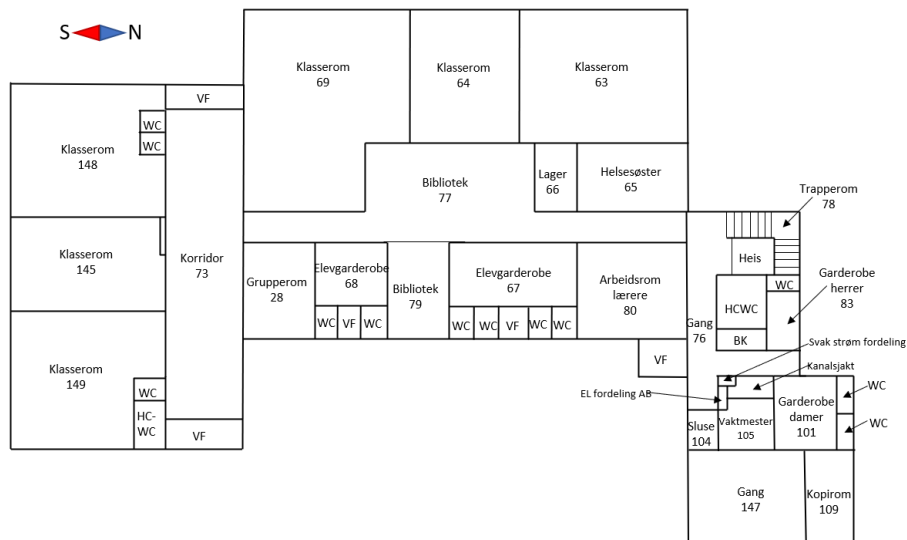
Som forklart i 3.1.4 endres SPT i forhold til strømprisene ved at varme akkumuleres når strømprisen er lav slik at energibruken til oppvarming kan reduseres i periodene hvor strømprisene er høye. Besparelsene knyttet til reduserte strømkostnader skal verifiseres ved å bruke simuleringmodellene laget i IDA-ICE, med henholdsvis typisk BAS og KI-BAS. I modell A, med typisk BAS, brukes en konstant SPT på 22°C. I modell B, med KI-BAS, implementeres de virkelige variasjonene for SPT for den aktuelle perioden. Virkelige værddata for perioden brukes i begge modellene. Deretter brukes den simulerte energibruken fra modellene sammen med strømprisene for den aktuelle perioden for å sammenligne strømkostnadene de to strategiene gir.

4.2 Simulering

I dette delkapittelet følger en beskrivelse av hvordan simuleringsmodellen av Halsan skole er utviklet i IDA-ICE. Dette ble hovedsakelig gjort under arbeidet med fordypningsprosjektet. Beskrivelsen i dette delkapittelet (4.2) er hentet fra fordypningsprosjektet [1]. Noen endringer av metodikken er gjort, disse er lagt til i beskrivelsen. Endringene inkluderer at beliggenhet og orientering er lagt til (4.2.2), oppklaring rundt feil i målingene hentet fra SD-anlegget er lagt til (4.2.7) og fremgangsmåte for predikering av beleggplan er flyttet til kapittelet som omhandler kalibrering av modellen (4.3). Simuleringsmodellen som beskrives i dette delkapittelet omtales videre som basismodellen. Basismodellen er utviklet med tilgjengelige data, og senere skal basismodellen kalibreres ved bruk av avleste data fra det virkelige bygget.

4.2.1 Datagrunnlag

For å utvikle basismodellen av skolen brukes tilgjengelig informasjon om bygget. Levanger kommune har bidratt med informasjon om fløyene fra da de sto ferdige i 1987 og 1997. Disse dataene inkluderer blant annet plantegninger, snittegninger og oversikt over VVS-tekniske og elektriske installasjoner. I tillegg vil informasjon om det nye ventilasjonsanlegget fra 2019 bli tatt i bruk. For å gjenskape driften av ventilasjonen i de ulike rommene skal data fra SD-anlegget brukes. Værdata er hentet fra en lokal værstasjon plassert på taket av skolebygget. Figur 4.3 viser rominndelingen i 1. etasje av nybygget fra 1987.



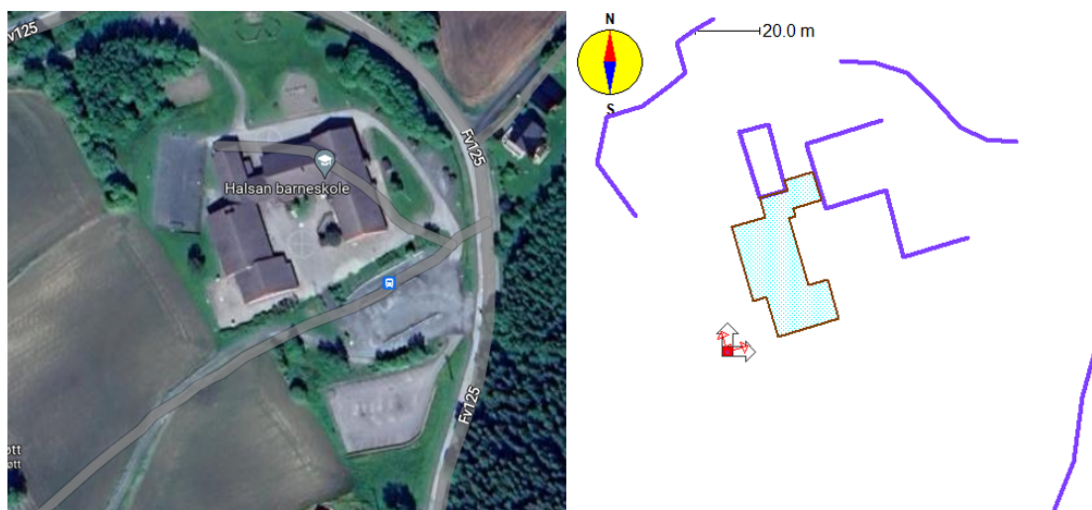
Figur 4.3: Plantegning 1. etasje i 1987-fløyen.

4.2.2 Beliggenhet og orientering

Satellittbilder fra Google Maps er brukt for å finne orienteringen til skolen. Sørveggen er rotert omtrent 17° mot klokka fra sør. Dette er lagt inn i IDA-ICE som vist i figur 4.4. Delene av skolen som ikke er modellert er lagt inn som skyggende elementer, dette er også gjort for skogen på oversiden og nedsiden av skolen. [36]

I IDA-ICE defineres trykkoeffisientene på hver enkelt utvendig flate av modellen. Programmet har tre forhåndsdefinerte maler for automatisk utfylling av trykkoeffisientene. Disse er definert av AIVC (*Air Infiltration and Ventilation*

Centre) og kalt, *Exposed*, *Semi-Exposed* og *Sheltered*. Hvor *Exposed* betegnes som en bygning som står på en åpen flate uten hindringer. *Semi-Exposed* betegnes som et bygg med hindringer i nærheten, men hindringene er lavere enn bygget. *Sheltered* er passende å bruke når hindringene er like høye eller høyere enn bygget. [81] Her er *Semi-Exposed* valgt.



Figur 4.4: Orientering i Google Maps [36] og IDA-ICE med skyggende elementer.

4.2.3 Rom og soner

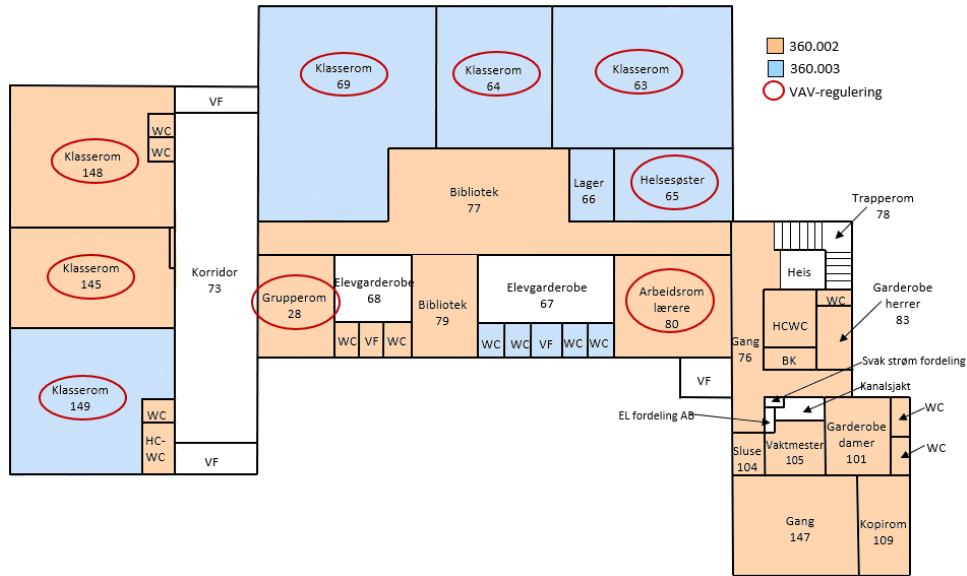
Det er gjort en del forenklinger av rominndelingen for å forenkle modellen. Rom som antas å ha samme temperatur, luftkvalitet og funksjon er slått sammen. I tillegg har ventilasjonsanlegg, fasade og varierende takhøyde vært bestemmende for hvilke rom som er slått sammen. I 1987-fløyen er det veldig ulik takhøyde i de forskjellige rommene. Generelt går taket i rommene som er plassert ut mot ytterveggene helt opp til taket av bygget, dette gjelder for blant annet klasserom 63 (til høyre i figur 4.5). I rommene som er plassert inn mot midten av bygget er takhøyden 2,4 meter, for eksempel bibliotek 77 (til venstre i figur 4.5).



Figur 4.5: Bilder av takhøyden. T.v. Bibliotek (77), døra til Helsesøster (65) t.h. i bildet. T.h. Klasserom (63).

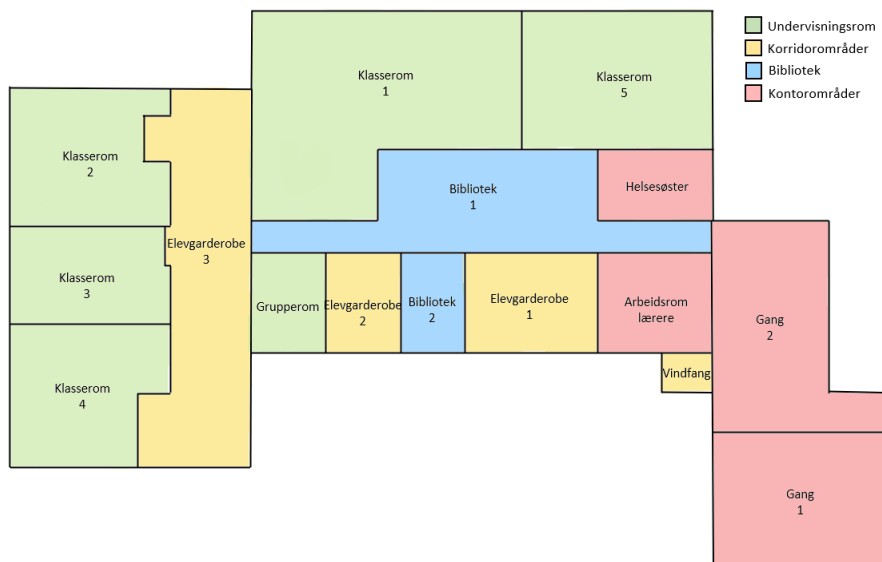
I 1987-fløyen er det to forskjellige ventilasjonsaggregat som forsyner rommene. De er nummerert 360.002 og 360.003. En del rom har behovstyrt ventilasjon (VAV, Variable Air Volume), mens andre har konstante luft-

mengder (CAV, Constant Air Volume). Figur 4.6 beskriver ventilasjonen i rommene.

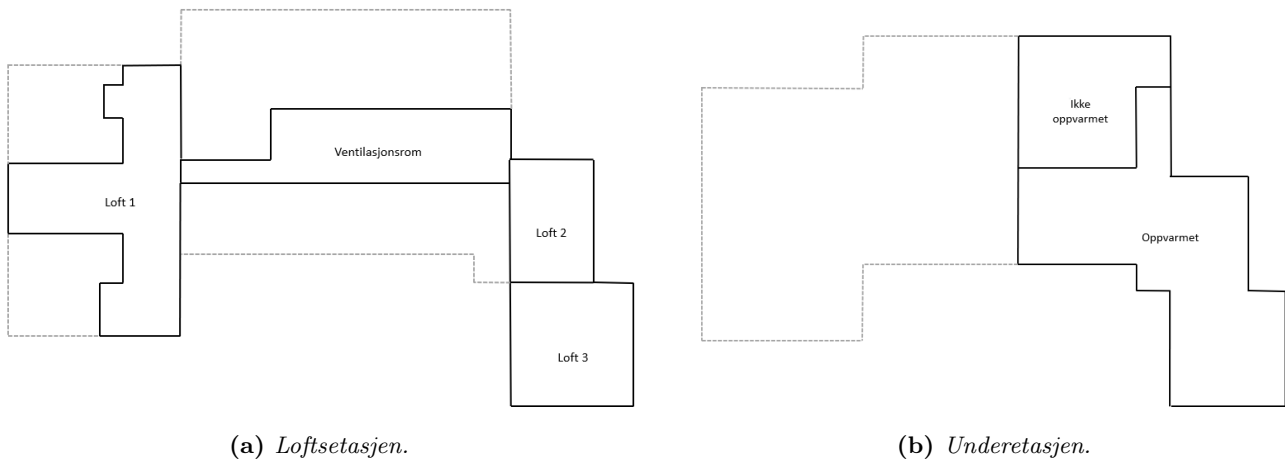


Figur 4.6: Ventilasjonen i rommene i 1987-fløyen.

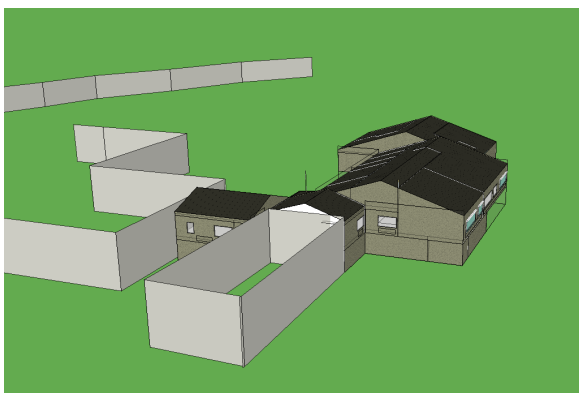
Forutsetningene beskrevet over resulterte i rominndelingen presentert i figur 4.7. Rommene er grovt kategorisert etter romfunksjon. Merk at romnavnene er endret for gjøre modellen mer ryddig, disse romnavnene tilsvarer navnene gitt til sonene i IDA-ICE-modellen. Loftet og underetasjen er også definert i modellen, figur 4.8 viser rominndelingen i disse etasjene. I figur 4.9 vises 3D-modellen i IDA-ICE. Geometrien til bygningen er definert ut i fra plan- og snittegninger med detaljerte mål. Det samme gjelder for plassering og bestemmelse av geometrien til vinduer og dører. For å redusere kjøretiden til simuleringen er vinduene i samme sone, på samme fasade, slått sammen. Dette vil i de fleste tilfeller ikke gi store utslag på resultatene.



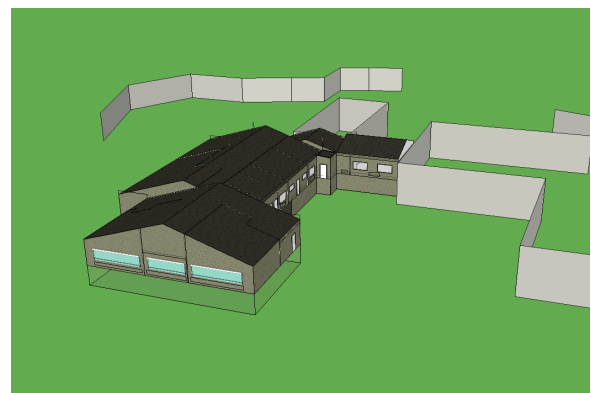
Figur 4.7: Rominndelingen implementert i IDA-ICE.



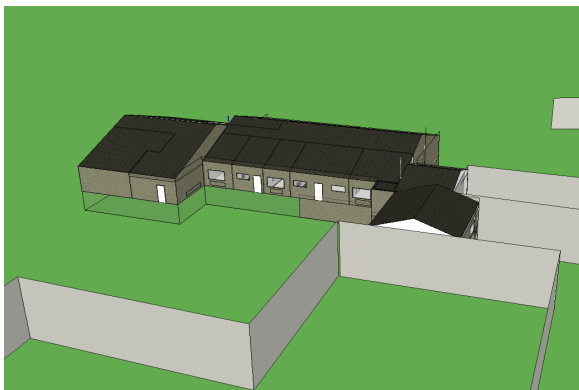
Figur 4.8: Plantegninger loftsetasje og underetasjen i 1987-fløyen.



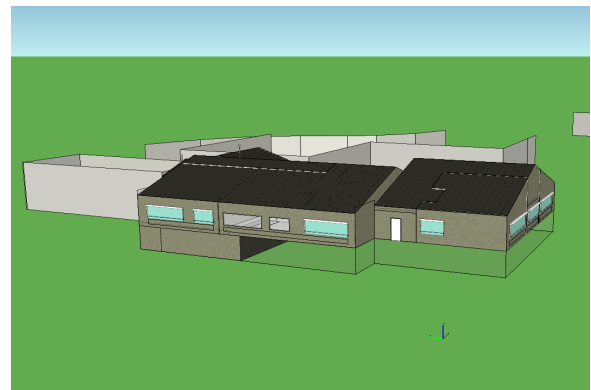
(a) Nordsiden



(b) Sørsiden



(c) Østsiden



(d) Vestsiden

Figur 4.9: Basismodellen i 3D i IDA-ICE.

Under besøk ved skolen ble det oppdaget noen forskjeller mellom plantegningen og bygget slik det er i dag. Dette er presentert i tabell 4.1.

Tabell 4.1: *Avvik fra plantegninger.*

Rom	Avvik
Arbeidsrom lærere	Gjort om til lager og helsesøster-kontor. Kontoret er kun i bruk 2 dager i uka.
Klasserom 3 og 4	Rommene er i praksis slått sammen med en åpen skillevegg. Rommene har ulike sensorer og driftes som to forskjellige rom på SD-anlegget.
Helsesøster	Rommet brukes som grupperom i tilknytning til klasserom 5.

Koblingen mellom klasserom 3 og 4 er modellert ved å sette inn en åpning mellom rommene som alltid er åpen. Det var ikke hensiktsmessig å slå rommene sammen til en sone fordi de har ulik takhøyde og separate systemer for regulering av ventilasjon og varme. Med *Arbeidsrom lærere* og *Helsesøster* gjøres det ingen endringer, men dette kan være nyttig å vite når resultatene skal analyseres.

4.2.4 Bygningskropp

I IDA-ICE implementeres ulike konstruksjoner, for eksempel yttervegger, som en standard (*default*) for denne konstruksjonstypen. Hver gang en ny yttervegg lages i modellen vil den få egenskapene som er definert som standard. Programmet inneholder forhåndsdefinerte standarder for de ulike konstruksjonstypene. For å forenkle modelleringen antas det at alle konstruksjoner innenfor samme kategori er av samme type, dvs. alle yttervegger har samme konstruksjon.

På grunn av lite tilgjengelig informasjon om innvendige konstruksjoner er standardkonstruksjonene gitt i IDA-ICE brukt, med noen endringer i tykkelse og materialer i henhold til snittegninger i den tilgjengelige informasjonen. Detaljert beskrivelse av de innvendige konstruksjonene er gitt i tabell 4.2.

Tabell 4.2: *Innvendige konstruksjoner.*

	Konstruksjon	U-verdi [W/m^2K]
Innvendige vegger og dører	Gips, 26 mm	0,73
	Luft, 20 mm	
	Lett isolasjon, 28 mm	
	Gips, 26 mm	
Innvendig gulv	Gulvbelegg, 100 mm	0,20
	Lett betong, 200 mm	
	Lett isolasjon, 100 mm	

U-verdi eller varmegjennomgangskoeffisient brukes for å angi bygningsdelens varmeisolerende evne [82]. Informasjon om U-verdiene til de utvendige konstruksjonene er ikke tilgjengelig. Snittegningene ga noe informasjon om tykkelsen til veggene og materialene. Det ble tatt utgangspunkt i standardkonstruksjonene i IDA-ICE kombinert med U-verdier fra TEK 85, som var den gjeldende byggeforskriften i 1987 [83]. Beskrivelse av de utvendige

konstruksjonene og deres U-verdier sammenlignet med verdiene fra TEK 85 er presentert i tabell 4.3.

Tabell 4.3: *Utvendige konstruksjoner.*

	Konstruksjon	U-verdi [W/m^2K]	TEK 85 U-verdi [W/m^2K]
Yttervegger	Gips, 30 mm	0,25	0,25
	Isolasjon 150 mm		
	Gips, 5 mm		
	Luft, 20 mm		
	Treverk, 20 mm		
Kjellervegg mot grunn	Gips, 10 mm	0,81	0,80
	Isolasjon, 40 mm		
	Betong, 200 mm		
Gulv mot grunn/uoppvarmet rom	Gulvbelegg, 100 mm	0,29	0,30
	Isolasjon, 110 mm		
	Betong, 400 mm		
Tak	Treverk, 30 mm	0,23	0,23
	Isolasjon, 170 mm		
	Treverk, 20 mm		
	Stein, 50 mm		
Ytterdører		1,98	2,00
Vindu	2-lags	2,70	2,70

Noen av veggflatene er koblet til de resterende delene av bygget. Den hvite flaten i figur 4.9a er koblet til en gymsal som går over to etasjer. I figur 4.9c er den hvite flaten koblet til tilbygget fra 1997. For å simulere dette i IDA-ICE er netto varmeoverføring over disse flatene ignorert.

Krav for minimum normalisert kuldebroverdi og lufttetthet/lekkasjetall er ikke angitt i TEK85. Enova-rapporten *Potensial- og barrierestudie – Energieffektivisering i norske yrkesbygg*, brukes for å bestemme sannsynlige verdier for et bygg bygget på denne tiden [83]. Verdiene implementert i IDA-ICE er presentert i tabell 4.4.

Tabell 4.4: *Konstruksjonsvariabler.*

Variabel	Verdi	Enhet
Normalisert kuldebroverdi	0,06	W/K per m^2 oppvarmet BRA
Lufttetthet, lekkasjetall N50 (vinddrevet)	1,50	$1/h$

4.2.5 Solskjerming

I modellen er det lagt inn utvendig og innvendig solskjerming på de vinduene hvor dette ble observert ved besøk på skolen. Solskjermingen er personstyrt, altså er det vanskelig å predikere når de er nede og oppe. Det antas

at regulering ved hjelp av solinnstråling er en god tilnærming, dette er definert i modellen for all utvendig og innvendig solskjerming. Tabell 4.5 viser en oversikt over rommene med solskjerming.

Tabell 4.5: *Solskjerming.*

Sone	Innvendig solskjerming	Utvendig solskjerming
Klasserom 1	Vinduene i rom 64	Vinduene i rom 69
Klasserom 2		Alle vinduer
Klasserom 3		Alle vinduer
Klasserom 4		Alle vinduer
Klasserom 5		Alle vinduer

4.2.6 Værdata

I IDA-ICE kan man velge å bruke værdata for et normalår ved ulike lokasjoner tilgjengelig i programmets database, eller man kan legge inn en egendefinert *klima-fil*. I denne rapporten er en egendefinert klima-fil brukt. I klima-filen legges værdata for et helt år inn. I basismodellen er værdata fra den lokale værstasjonen ved Halsan skole i 2022 lagt inn. Tabell 4.6 viser en oversikt over verdiene klima-filen inneholder. Tidstrinnet i klima-filen er én time.

Tabell 4.6: *Parameterne i klima-filen.*

Værdata	Enhet
Tørrkuletemperatur	$^{\circ}C$
Luftens relative fuktighet	%
Vindretning	$^{\circ}$
Vindhastighet	m/s
Direkte innstråling	W/m^2
Diffus innstråling på horisontal overflate	W/m^2

4.2.7 SD-anlegget

Tabell 4.7 viser en oversikt over dataene som hentes ut fra SD-anlegget. Disse dataene hentes ut hvert femte minutt. Varmeutgangen til de lokale oppvarmingsenhetene tilsvarer pådraget til enhetene, angitt som en prosentandel av maksimal kapasitet.

Etter innledende analyse av dataene fra SD-anlegget ble det klart at noen av sensorene ikke var godt nok kalibrert. Dette gjaldt målingene av CO_2 -konsentrasjon i rommet, som så ut til å være for lave. Det ble derfor utført kontrollmålinger for å justere verdiene fra SD-anlegget. Dette ble gjort i utvalgte klasserom 06.12.22. Målingene ble gjort ved bruk av Elma DT-802D, som har en nøyaktighet på $\pm 100\text{ppm} \pm 5\%D @ 300\dots 9000\text{ppm}$ [84]. Elma-måleren antas å være relativt godt kalibrert. CO_2 -måleren ble plassert i nærheten av CO_2 -sensoren i hvert av rommene. Avlesning av målingene ble gjort over en periode på minst 15 minutter. Dette ble gjort i

Tabell 4.7: Data hentet fra SD-anlegget.

Data fra SD-anlegget	Enhet
Romtemperatur	$^{\circ}C$
Gulvtemperatur	$^{\circ}C$
Ønsket romtemperatur	$^{\circ}C$
Ønsket gulvtemperatur	$^{\circ}C$
CO_2 -konsentrasjon	<i>ppm</i>
Settpunkt CO_2 -konsentrasjon	<i>ppm</i>
Varmeutgang lokale oppvarmingsenheter	%
Effekt lokale oppvarmingsenheter	<i>W</i>
Tilluftsmengde	<i>L/s</i>

klasserom 1, 2, 3, 4 og 5. De justerete målingene vil brukes i kalibreringen av basismodellen.

4.2.8 Interne laster

De interne lastene er belysning, teknisk utstyr og personer. For å gjøre en nøyaktig simulering av energibalansen er de interne lastene viktig, i tillegg er personene en betydelig kilde til CO_2 som påvirker luftkvaliteten og driften av ventilasjonen. I IDA-ICE legges det inn en timeplan som sier hvor mye de interne lastene påvirker rommet til en hver tid. I basismodellen er verdier fra SN-NSPEK 3031:2021 for skolebygg brukt. [85]

4.2.9 Ventilasjon

Som vist i figur 4.6 er det to forskjellige ventilasjonsaggregat som forsyner denne delen av skolen, disse to aggregatene er av samme type. De to aggregatene er implementert som *Standard Air Handling Unit*, et forhåndsdefinert ventilasjonsaggregat i IDA-ICE, som kan tilpasses ved endring av inndata. Tabell 4.8 viser en oversikt over inndataene.

Tabell 4.8: Inndata til ventilasjonsaggregatene.

Variabel	Verdi	Enhet
Tilluftstemperatur	18,6	$^{\circ}C$
Virkningsgrad varmeveksler	84	%
Virkningsgrad varmebatteri	100	%
Spesifikk vifteeffekt (SFP)	1,39	$kW/(m^3/s)$

SFP og varmevekslerens virkningsgrad er hentet fra databladet til aggregatene. Tillufttemperaturen er basert på gjennomsnittlig tilluftstemperatur januar 2022. Varmebatteriet er elektrisk og det antas derfor at det har en svært høy virkningsgrad, denne er derfor satt til 100 %.

I IDA-ICE kan en for hvert rom velge CAV eller VAV med ulike reguleringsparametere. I rommene med CAV er prosjektert luftmengde, hentet fra innreguleringsprotokollen, lagt inn. I rommene med VAV er det balan-

sert ventilasjon, dette gjelder alle klasserom, grupperom og kontorer. VAV-reguleringen er basert på CO_2 -konsentrasjonen, c_r . I hvert rom er det definert en settpunktskonsentrasjon, c_{ref} , for når luftmengden skal økes. Driftstiden er 06:00-16:00. Generelt kan reguleringssmetoden for rommene med VAV beskrives som i tabell 4.9, metoden gjelder for både hverdager og helger/helligdager. I basismodell er det valgt å implementere den forhåndsdefinerte styringsmetoden *VAV, CO2+temperature* hvor målinger av CO_2 -konsentrasjon og temperatur sammenlignes med settpunktverdier for å justere tilluftsmengden.

Tabell 4.9: *Regulering av tilluftsmengde til rommene med VAV.*

Betingelse	Drift
Utenfor driftstiden	Ingen tilluft
Driftstiden: $c_{ref} < c_r$	100 % av maksimal tilluftsmengde
Driftstiden: $c_{ref} > c_r$	20 % av maksimal tilluftsmengde

4.2.10 Lokal romoppvarming

Dataene fra Levanger kommune gir en detaljert beskrivelse av de lokale oppvarmingsenhetene i hvert rom. SD-anlegget er koblet opp mot disse enhetene og henter ut informasjon om effektbruk i hvert rom. De lokale oppvarmingsenhetene er implementert i IDA-ICE på følgende måte: Panelovene er av typen *Electric Radiator* og har P-regulering med lufttemperatur som reguleringsparameter. Gulvvarmen er av typen *Electric Floor Heating* og har PI-regulering med lufttemperatur som reguleringsparameter. Installert varmeeffekt i hvert rom er listet opp i tabell 4.10.

Tabell 4.10: Lokale oppvarmingsenheter. *Varmepanel i tak.

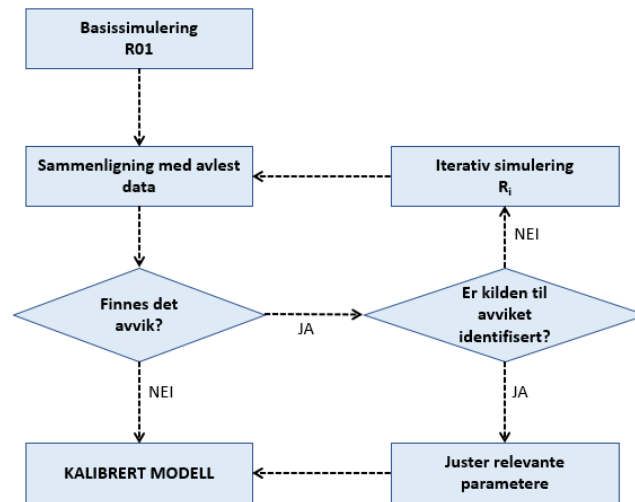
Sone	$Q_{panelovner}[W]$	$Q_{gulvvarme}[W]$
Klasserom 1	3000	2390
Klasserom 2	1800	1900
Klasserom 3	1200	1500
Klasserom 4	1200	1900
Klasserom 5	4000	
Elevgarderobe 1	1200	
Elevgarderobe 2	600	370
Elevgarderobe 3	4400	740
Helsesøster	1200	
Grupperom	600	600
Arbeidsrom lærere	1200	
Bibliotek 1	600	1400
Bibliotek 2	600	900
Gang 1	5100	
Gang 2	2100	
Vindfang		370*

4.2.11 Temperatursettpunkt

SPT settes til å være konstant gjennom hele døgnet, både på hverdager og helger/helligdager i alle soner. I basismodellen er SPT i alle rom i 1. etasje av 1987-delen satt til $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, som er vanlig SPT ved skolen når optimaliseringssystemet ikke brukes. Alle rom i loftsetasjen (figur 4.8a) er uoppvarmet, mens i underetasjen er det en oppvarmet og en uoppvarmet del (figur 4.8b). I den oppvarmede delen i underetasjen er det installert ideell oppvarming (*Ideal heating*) med SPT $22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.3 Kalibrering

I dette kapitlet følger en beskrivelse av hvordan basismodellen er kalibrert for å gjøre dens ytelse mest mulig lik den faktiske bygningskroppen. Det tas utgangspunkt i metoden beskrevet i *Calibration of a Building Energy Performance Simulation Model via Monitoring Data* av B. Gucyeter [86]. Metoden er visualisert i figur 4.10. Metoden beskrevet i artikkelen går ut på å justere parametere iterativt frem til en viss grad av nøyaktighet mellom målt og simulert innendørs temperatur, samt målt og simulert energibruk til oppvarming er nådd.



Figur 4.10: Flytskjemaet beskriver metoden for kalibrering.

Etter basissimuleringen $R01$ og hver iterative simulering R_i skal simuleringsresultatene sammenlignes med avleste data. Hovedmålet er å få mest mulig likhet mellom avlest og simulert temperatur. Avleste data for effektbruk kan brukes for å undersøke når de ulike oppvarmingsenhetene er av og på. Sammenligningene gjøres på romnivå. For å undersøke og sammenligne hvordan endringene i SPT påvirker avleste og simulerte data var det nødvendig å kalibrere modellen for en periode med akkumulering av varme. Den valgte perioden er 1.-16. januar 2022, figur 4.11 viser hvordan SPT endrer seg i januar 2022.



Figur 4.11: Variasjoner i SPT januar 2022.

Nå som kalibreringsperioden er valgt må det defineres hvordan dataene skal sammenlignes. B. Gucyeter [86] bruker lineær korrelasjonsanalyse for å sammenligne timeverdier for innendørs temperatur. For å sjekke avviket til simulerte timetemperaturer og månedlige energibruk fra de avleste dataene, brukes feilanalyse med *Root Mean Square Error* og *Mean Bias Error*. I denne rapporten skal simulerte og avleste verdier målt hvert 15. minutt undersøkes. Kalibreringsperioden er kort i forhold til kalibreringen i B. Gucyeter og det er derfor mulig å gjøre detaljerte visuelle sammenligninger. Tabell 4.11 viser iterasjonene av simuleringer R_i som er gjennomført for å kalibrere modellen. Videre forklares tiltakene gjort i de forskjellige iterasjonene.

Tabell 4.11: Oppsummering av iterasjonene i kalibreringen.

Iterasjon	Tiltak	Før	Etter
1	Endring av SPT-kurve	Konstant SPT i alle rom	Lagt inn overstyring av SPT i alle rom.
2	Timeplaner for VAV-ventilasjon og interne laster lagt inn	VAV-ventilasjon med CO_2 og temperatur som reguleringsparameter. Interne laster lagt inn i henhold til NS3031.	Timeplaner for VAV-ventilasjon og interne laster lagt inn som beskrevet i 4.3.2
3	Endring av regulering av gulvvarme og panelovner	Gulvvarme: PI-regulering Panelovner: P-regulering	Gulvvarme: P-regulering Panelovner: PI-regulering
4	Tilpasset SPT for gulvvarme	Samme SPT som panelovner med lufttemperatur som reguleringsparameter	Egen SPT for gulvtemperatur med overflatetemperatur som reguleringsparameter.
5	Justering av effekt fra panelovner i klasserom 2	$Q_{panelovner} = 4000W$	$Q_{panelovner} = 3000W$

4.3.1 Iterasjon 1

I denne iterasjonen ble en SPT-kurve for romtemperaturen, som vist for januar i figur 4.11, lagt inn i alle rom for hele året. I basismodellen var SPT konstant $22\text{ }^\circ C$, nå varierer SPT på samme måte som i det virkelige bygget i denne perioden.

4.3.2 Iterasjon 2

I basismodellen ble SN-NSPEK 3031:2021 brukt for å legge inn interne laster, og den valgte ventilasjonen var VAV-regulert med CO_2 - og temperaturnivå. For å gjøre modellen mer realistisk ble det i iterasjon 2 lagt til timeplaner for interne laster og ventilasjon basert på CO_2 -konsentrasjonen i rommet (c_r). De justerete CO_2 -målingene fra SD-anlegget, justert etter målingene beskrevet i 4.2.7, ble brukt for å predikere antall personer i rommet til enhver tid. Dette ble først forsøkt gjort ved å bruke tidsinvariant massebalanse forklart i 3.4.3 med utgangspunkt i verdiene i tabell 4.12. Etter å ha testet ut denne metoden for klasserom 5 ble det imidlertid konkludert med at forutsetningene for den tidsinvariante massebalanse ikke kunne gjelde for rommet.

Tabell 4.12: *Variabler i massebalansen.*

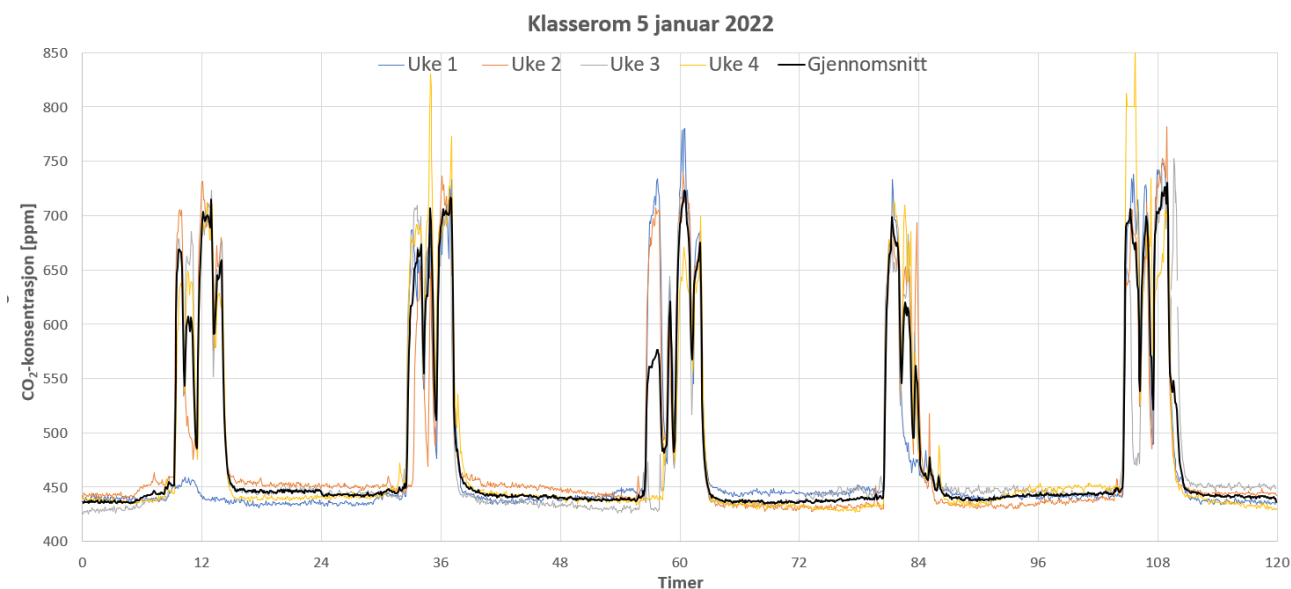
Variabel	Verdi	Enhet
Tilluftskonsentrasjon (c_s)	400	ppm
Romkonsentrasjon (c_r)	Målinger fra SD-anlegget	ppm
Ventilasjonsjonsrate (\dot{V})	Målinger fra SD-anlegget	m^3/h
CO_2 produksjon per person (\dot{M}_p)	19	g/h

Istedenfor å bruke massebalansen, ble målingene av c_r brukt for å indikere når det er personer i rommet. c_r viser tydelig når det er personer til stede i form av en tydelig øking i konsentrasjonen. Dette gjelder for alle klasserommene i 1987-fløyen. Ved besøk på skolen ble det registret normalt antall elever i klasserommene.

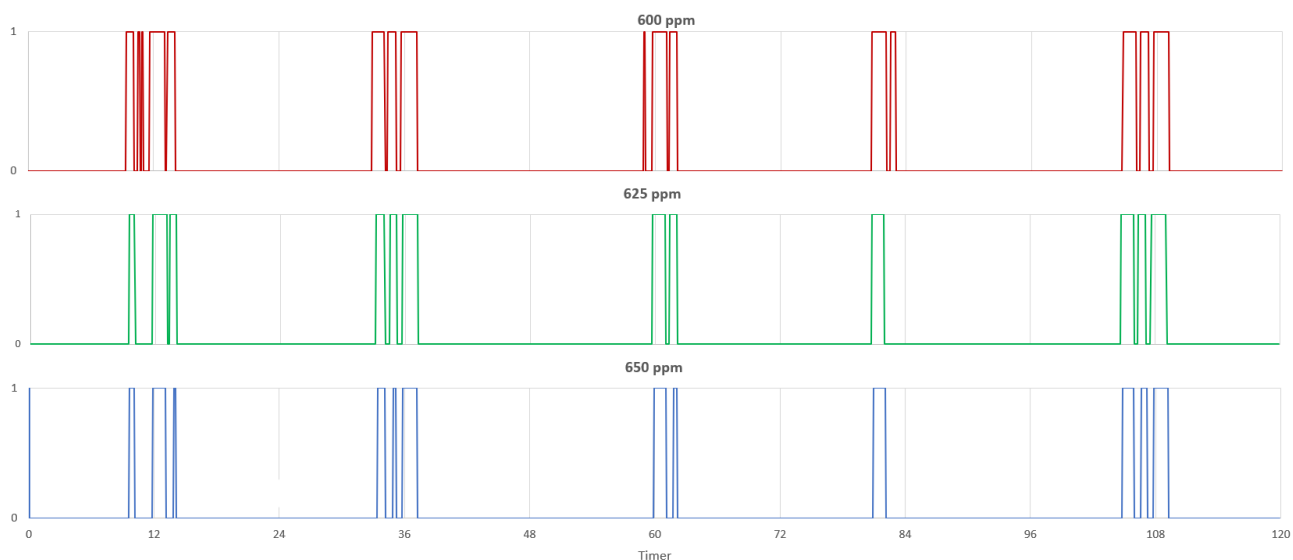
I IDA-ICE legges maksimalt antall personer i hver sone inn, samt en timeplan med verdier fra 0 til 1, som forteller hvor stor andel av det maksimale antallet personer som er til stede til enhver tid. Det legges inn en timeplan for en typisk hverdag og en typisk helgedag/helligdag. I helgedagene/helligdagene legges det inn at ingen er til stede. For hverdagene må en finne en plan som er representativ for alle hverdager. Videre beskrives fremgangsmåten for hvordan en slik beleggsplan ble utviklet for klasserom 5 januar 2022. Denne metoden ble gjentatt for klasserom 1, 2, 3 og 4.

Beleggsplan klasserom 5 januar 2022:

Figur 4.12 viser c_r i de fire ukene i januar 2022, i tillegg er verdiene slått sammen til en gjennomsnittlig kurve. Siden mandag uke 1 var en helligdag ble ikke denne dagen inkludert i utregningen av gjennomsnittet. Toppene til kurvene viser tydelig når det er personer til stede i klasserommet. Videre må det defineres en grenseverdi for c_r som sier noe om når det er personer til stede. I figur 4.13 er ulike grenser testet for gjennomsnittskurven i figur 4.12. Det antas at store deler av klassen er til stede når grenseverdien nås, derfor må grensen settes relativt høyt. I tillegg er det ønskelig med en viss lengde på intervallene, for 600 ppm som grense får en særlig på mandag og onsdag mange veldig korte intervaller. Samtidig ga en høy grense, 650 ppm, færre og veldig korte intervaller, som er lite realistisk. Grenseverdien ble derfor satt til 625 ppm.

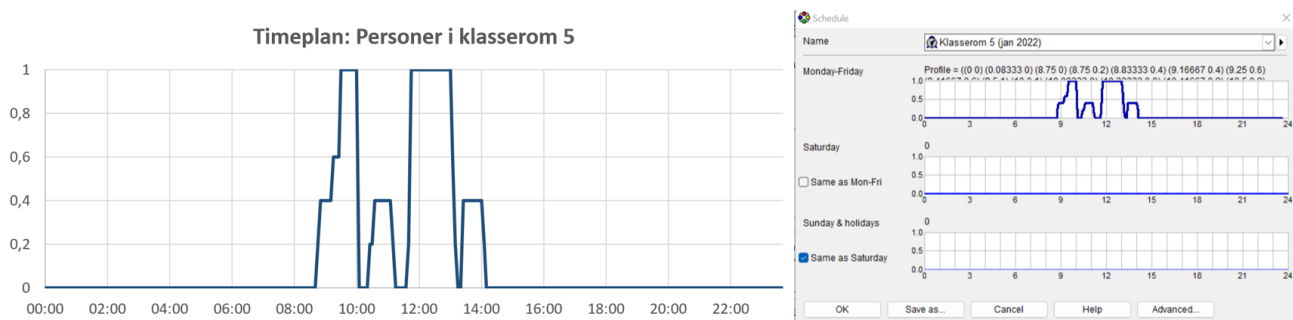


Figur 4.12: CO_2 -konsentrasjon januar 2022 klasserom 5.



Figur 4.13: Ulike CO_2 -grenseverdier for beleggsdeteksjon.

Nå må alle hverdagene presenteres i en timeplan. Dette ble gjort ved å finne gjennomsnittskurven av alle dagene (mandag-fredag), med grenseverdi 625 ppm, presentert i figur 4.13. Fordi det er ønskelig å se på intervaller hvor rommet er fylt til maksimal kapasitet, ble maksimalverdiene i denne timeplanen justert opp fra 0,8 til 1. Den endelige timeplanen for klasserom 5 er vist i figur 4.14, til høyre i figuren er det vist hvordan dette legges inn i IDA-ICE.



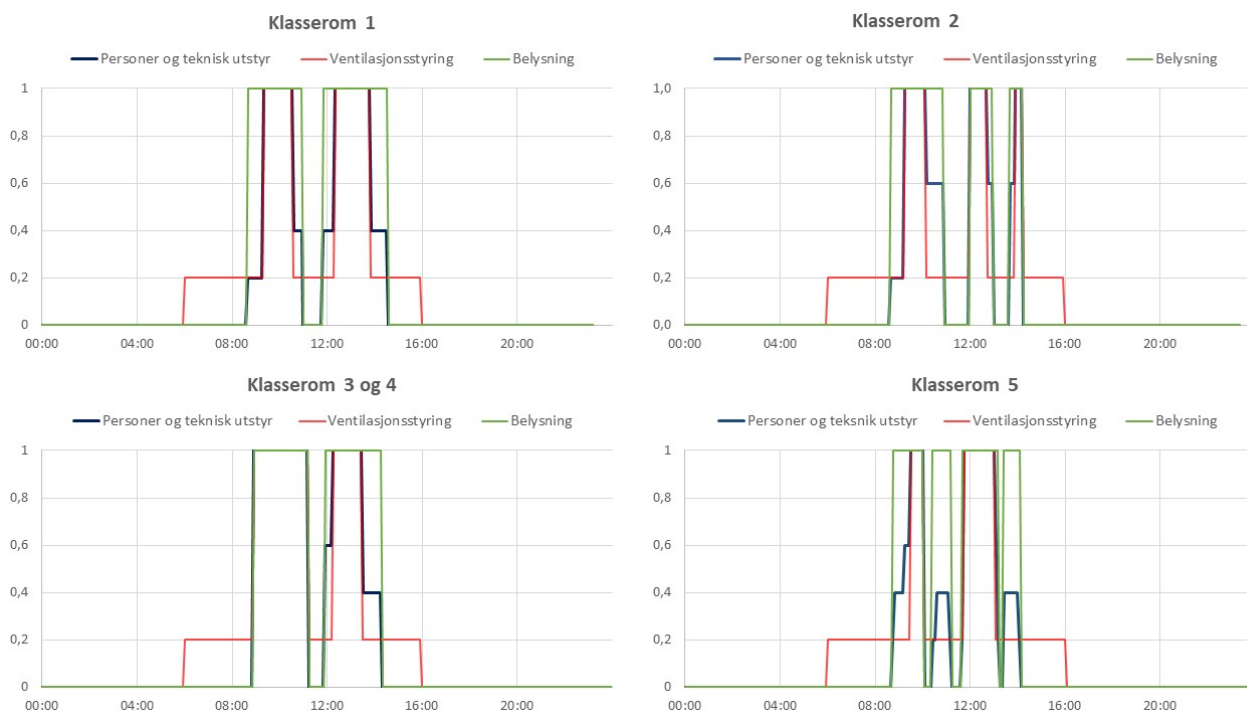
Figur 4.14: Beleggsplan klasserom 5 implementert i IDA-ICE.

I klasserom 5 ble det registrert at maksimalt antall personer til stede er 23 elever og 2 lærere. I IDA-ICE er en person definert som en voksen person. Som presentert i 3.4.1 og 3.4.2 er det stor forskjell på både varmeproduksjonen og CO_2 -produksjonen (\dot{M}_p) til barn og voksne, så med utgangspunkt verdiene presentert antas det at én voksen person tilsvarer 2 barn i alderen 5-13 år. Dette betyr at 23 elever og 2 lærere implementeres i modellen som 13,5 personer med et aktivitetsnivå på 1,0 met. Antall personer er ikke registrert i de andre rommene, derfor brukes samme antall i alle klasserom. Dette kan justeres ut i fra simuleringsresultatene dersom det kommer frem at antakelsen ikke stemmer.

Andre interne laster: Når det kommer til belysning antas det at når det er personer tilstede vil også lyset være skrudd på. Det antas at varmeeffekt avgitt fra teknisk utstyr hovedsakelig kommer fra teknisk utstyr læreren bruker og elevenes datamaskiner. Derfor settes timeplanen for teknisk utstyr til å være lik som personbelastningen. SN-NSPEK 3031:2021 brukes for å finne maksimaleffekten til de interne lastene.

Ventilasjon: Timeplanene for personbelastning gjør det mulig å definere detaljerte timeplaner for VAV-ventilasjonen i klasserommene som stemmer bedre overens med den faktiske reguleringen av ventilasjonen. Den forhåndsdefinerte VAV-reguleringen med CO_2 og temperatur som kontrollparametere byttes ut med VAV definert med en timeplan, *VAV, scheduled*. Den maksimale tilluftmengden til hvert rom defineres i rommenes *Controller Setpoints*. Deretter legges det inn en timeplan som definerer hvor stor tilluftmengden skal være som prosentandel av den maksimale tilluftmengden til enhver tid. Som forklart i 4.2.9 skrus ventilasjonen opp når settpunktskonsentrasjonen nås. Det kommer frem gjennom analyse av rommene at denne settpunktverdien har blitt satt relativt høyt i de fleste rommene. Derfor antas det at ventilasjonen skrus opp når maksimalt antall personer er til stede i rommene. Når det ikke er personer til stede innenfor driftstiden, er luftmengden 20 % av maksimalt nivå.

Alle klasserom: Metoden beskrevet over resulterte i timeplanene for klasserom 1-5 vist i figur 4.15. I Klasserom 3 er ikke CO_2 -sensoren riktig kalibrert, den måler alltid at c_r er lik 2000 ppm, men siden klasserom 3 og 4 henger sammen, kan de regnes som en sone. Sensorverdiene fra klasserom 4 brukes derfor for å lage timeplaner for interne laster i den sammensatte sonen.



Figur 4.15: Timeplaner interne laster og ventilasjon.

4.3.3 Iterasjon 3

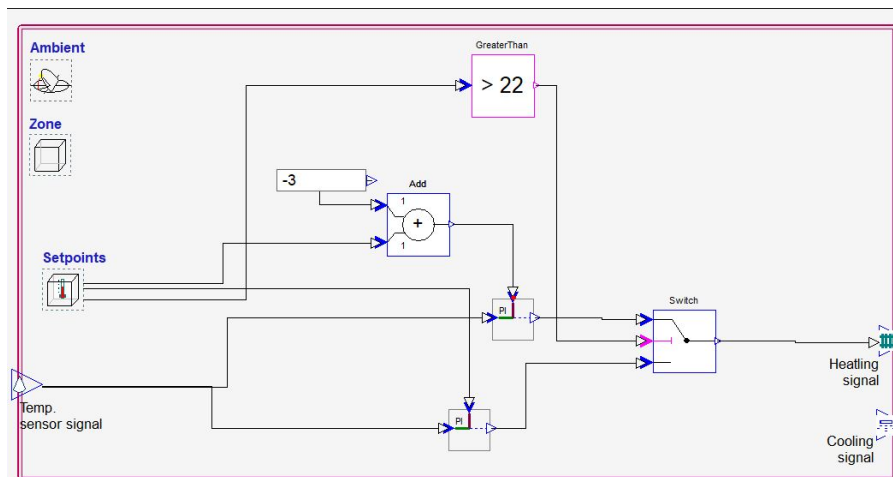
I denne iterasjon endres kontrollen av gulvvarme og panelovner. Reguleringen av gulvvarme ble endret fra PI-regulering til P-regulering, og motsatt for panelovnene. I rom med både gulvvarme og panelovner brukes hovedsakelig gulvvarme til å varme opp rommene, men i noen perioder hvor effektbehovet er høyt, ved lav utendørstemperatur eller økning av SPT, brukes også panelovnene. Den generelle tendensen i de avleste dataene viser at når både panelovnene og gulvvarmen brukes er det godt samsvar mellom SPT og avlest romtemperatur, mens når kun gulvvarmen er i bruk er det et avvik mellom SPT og avlest romtemperatur.

4.3.4 Iterasjon 4

I basismodellen bruker panelovnene og gulvvarmen samme reguleringsparameter, lufttemperatur i rommene. Lufttemperaturen sammenlignes med en SPT-kurve i hvert rom. Systemet overstyres av KI-algoritmen ved å endre på denne SPT-kurven. Uten overstyring er SPT konstant på $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ for både gulvtemperatur og romtemperatur, mens når varme akkumuleres settes ønsket romtemperatur til $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ og ønsket gulvtemperatur til $28\text{ }^{\circ}\text{C}$, dette er vist i figur 4.11. I denne iterasjonen settes overflatetemperaturen til varmekablene som reguleringsparameter for gulvvarmen.

En begrensning i IDA-ICE er at det kun er mulig å ha én SPT-kurve for hver sone, disse er definert under *Controller setpoints*. Altså kan det ikke legges inn en egen SPT-kurve for gulvtemperatur i tillegg til SPT-kurven for romtemperatur. Dette ble løst ved å lage en egendefinert PI-regulering for panelovnene, kalt *PIShifted*, i rommene med både gulvvarme og panelovner. Denne er illustrert i figur 4.16. I disse sonene er SPT-kurven for gulvvarme lagt inn i sonens *Controller setpoints*. Inne i *PIShifted* brukes SPT-kurven for gulvvarme med en

PI-regulator dersom $SPT \leq 22^{\circ}C$. Dersom $SPT > 22^{\circ}C$ trekkes det fra $3^{\circ}C$ i SPT-kurven. Regulatorens K_p og T_i er av samme verdi som i iterasjon 3.



Figur 4.16: Egendefinert regulering av panelovner i rom med gulvvarme og panelovner.

4.3.5 Iterasjon 5

I periodene hvor SPT økes for akkumulering av varme ble det observert at i klasserom 5 øker simulert temperatur mye raskere enn avlest temperatur. Flere tiltak ble prøvd ut for å redusere økningen; endring av veggkonstruksjonene, endring av gulvkonstruksjonen og endring av plasseringen og størrelsen til panelovnene. Alle ga liten eller ingen effekt. Som vist i tabell 4.10 er det installert en samlet effekt på 4 kW fordelt på 4 ovner i rommet. I IDA-ICE er virkningsgraden til panelovnene 100 %. Ovnene i det virkelige bygget antas å ha en dårligere virkningsgrad enn dette da de er ganske gamle, og en lavere tilgjengelig effekt i rommet vil gi en tregere temperaturøkning. Den samlede effekten til panelovnene i klasserom 5 settes derfor til 3 kW .

Etter 5 iterasjoner ble det oppnådd et godt samsvar mellom simuleringsresultatene og de avleste verdiene. Resultatene av kalibreringen presenteres i 5.1. Kvaliteten av kalibreringen og mulige svakheter diskuteres i 6.1.

4.4 Energiytelse

Etter at kalibreringen var fullført ble ulike endringer simulert for å analysere hvordan de påvirker energiytelsen til bygget. Mer spesifikt, hvordan akkumulering av varme påvirker romtemperatur, overflatetemperatur og energibruk. Dette er gjort for klasserom 2 og 5. For å se påvirkningen av sesongvariasjoner er tre perioder undersøkt, 3.-6. januar, 4.-8. april og 6.-9. desember 2022. De simulerte endringene er:

- Ulike SPT-kurver, med og uten akkumulering.
- Ulike starttidspunkt for akkumuleringsperioden. Akkumuleringsperioden avsluttes kl. 05:00 i alle scenariene.
- Ulike akkumuleringstemperaturer, altså ulike SPT under akkumuleringsperioden.
- Ulike kombinasjoner av akkumuleringstemperatur og -lengde.

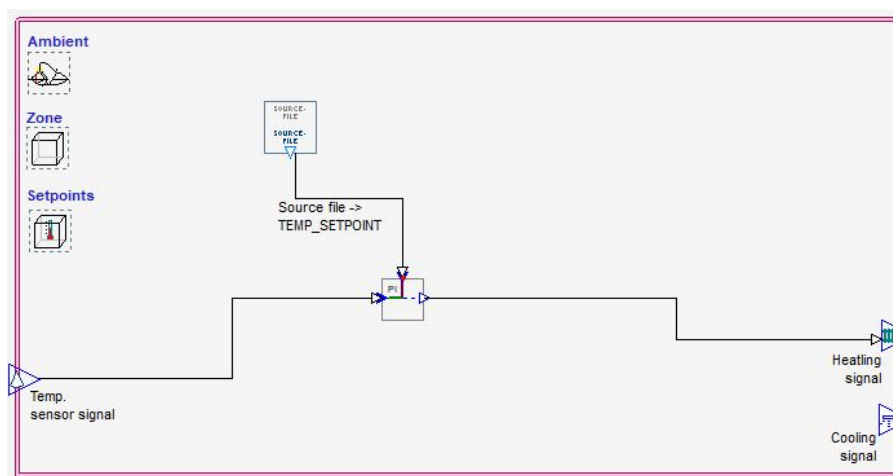
I alle disse simuleringene er endringene utført i *Controller Setpoints*, hvor SPT-kurvene for romtemperatur og gulvtemperatur er endret. Den egendefinerte reguleringen av panelovner i rom med gulvvarme presentert i

4.3.4 brukes i alle scenariene. Videre omtales endringen i akkumuleringstemperatur som endringer i settpunkt for romtemperatur, men når SPT for romtemperaturen endres vil SPT for gulvvarme endres like mye. I alle periodene er akkumulering gjennomført 3 netter på rad.

4.5 Økonomisk verifisering

Fra februar 2023 var bruken av optimaliseringssystemet i gang. Avleste data fra februar til april 2023 har blitt brukt for å gjøre en økonomisk verifisering av optimaliseringssystemet. Klima-filen måtte tilpasses værforholdene i 2023, fordi basismodellen bruker værdata fra 2022. Værdataene i de tre første månedene i klima-filen i basismodellen ble erstattet med værdata fra 2023 (januar-april).

I denne undersøkelsen ble den kalibrerte basismodellen (med værdata fra 2023) delt inn i de to modellene beskrevet i 4.1. I modell A, med typisk BAS, er SPT for romtemperatur og gulvtemperatur konstant 22°C . I modell B, med KI-BAS, er SPT-kurven gitt fra optimaliseringssystemet i sanntid for denne perioden lagt inn. Energibruk og strømpris er brukt for å sammenligne strømkostnadene de to modellene gir. I modell B måtte en egendefinert regulering for panelovner og gulvvarme lages. Her er avlest SPT for romtemperatur og gulvtemperatur lagt inn som kildefiler. SPT-verdiene i kildefilen sendes, istedenfor settpunktsverdiene *Controller setpoints*, til en PI regulator med de samme K_p og T_i som tidligere. Kildefilen gir verdier for SPT med én times mellomrom.



Figur 4.17: Regulering av panelovner og varmekabler med kilde-fil.

4.6 Økonomisk optimalisering

Den økonomiske optimaliseringen er utført for to av de tre periodene undersøkt i 4.4, 3.-6. januar og 4.-8. april 2022. Værdataene fra 2022 er derfor benyttet.

4.6.1 Akkumuleringstemperatur- og lengde

I første del av den økonomiske optimaliseringen ble ulike kombinasjoner av akkumuleringstemperatur og -lengde testet ut med ulike strømprisvariasjoner. De ulike kombinasjonene er lagt inn i IDA-ICE som beskrevet i 4.4.

Målet er å undersøke hvilke kombinasjoner som gir lavest mulig strømkostnad.

4.6.2 Økt termisk masse

I del to av den økonomiske optimaliseringen ble den termiske massen til konstruksjonen undersøket. Mer spesielt ble det undersøkt hvordan økt termisk masse vil påvirke lønnsomheten til akkumuleringen. Tabell 4.13 viser hvordan konstruksjonen er endret. De eksponerte flatene er erstattet med betong, mens U-verdiene til konstruksjonene er de samme som tidligere. Dette medførte at isolasjonen måtte forbedres. De termiske egenskapene til de ulike materialene er vist i tabell 3.2.

Tabell 4.13: *Konstruksjoner med økt termisk masse.*

	Konstruksjon	U-verdi [W/m^2K]
Yttervegger	Betong, 30 mm	0,25
	Isolasjon, 155,5 mm	
	Gips, 5 mm	
	Luft, 20 mm	
	Treverk, 20 mm	
Innvendige vegger	Betong, 26 mm	0,73
	Luft, 20 mm	
	Isolasjon, 45 mm	
	Betong, 26 mm	
Innvendig gulv	Betong, 300 mm	0,20
	Lett isolasjon, 165 mm	
Gulv mot grunnen/uoppvarmet rom	Betong, 250 mm	0,30
	Isolasjon, 125 mm	
	Betong, 400 mm	

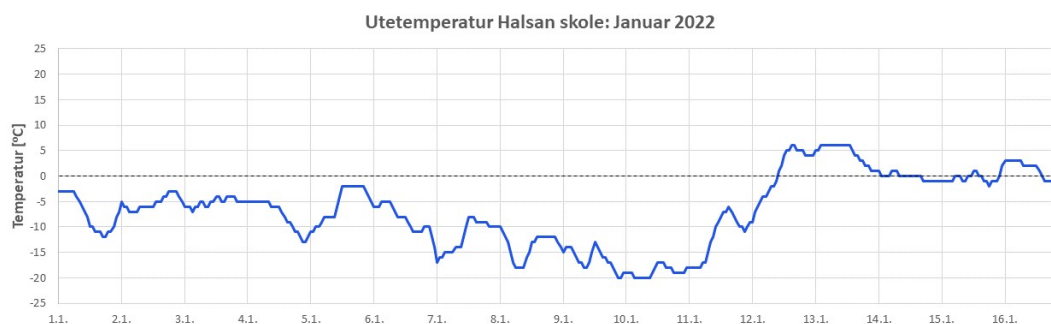
5 Resultater

5.1 Kalibrering

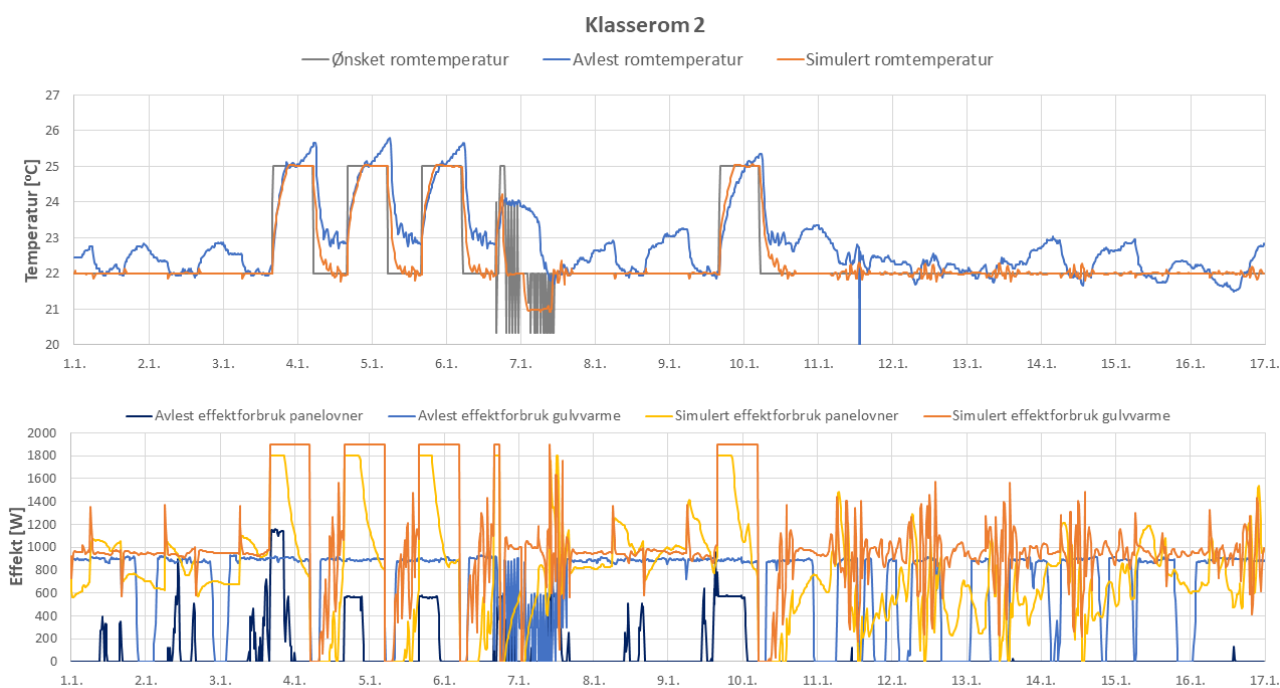
I dette kapittelet følger resultatene fra kalibreringen av basismodellen. Detaljert kalibrering er gjort for to av rommene ved skolen, klasserom 2 og 5. I klasserom 2 er det både elektriske varmekabler og elektriske panelovner, mens i klasserom 5 er det kun elektriske panelovner.

Gjennom kalibreringen har det blitt oppdaget en del mangler i de avleste dataene. Det er tydelig at avlest effektbruk for de lokale oppvarmingsenhetene ikke kan stemme overens med byggets fysikk. Gjennom ulike undersøkelser ved simulering er det konkludert med at maksimal effektbruk i rommene må være 2-3 ganger høyere enn hva de avleste verdiene viser. Avlest effektbruk er likevel noe brukt for sammenligning med de simulerte dataene, fordi det antas at disse målingene viser når de ulike oppvarmingsenhetene er i bruk. Den avleste romtemperaturen antas å stemme bra med virkeligheten.

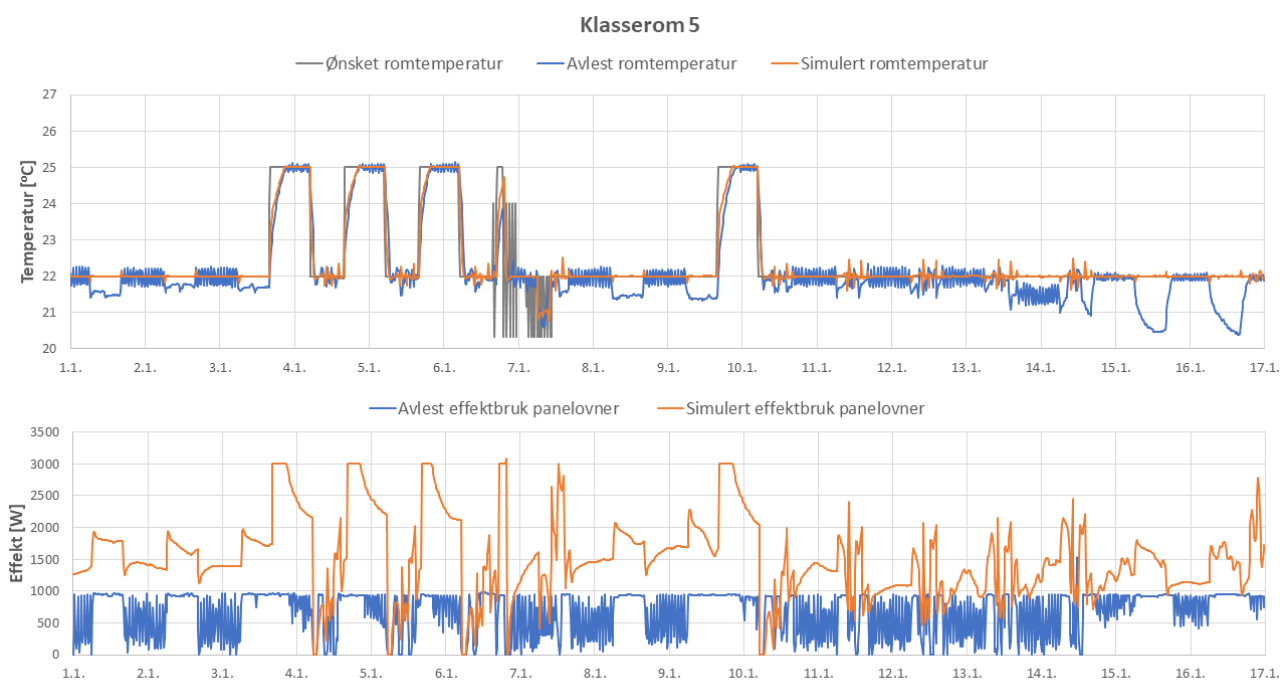
Kalibreringen er gjort med utgangspunkt i 01.01.-16.01.22. Utendørstemperaturen i kalibreringsperioden er vist i figur 5.1. Figur 5.2 viser resultatet av kalibreringen av klasserom 2. Her sammenlignes simulert og avlest romtemperatur, samt simulert og avlest effektbruk til romoppvarming. I tillegg er den virkelige SPT-kurven, *Ønsket romtemperatur*, vist i temperaturgrafene. I figur 5.3 presenteres de samme resultatene fra kalibreringen av klasserom 5.



Figur 5.1: Utendørstemperaturen i kalibreringsperioden.



Figur 5.2: Resultat av kalibrering klasserom 2.



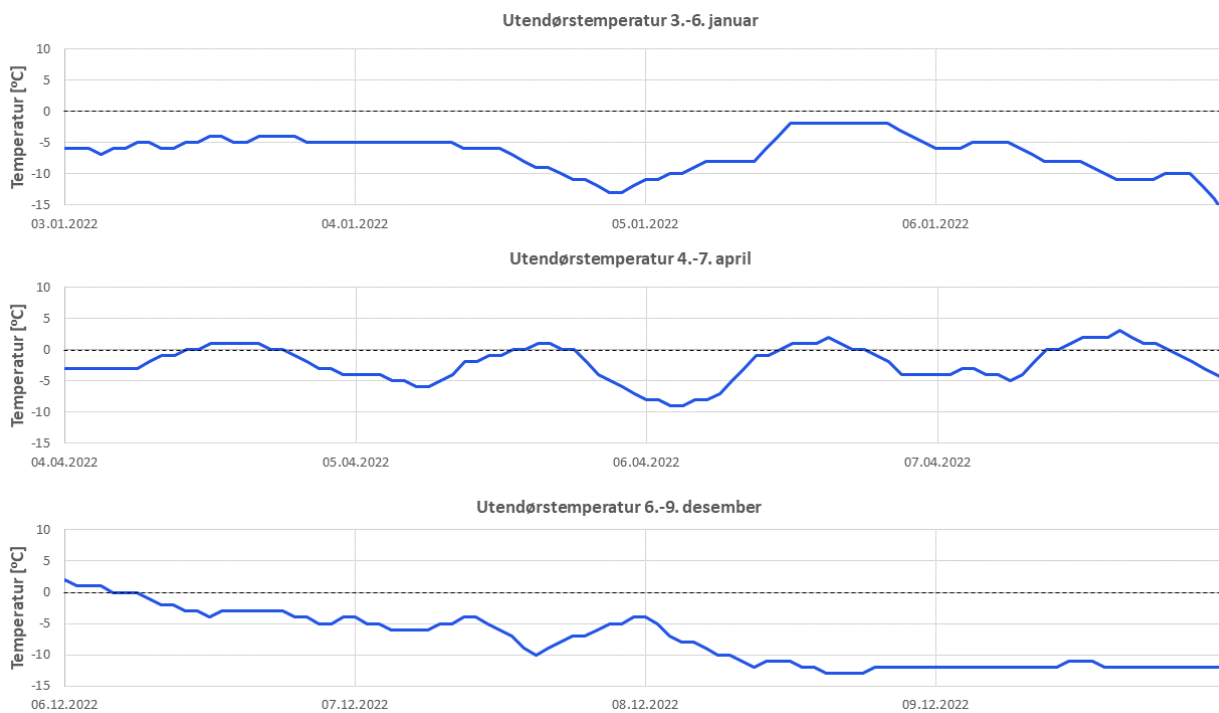
Figur 5.3: Resultat av kalibrering klasserom 5.

5.2 Variasjoner av SPT

I dette kapittelet er ulike SPT-kurver simulert for tre ulike perioder. De valgte periodene går alle over 4 hverdager, som betyr at det er ingen variasjoner i timeplanene for interne laster og ventilasjon fra dag til dag. For å

undersøke hvordan sesongvariasjoner påvirker akkumuleringen av varme i klasserommene er det valgt perioder med relativt ulike utendørstemperaturer, men alle periodene er innenfor oppvarmings sesongen. Utetemperaturen i de tre periodene er vist i figur 5.4.

De tre SPT-kurvene som er simulert er konstant $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (*22 konstant*), konstant $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (*25 konstant*) og endring av SPT mellom $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (*KI*). *KI*-scenariet tilsvare hvordan optimaliserings systemet kan overstyre SPT for å akkumulere varme.

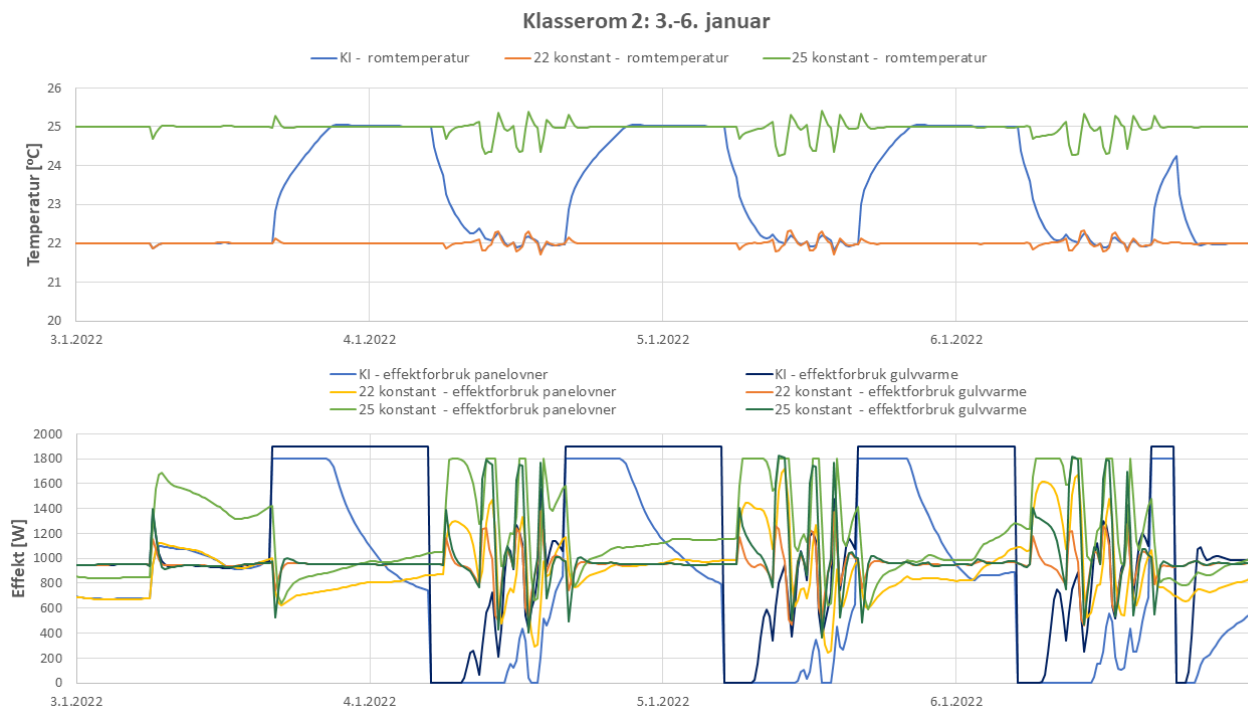


Figur 5.4: Utendørstemperaturen i de tre undersøkte periodene.

Figur 5.5, 5.6 og 5.7 viser hvordan romtemperatur og oppvarmings enhetenes effektbruk i klasserom 2 varierer med ulike SPT-kurver i periodene 03.01.-06.01.22, 04.04.-07.04.22 og 06.12.-09.12.22. Figur 5.8, 5.9 og 5.10 viser de samme resultatene fra klasserom 5 i de samme periodene.

5.2.1 Sesongvariasjoner

Figur 5.11 (klasserom 2) og 5.12 (klasserom 5) viser tydeligere hvordan sesongvariasjoner påvirker effektiviteten til akkumuleringen. I figurene sammenlignes den totale effektbruken til oppvarmings enhetene med (*KI*) og uten (*konstant 22 °C*) akkumulering. I figurene angis økt energibruk på natta (16:00-05:00) og redusert energibruk på dagen (05:00-16:00) ved bruk av *KI* som prosentvis forskjell fra *konstant 22 °C*. I figurene er tre perioder, alle på 24 timer, presentert. Alle periodene er på hverdager, altså er interne laster og ventilasjon lik i de tre periodene.



Figur 5.5: Ulike SPT-kurver, klasserom 2, januar.



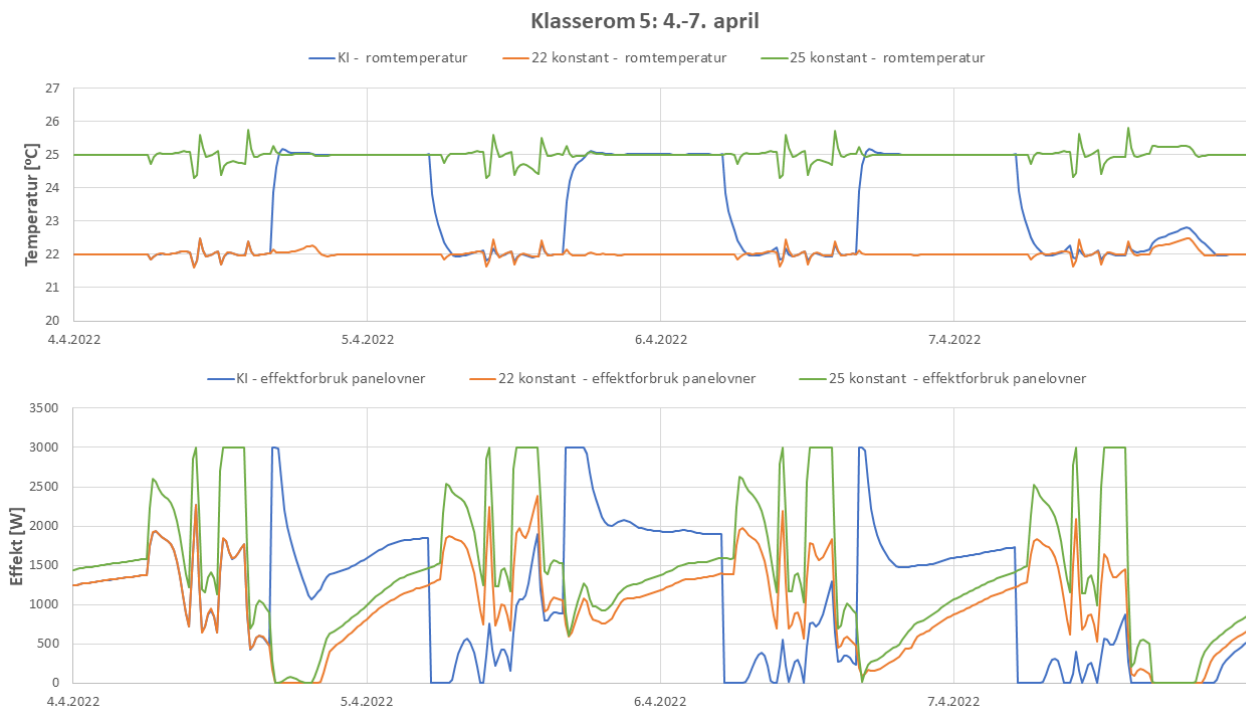
Figur 5.6: Ulike SPT-kurver, klasserom 2, april.



Figur 5.7: Ulike SPT-kurver, klasserom 2, desember.



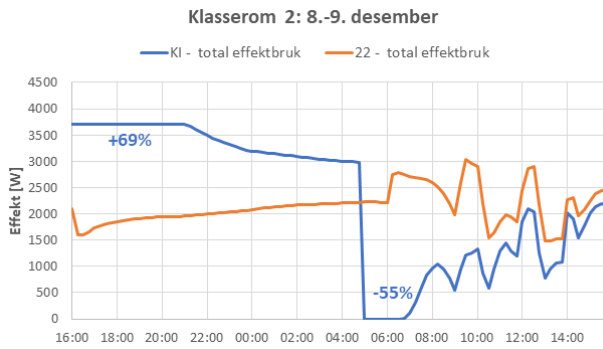
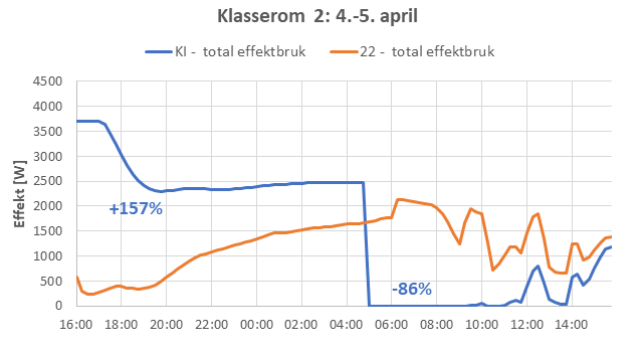
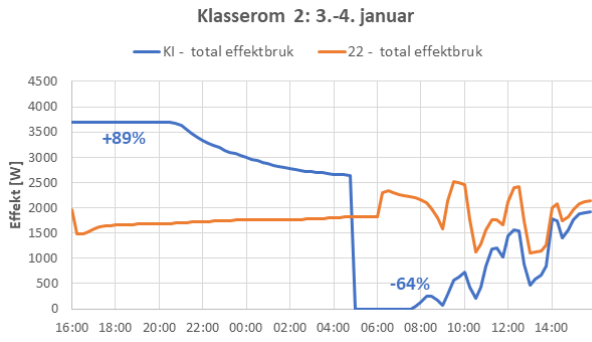
Figur 5.8: Ulike SPT-kurver, klasserom 5, januar.



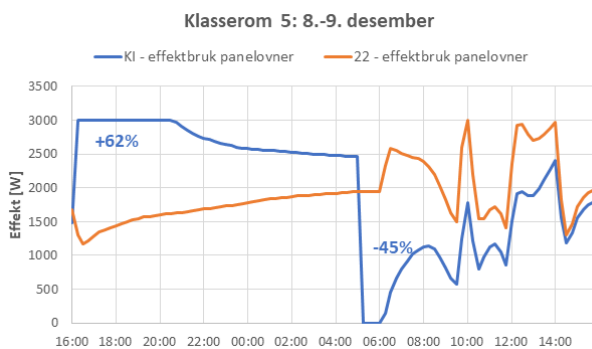
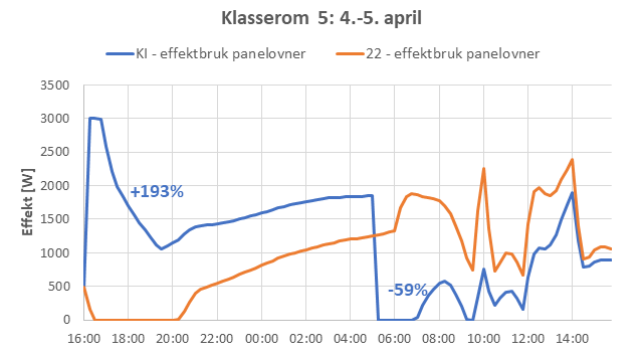
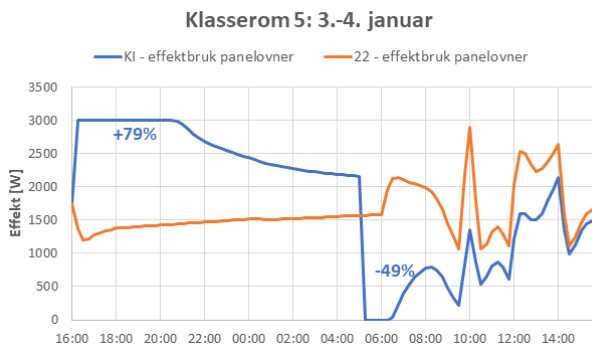
Figur 5.9: Ulike SPT-kurver, klasserom 5, april.



Figur 5.10: Ulike SPT-kurver, klasserom 5, desember.



Figur 5.11: Energibruk med og uten akkumulering, klasserom 2.



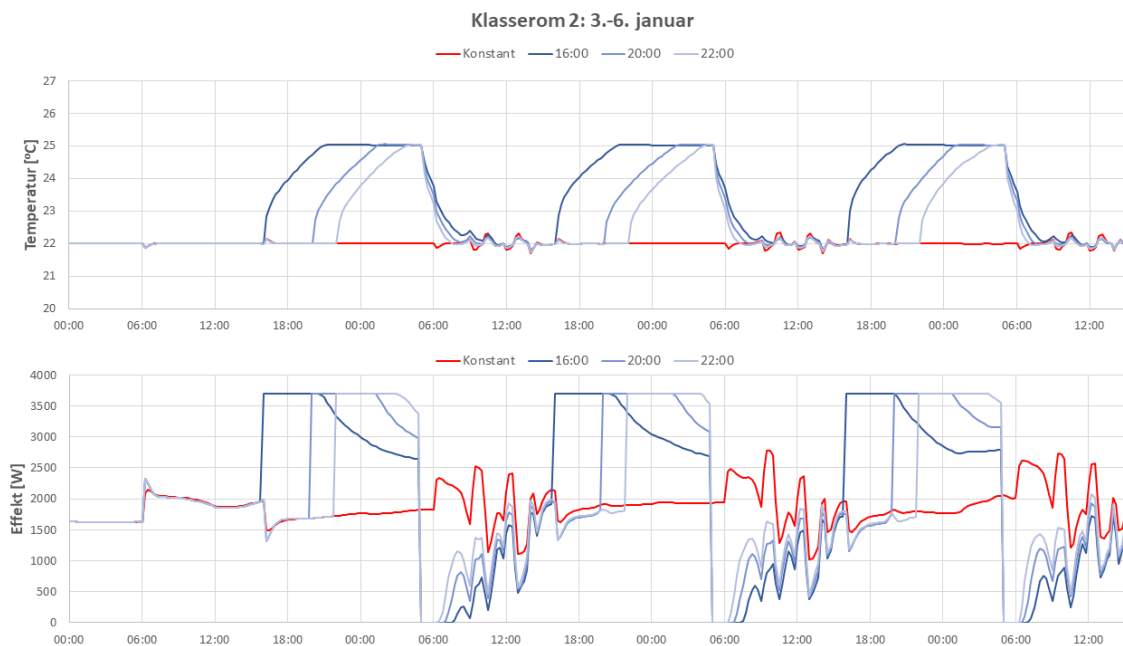
Figur 5.12: Energibruk med og uten akkumulering, klasserom 5.

5.3 Akkumuleringsperiode variasjoner

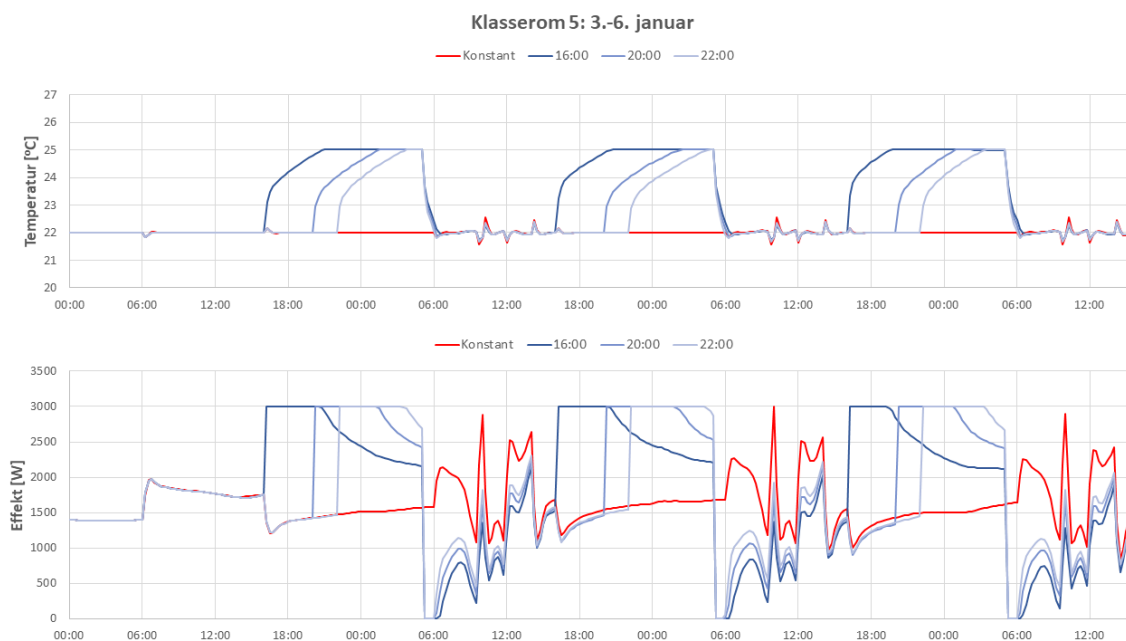
Her presenteres resultatene fra simuleringene hvor lengden på akkumuleringsperioden og akkumuleringsstemperatur er variert. Utgangspunktet for variasjonene er en akkumuleringsperiode fra 16:00-05:00 ved akkumuleringsstemperatur 25°C . Dette tilsvarer akkumuleringsperioden undersøkt i 5.2. Alle resultatene er sammenlignet med basisscenariet uten akkumulering hvor SPT er konstant 22°C . Simuleringene er gjort for perioden 03.01-06.01.22.

5.3.1 Starttidspunkt

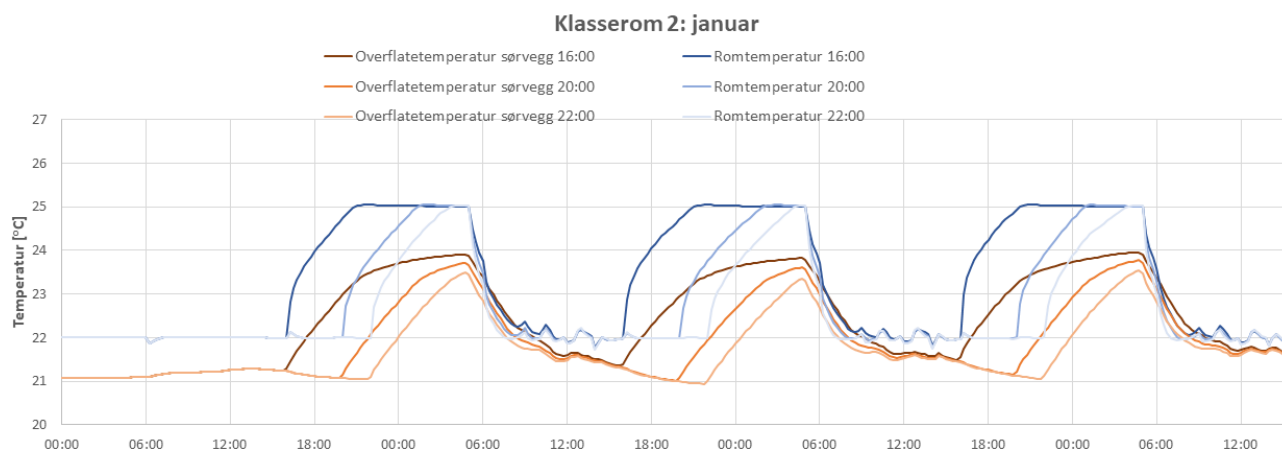
I simuleringene av ulike lengder på akkumuleringsperioden er det tatt utgangspunkt i at akkumuleringen avsluttes kl. 05:00. Dette sikrer at romtemperaturen er redusert nok når elever og lærere kommer til skolen. Sluttidspunktet tar også hensyn til at strømprisen ofte begynner å øke mellom kl. 06:00-07:00. For å variere lengden på akkumuleringsperiodene er det derfor simulert ulike starttidspunkt. Kl. 16:00 er starttidspunkt i basisscenariet. De fleste dager synker strømprisen utover kvelden, derfor er to senere tidspunkt testet ut, kl. 20:00 og 22:00. Figur 5.13 og 5.14, for henholdsvis klasserom 2 og 5, viser resultatene av simuleringen av de ulike starttidspunktene. I alle scenariene er akkumuleringsstemperaturen 25°C . I figur 5.15 presenteres det hvordan overflatetemperaturen til en av veggene i klasserom 2 påvirkes av de ulike starttidspunktene.



Figur 5.13: Resultat av ulike lengder på akkumuleringsperioden, klasserom 2.



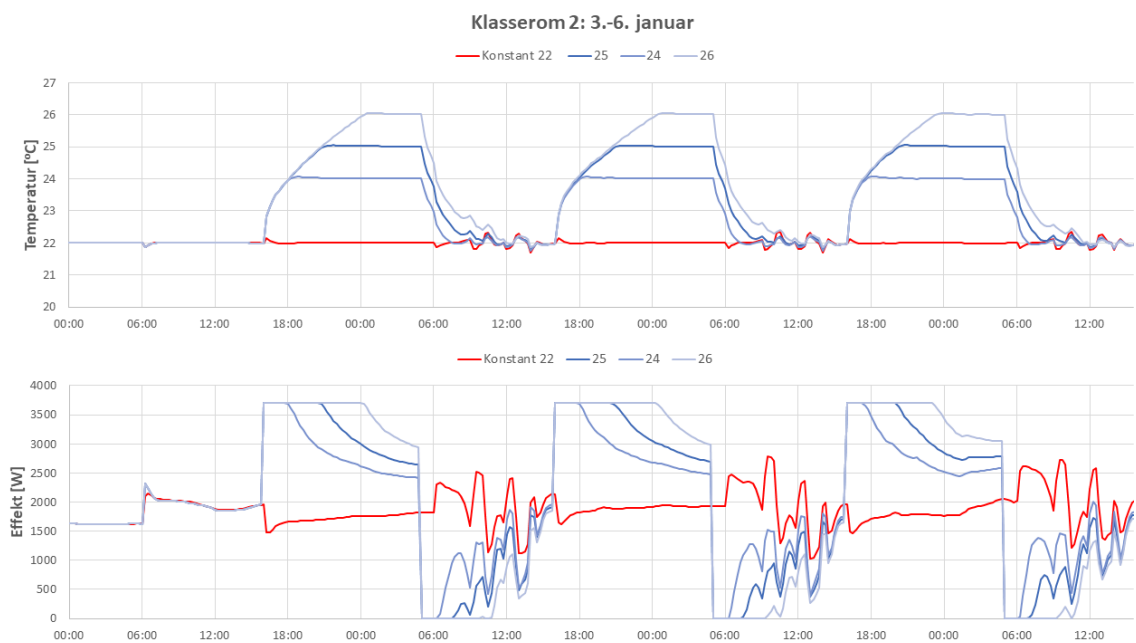
Figur 5.14: Resultat av ulike lengder på akkumuleringsperioden, klasserom 5.



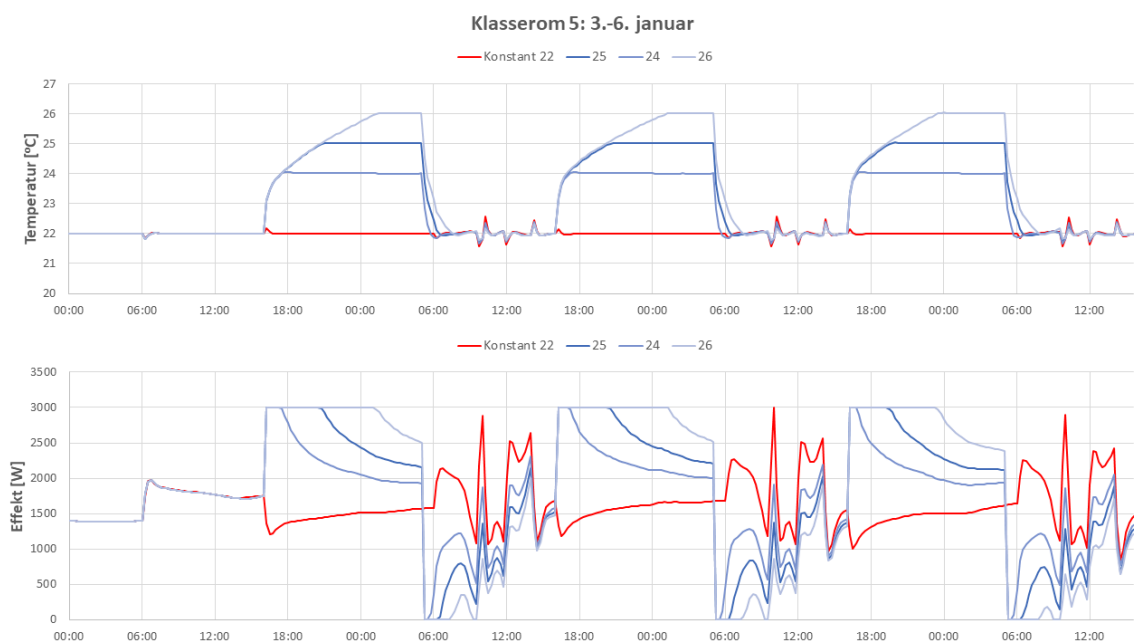
Figur 5.15: Overflatetemperaturer ved ulike starttidspunkt for akkumuleringsperioden, klasserom 2.

5.3.2 Akkumuleringstemperatur

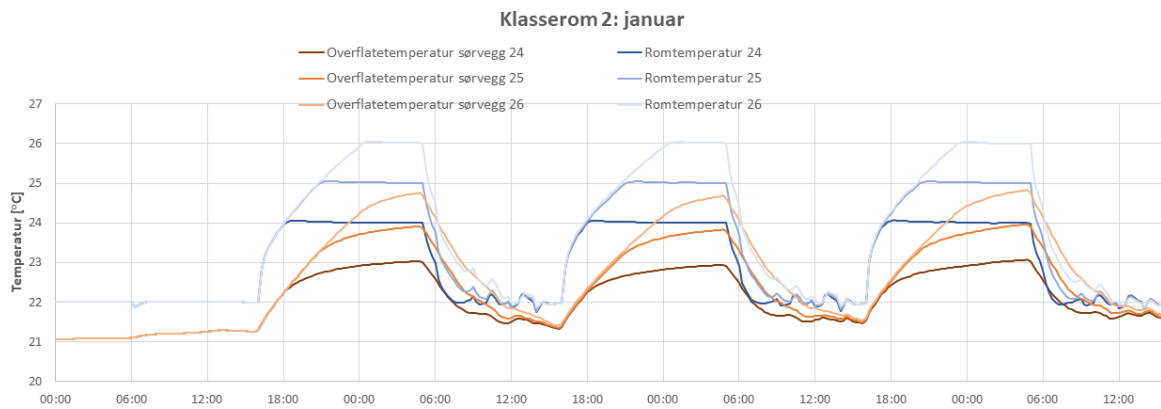
I simuleringene av ulike akkumuleringstemperaturer (SPT i akkumuleringsperioden) er det testet ut både lavere (24°C) og høyere akkumuleringstemperatur (26°C). Figur 5.16 og 5.17, for henholdsvis klasserom 2 og 5, viser resultatene av ulike akkumuleringstemperaturer. I alle scenariene er akkumuleringsperioden kl. 16:00-05:00. I figur 5.18 er det presentert hvordan overflatetemperaturen til en av veggene i klasserom 2 påvirkes av de ulike akkumuleringstemperaturene.



Figur 5.16: Resultat av ulike akkumleringstemperaturer, klasserom 2.



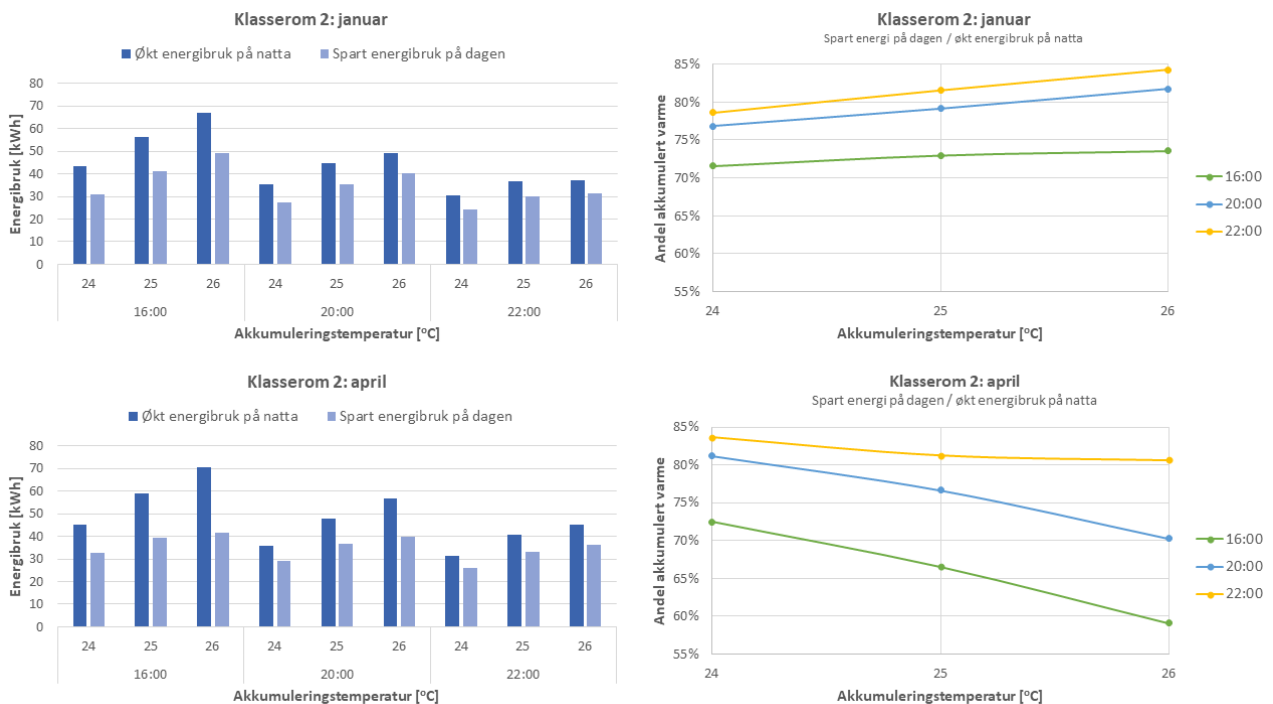
Figur 5.17: Resultat av ulike akkumleringstemperaturer, klasserom 5.



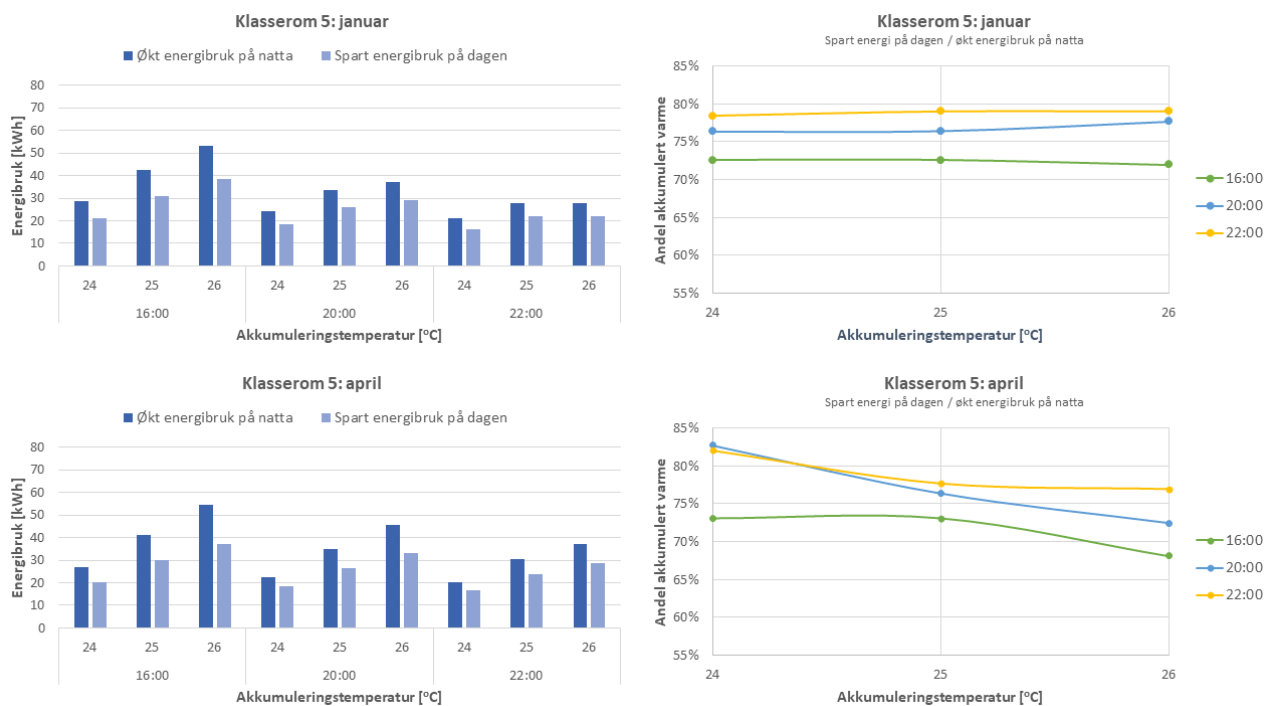
Figur 5.18: Overflatetemperatur ved ulike akkumuleringstemperaturer klasserom 2.

5.3.3 Kombinasjoner av starttidspunkt og akkumuleringstemperatur

Videre ble de ulike starttidspunktene kombinert med de ulike akkumuleringstemperaturene. Dette ble gjort både for perioden i januar (03.01.-06.01.22) og april (04.04.-07.04.22). Resultatene er vist i figur 5.19 og 5.20, for henholdsvis klasserom 2 og 5. Diagrammene til venstre viser størrelsen på den økte energibruken på natta, samt spart energibruk på dagen sammenlignet med basisscenariet uten akkumulering (SPT konstant lik 22°C). I grafene til høyre er forholdet mellom spart energibruk på dagen og økt energibruk på natta for de ulike kombinasjonene sammenlignet.



Figur 5.19: Resultat variasjoner av akkumuleringsperioden, klasserom 2.

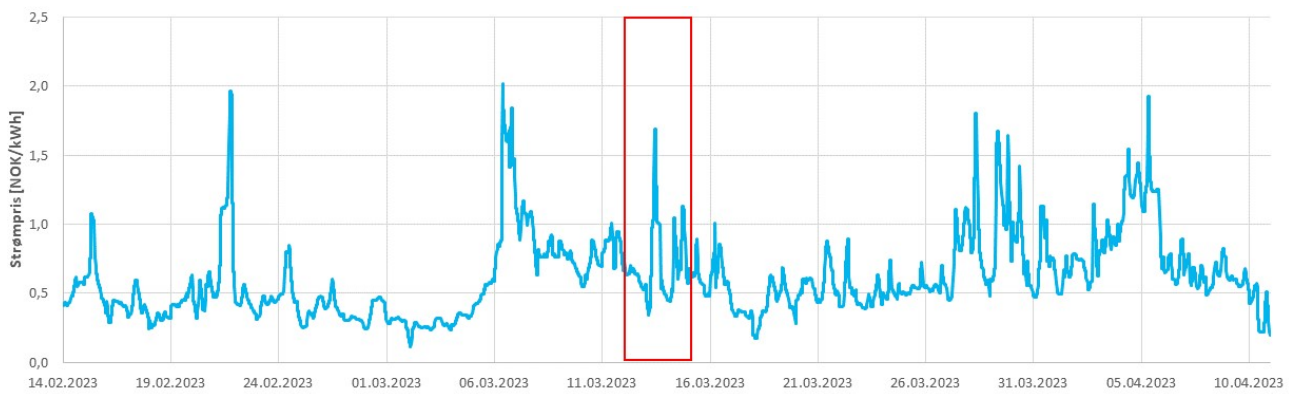


Figur 5.20: Resultat variasjoner av akkumuleringsperioden, klasserom 5.

5.4 Økonomisk verifisering

For å verifisere de økonomiske besparelsene ved bruk av optimaliseringssystemet, ble de avleste dataene fra SD-anlegget undersøkt for å finne en sammenhengende periode hvor overstyring av SPT skjer aktivt. Bruken av optimaliseringssystemet kom i gang fra februar 2023, og fra 14. februar til 10. april brukes det sammenhengende. Heretter betegnes scenariet med virkelig variasjoner i SPT styrt av optimaliseringssystemet som *KI-SPT*, og scenariet med SPT konstant $22^{\circ}C$ som *22 konstant*.

Strømprisene har stor påvirkning på lønnsomheten til systemet. Figur 5.21 viser hvordan strømprisen varierer gjennom verifiseringsperioden. Dette er strømprisen i sone NO3 - Midt-Norge uten MVA. For å vise hvordan optimaliseringssystemet presterer spesielt bra i perioder med store variasjoner i strømprisen, er perioden markert i figuren, 12.03-14.03 2023, undersøkt i detalj. Utendørstemperaturen i samme periode er presentert i figur 5.22



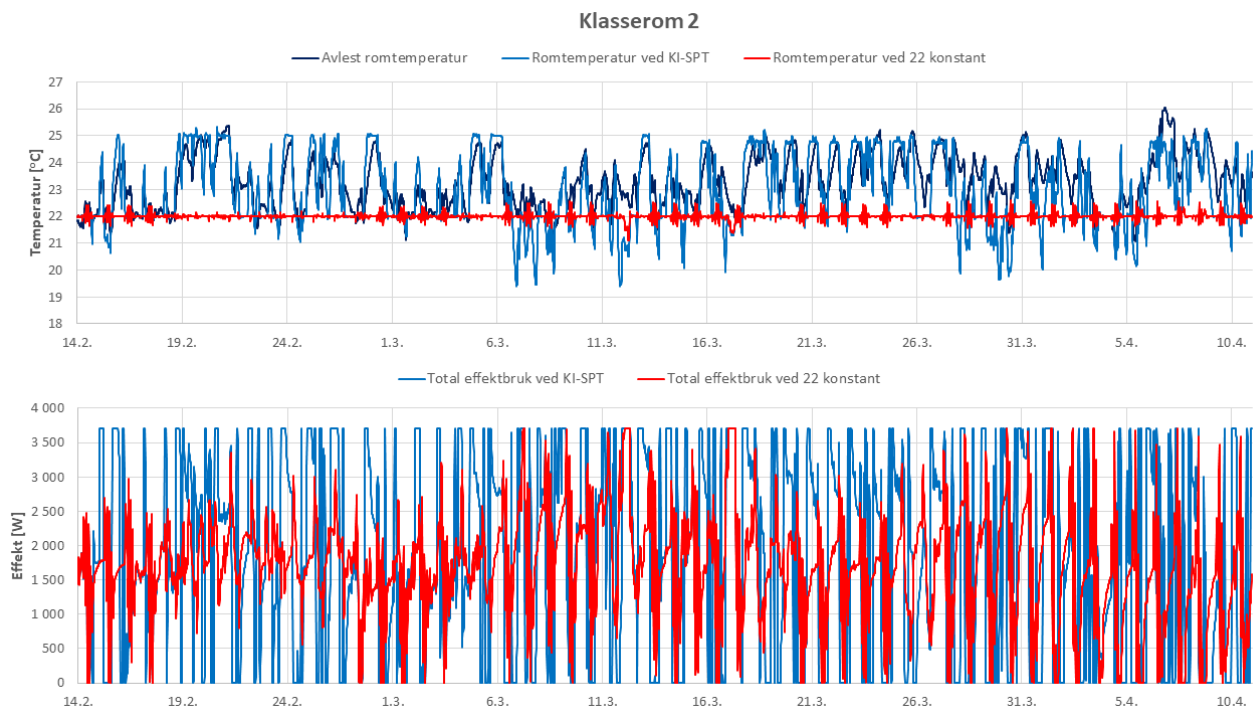
Figur 5.21: Strømprisen i verifiseringsperioden.



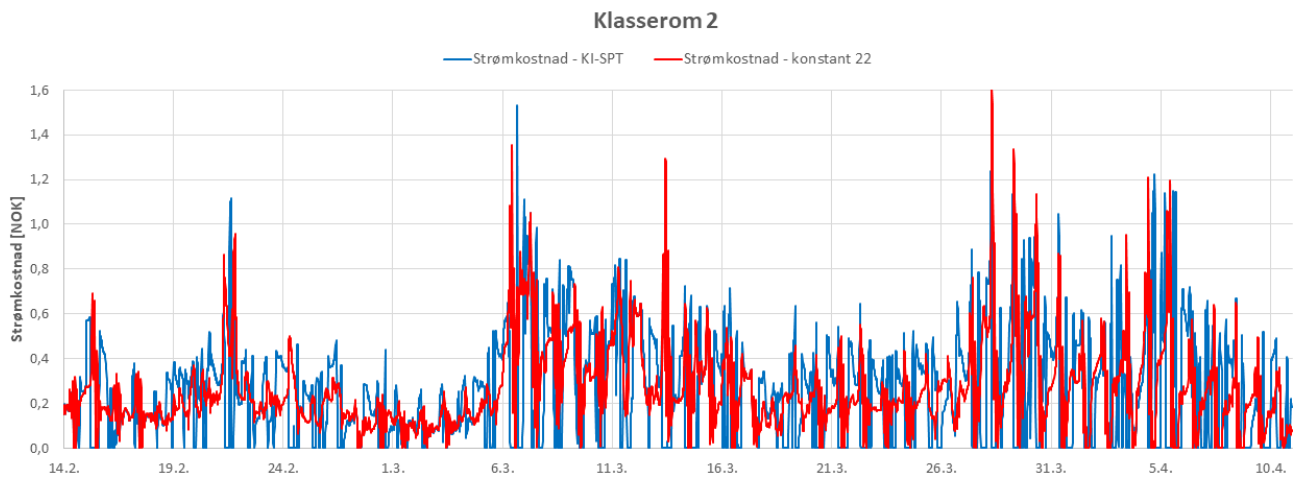
Figur 5.22: Utendørstemperaturen i verifiseringsperioden.

5.4.1 Klasserom 2

I figur 5.23 sammenlignes romtemperatur og effektbruk i hele verifiseringsperioden i klasserom 2 ved *KI-SPT* og *22 konstant*. I tillegg er kurven for avlest romtemperatur lagt til. Figur 5.24 viser hvordan strømkostnadene varierer gjennom verifiseringsperioden for *KI-SPT* og *22 konstant* i klasserom 2. Tilsvarende resultater for perioden 12.03-14.03.23 er presentert i figur 5.25. De samlede resultatene av verifiseringen i klasserom 2 er vist i tabell 5.1. I kolonnen til høyre i tabellen er prosentvis endring oppnådd ved å bytte fra *22 konstant* til *KI-SPT* presentert.



Figur 5.23: Økonomisk verifisering klasserom 2 14.02-10.04.23, romtemperatur og effektbruk.



Figur 5.24: Økonomisk verifisering klasserom 2 14.02-10.04.23, strømkostnad.



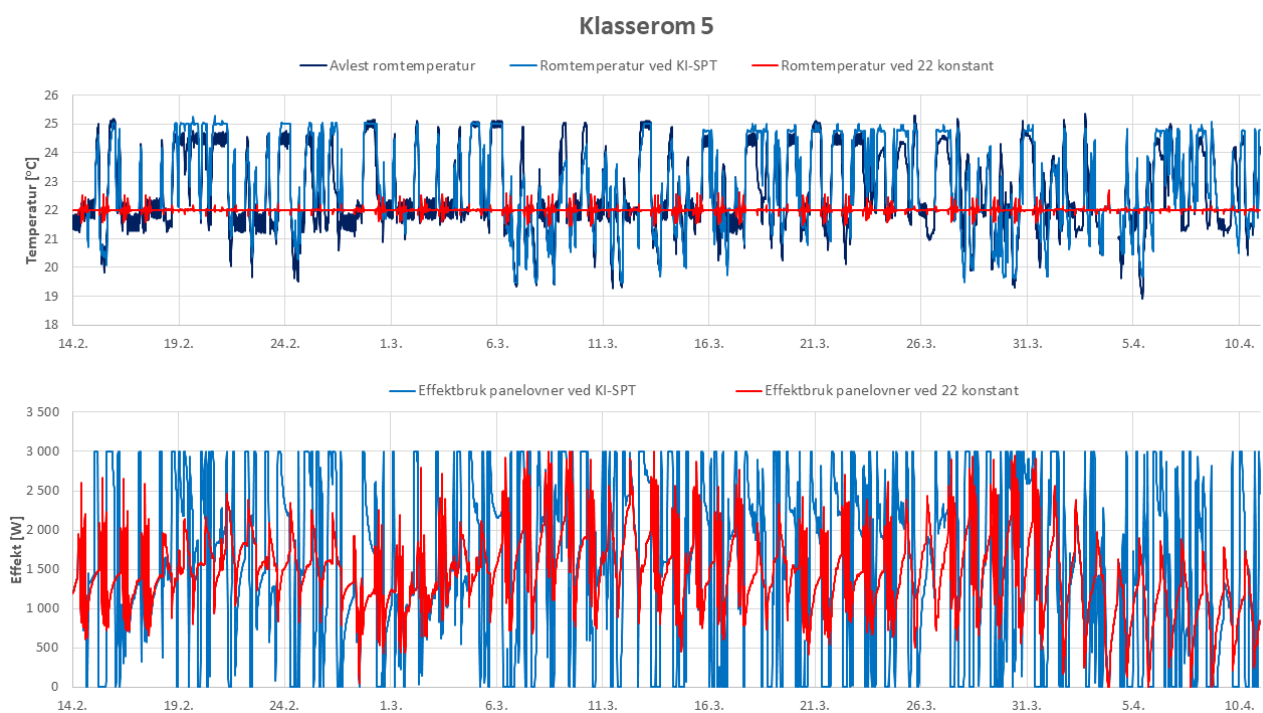
Figur 5.25: Økonomisk verifisering klasserom 2 12.03-14.03.23, romtemperatur, effektbruk og strømkostnad.

Tabell 5.1: Resultater økonomisk verifisering klasserom 2.

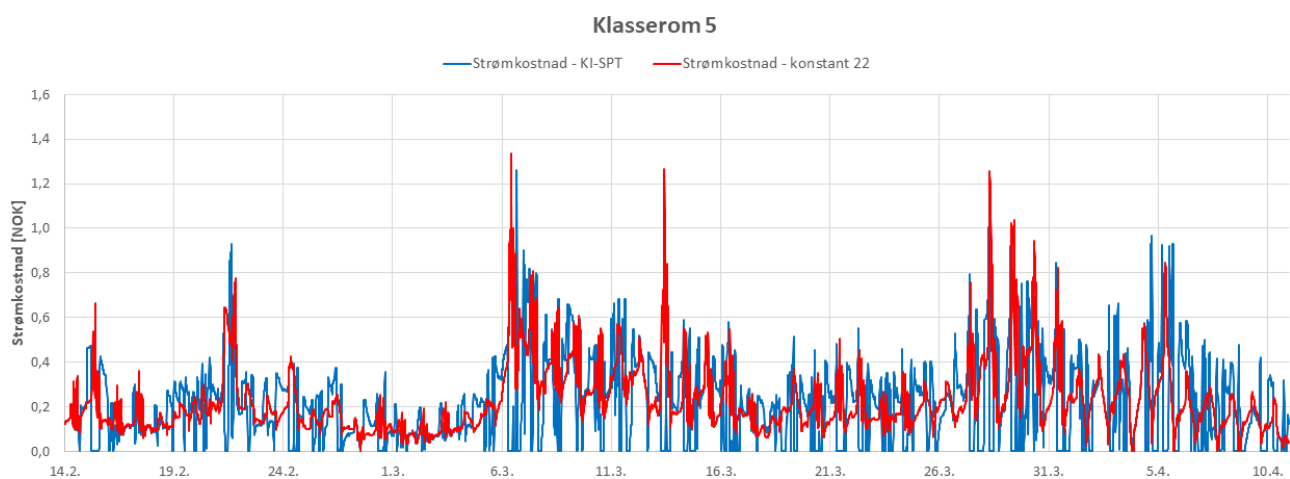
Periode	Parameter	KI-SPT	22 konstant	Endring
14.02-10.04 2023	Total energibruk [kWh]	2415	2287	+6 %
	Total strømkostnad [NOK]	1325	1415	-6 %
	Spesifikk strømkostnad [NOK/kWh]	0,55	0,62	
12.03-14.03 2023	Total energibruk [kWh]	150	144	+4 %
	Total strømkostnad [NOK]	85	100	-14 %
	Spesifikk strømkostnad [NOK/kWh]	0,57	0,70	

5.4.2 Klasserom 5

I figur 5.26 sammenlignes romtemperatur og effektbruk i hele verifiseringsperioden i klasserom 5 ved *KI-SPT* og *22 konstant*. I tillegg er kurven for avlest romtemperatur lagt til. Figur 5.27 viser hvordan strømkostnadene varierer gjennom verifiseringsperioden for *KI-SPT* og *22 konstant* i klasserom 5. Tilsvarende resultater for perioden 12.03-14.03.23 er presentert i figur 5.28. De samlede resultatene av verifiseringen i klasserom 5 er vist i tabell 5.2. I kolonnen til høyre i tabellen er prosentvis endring oppnådd ved å bytte fra *22 konstant* til *KI-SPT* presentert.



Figur 5.26: Økonomisk verifisering klasserom 5 14.02-10.04.23, romtemperatur og effektbruk.



Figur 5.27: Økonomisk verifisering klasserom 5 14.02-10.04.23, strømkostnad.



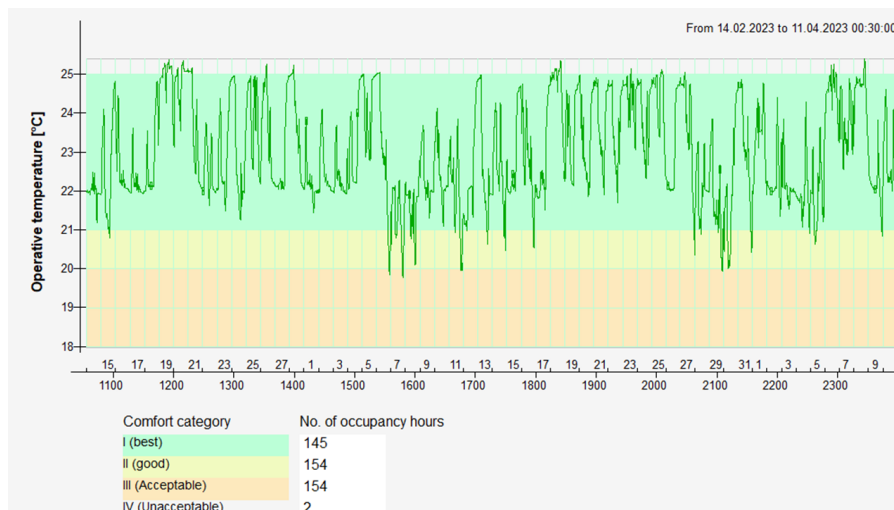
Figur 5.28: Økonomisk verifisering klasserom 5 12.03-14.03.23, romtemperatur, effektbruk og strømkostnad.

Tabell 5.2: Resultater økonomisk verifisering klasserom 5.

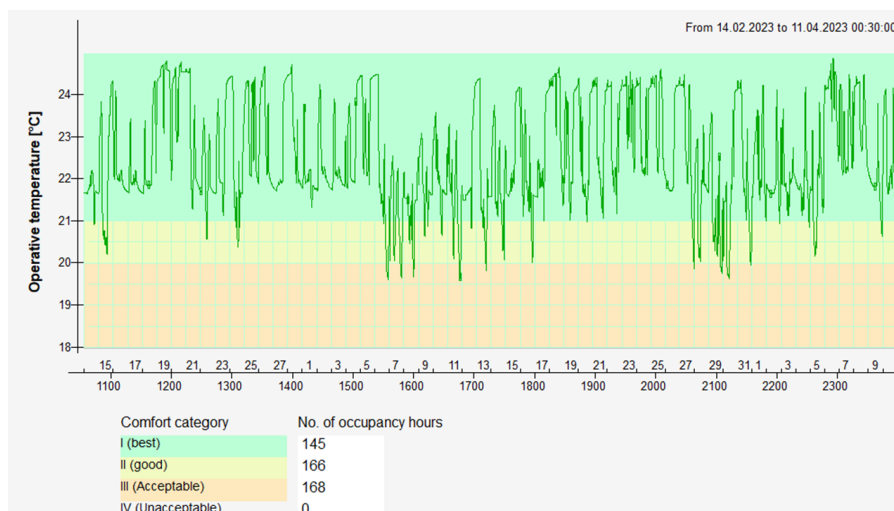
Periode	Parameter	KI-SPT	22 konstant	Endring
14.02-10.04 2023	Total energibruk [kWh]	2025	1969	+3 %
	Total strømkostnad [NOK]	1123	1229	-9 %
	Spesifikk strømkostnad [NOK/kWh]	0,55	0,63	
12.03-14.03 2023	Total energibruk [kWh]	125	123	+2 %
	Total strømkostnad [NOK]	72	87	-18 %
	Spesifikk strømkostnad [NOK/kWh]	0,58	0,71	

5.4.3 Termisk komfort

For å sikre at termisk komfort er ivarettatt ved bruk av optimaliseringssystemet er T_o i verifiseringsperioden simulert. Figur 5.29 og 5.30, for henholdsvis klasserom 2 og 5, viser simulert T_o i forhold til temperaturkategoeriene i NS-EN-15251/NS-EN-16798 i verifiseringsperioden. Disse temperaturkategoeriene er forklart i 3.1.



Figur 5.29: Termisk komfort (EN-15251, uten kjøling) klasserom 2.



Figur 5.30: Termisk komfort (EN-15251, uten kjøling) klasserom 5.

5.5 Økonomisk optimalisering

5.5.1 Akkumuleringstemperatur og -lengde

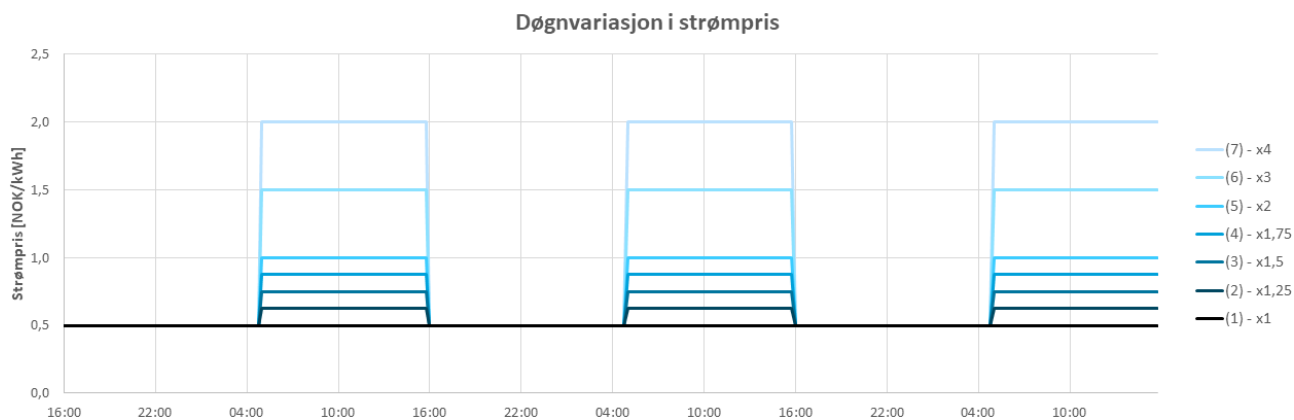
I den første delen av den økonomiske optimaliseringen er ulike strømkurver undersøkt sammen med de forskjellige kombinasjonene av akkumuleringstemperatur og -lengde simulert i 5.3. Målet er å finne løsningene som gir de største økonomiske besparelsene.

Innledningsvis ble det undersøkt om amplituden på strømprisen hadde påvirkning på lønnsomheten. Da ble ulike strømkurver hvor prisen dobles fra natta til dagen undersøkt. Resultatene viste at størrelsen på strømprisen ikke ga forskjellige økonomiske besparelser (prosentvis) så lenge variasjonene var i samme størrelsesorden.

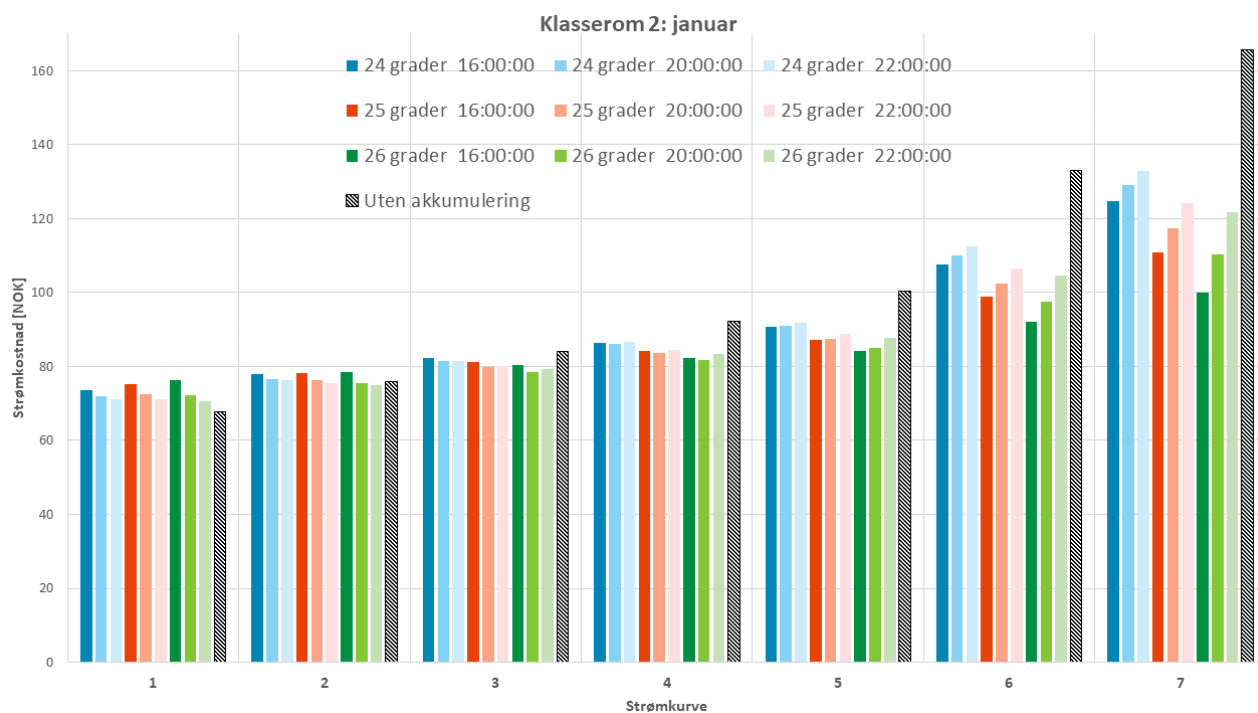
Figur 5.31 viser variasjonene i strømpris som er undersøkt. I alle kurvene er strømprisen 0,5 NOK/kWh fra 16:00 til 05:00, deretter øker strømprisen med ulik størrelse for de ulike kurvene. To perioder er undersøkt:

- 03.01.22 kl. 16:00 til 06.01.22 kl. 15:45 (heretter betegnet som *januar*)
- 04.01.22 kl. 16:00 til 07.01.22 kl. 15:45 (heretter betegnet som *april*)

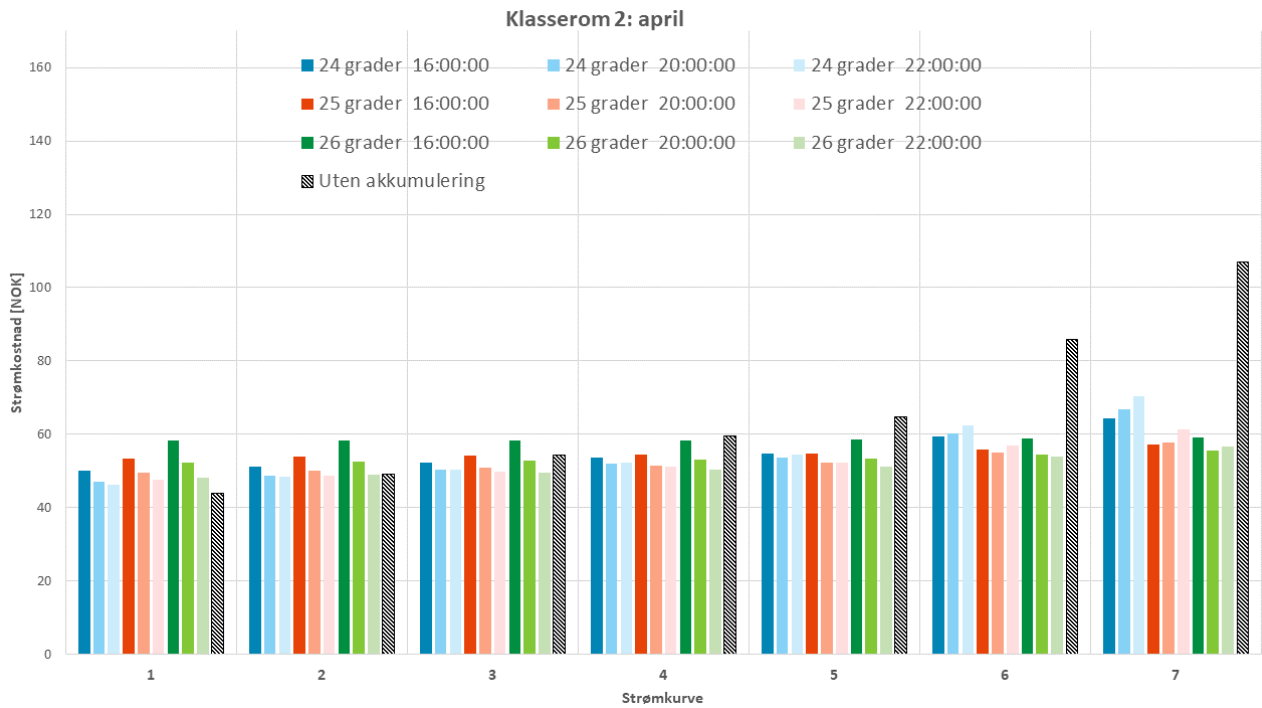
Perioder på tre dager er valgt for å ta hensyn til om varme lagres over flere dager. Figur 5.32 og 5.33 viser resultatene av optimaliseringen i klasserom 2 for henholdsvis januar og april. Figur 5.34 og 5.35 viser resultatene av optimaliseringen i klasserom 5 for henholdsvis januar og april. I grafene sammenlignes de ulike scenariene med strømkostnaden uten akkumulering (SPT konstant lik 22°C).



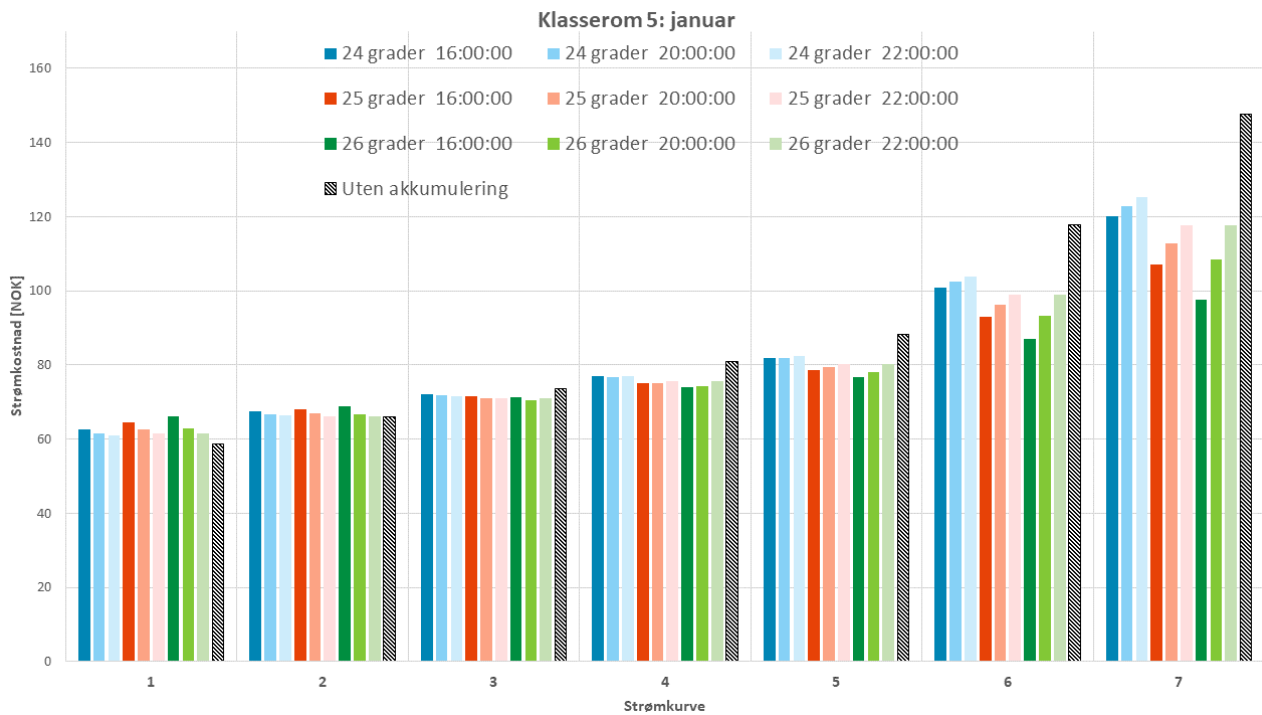
Figur 5.31: Strømkurvene brukt i den økonomiske optimaliseringen.



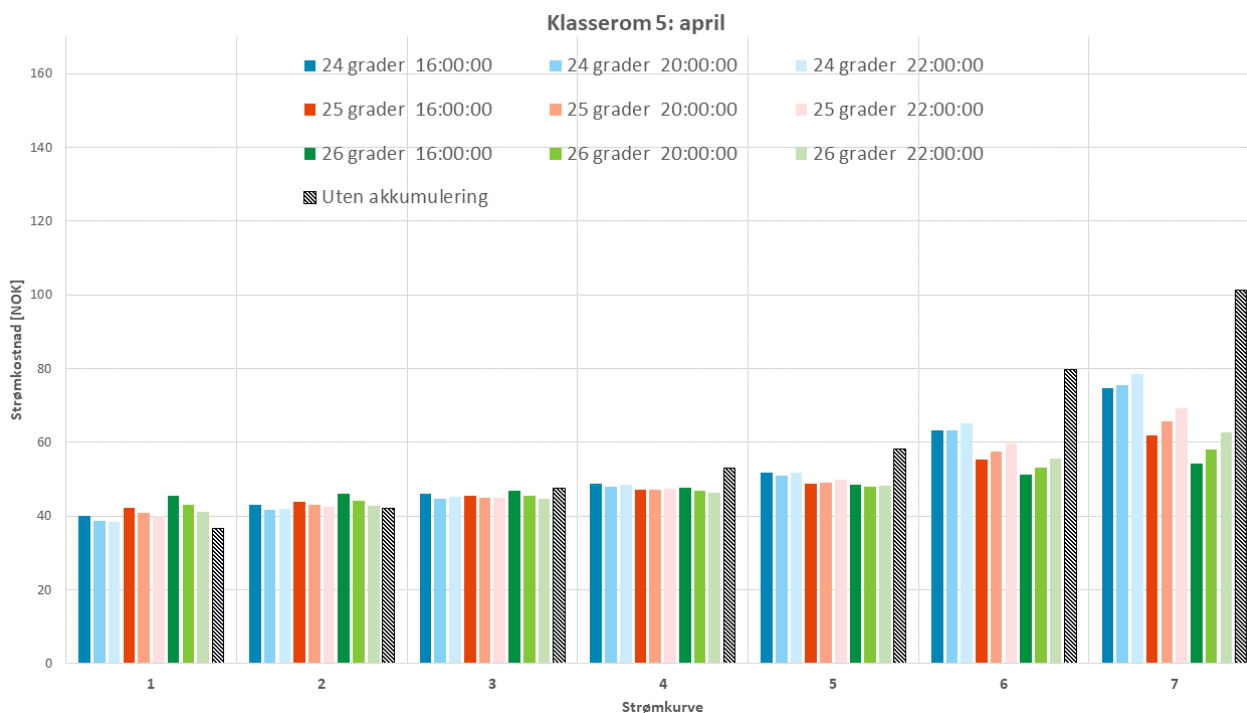
Figur 5.32: Resultater økonomisk optimalisering klasserom 2, januar.



Figur 5.33: Resultater økonomisk optimalisering klasserom 2, april.



Figur 5.34: Resultater økonomisk optimalisering klasserom 5, januar.

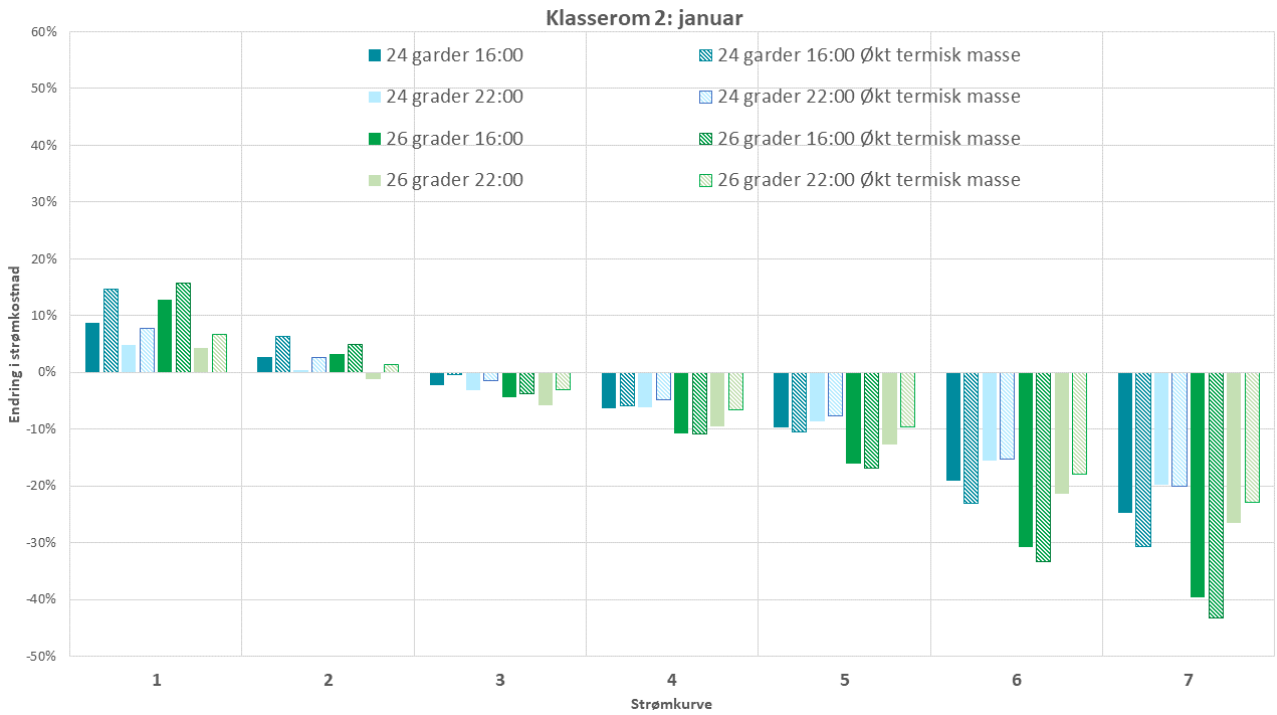


Figur 5.35: Resultater økonomisk optimalisering klasserom 5, april.

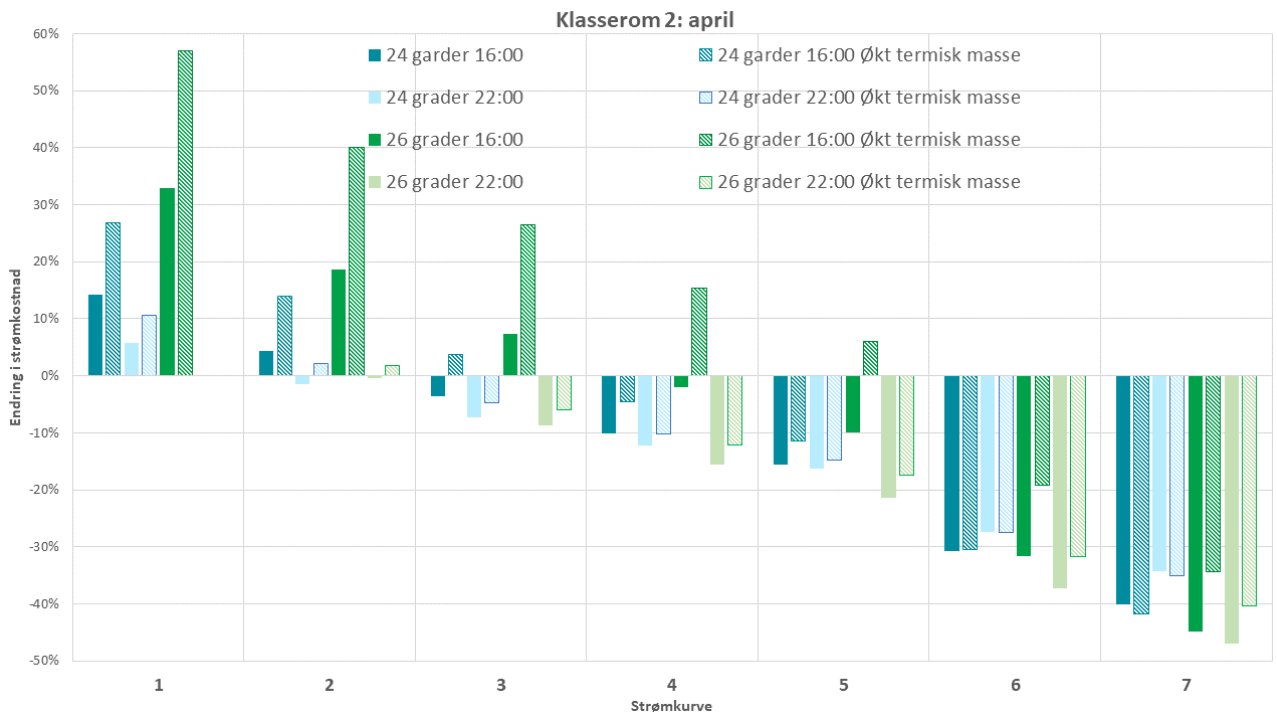
5.5.2 Termisk masse

I dette delkapittelet er den termiske massen til simuleringmodellens konstruksjon endret. Dette er gjort for å undersøke hvordan økt termisk masse i kombinasjon med de ulike akkumuleringstemperaturene og -lengdene vil påvirke de økonomiske besparelsene. Fire av kombinasjonene presentert i 5.5, er undersøkt: akkumuleringstemperatur 24°C med starttidspunkt 16:00 og 22:00, samt akkumuleringstemperatur 26°C med starttidspunkt 16:00 og 22:00. Figur 5.36 og 5.37 viser resultatene fra klasserom 2 i henholdsvis januar og april. Figur 5.41 og 5.42 viser resultatene fra klasserom 5 i henholdsvis januar og april. Resultatene er presentert som prosentvis forskjell fra scenariet uten akkumulering med den samme termiske massen.

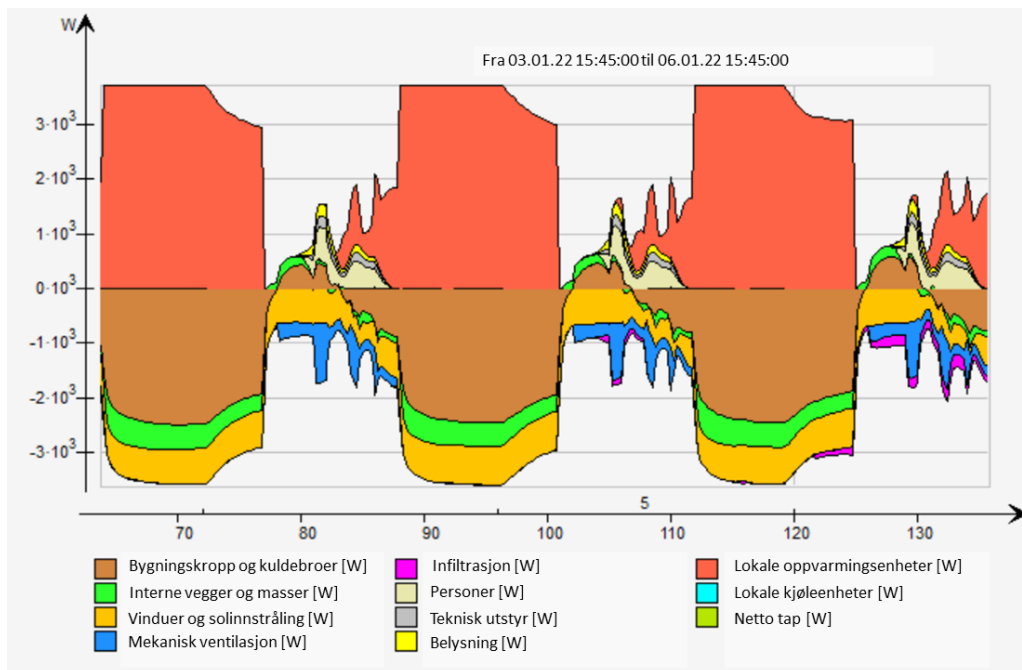
Noen av scenariene og periodene er undersøkt nøyere for å forstå dynamikken i rommene. Figur 5.38 og 5.39 viser energibalansen i klasserom 2 i januar ved akkumuleringstemperatur 26°C og akkumuleringsstart 16:00 for, henholdsvis den originale konstruksjonen og konstruksjonen med økt termisk masse. I figur 5.40 presenteres utviklingen i romtemperatur og oppvarmingsenhetenes effektbruk i april i klasserom 2, for scenariene med økt termisk masse.



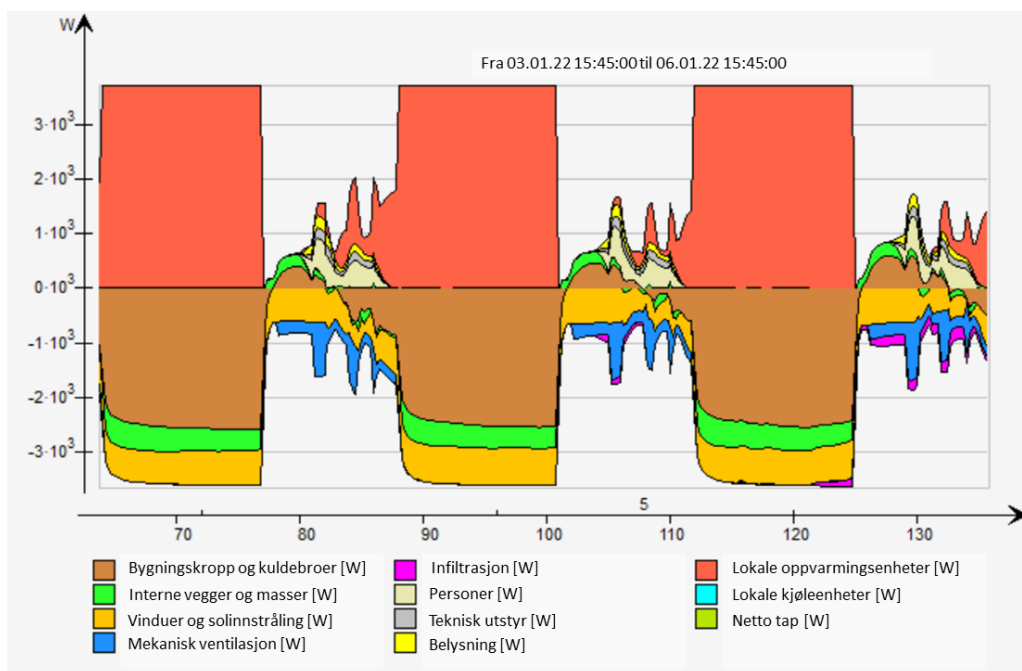
Figur 5.36: Resultater økonomisk optimalisering, variasjon termisk masse, klasserom 2, januar.



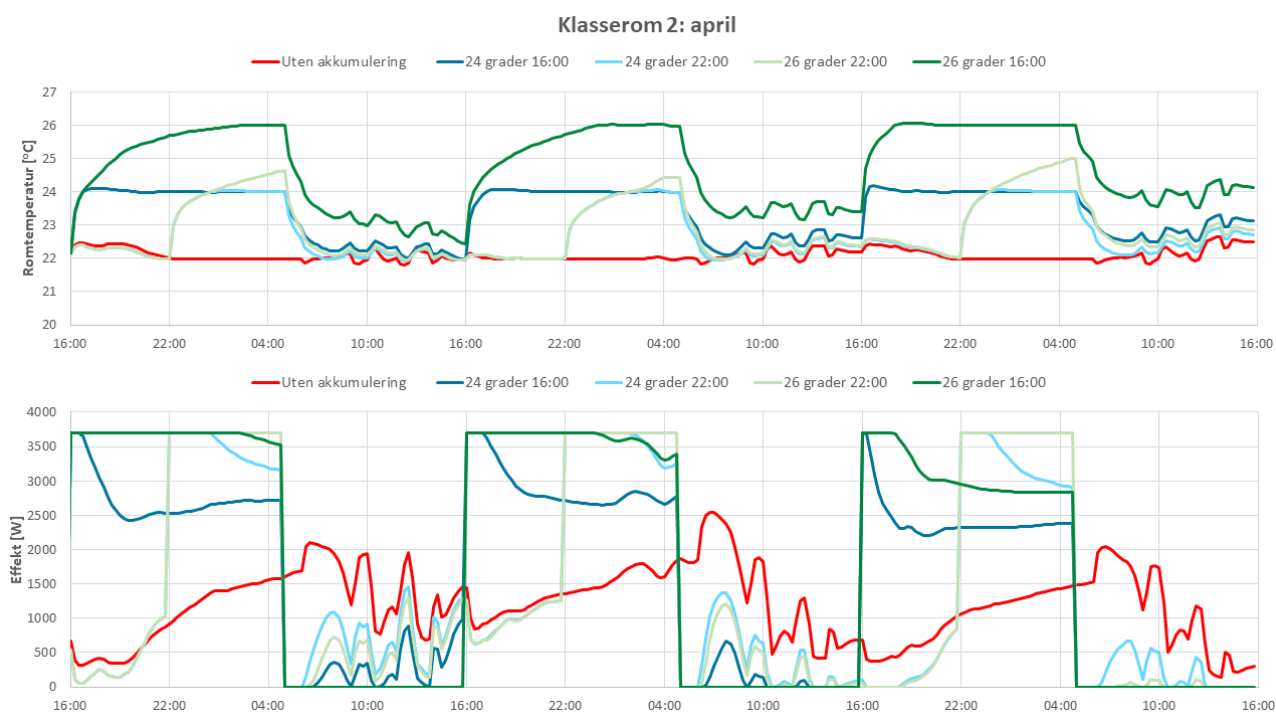
Figur 5.37: Resultater økonomisk optimalisering, variasjon termisk masse, klasserom 2, april.



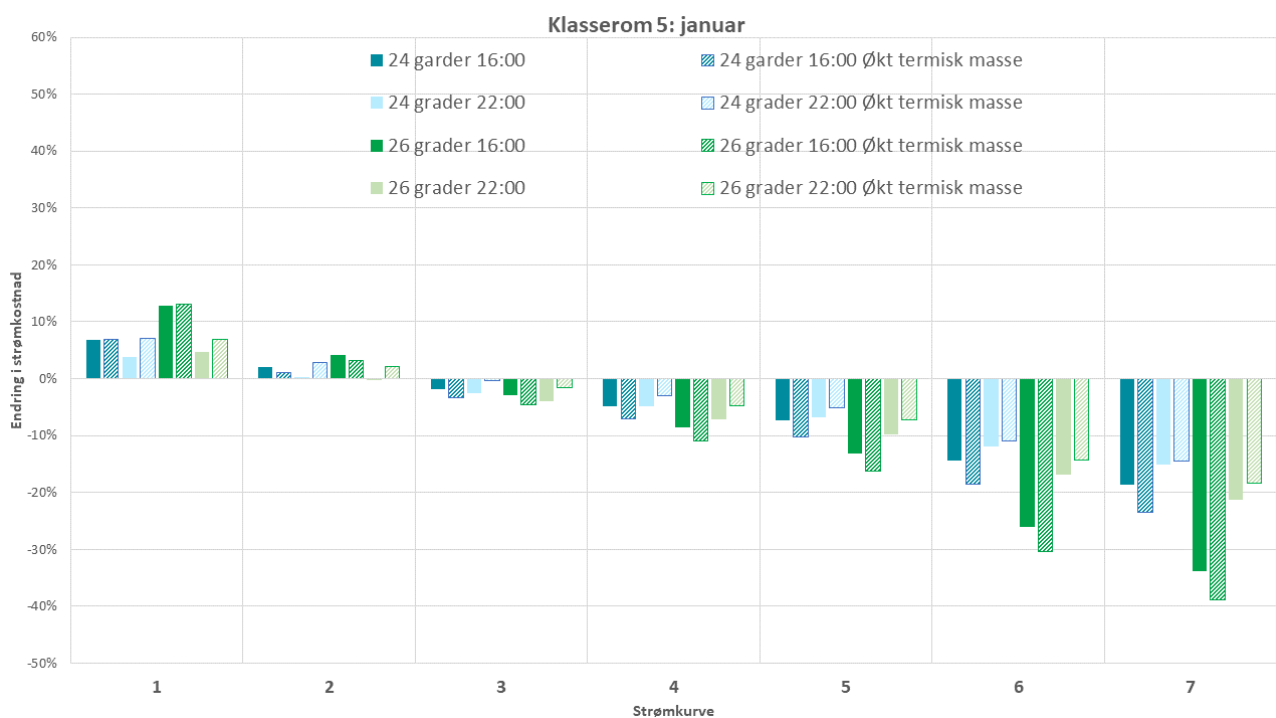
Figur 5.38: Energibalanse 26°C 16:00, original konstruksjon, klasserom 2, januar.



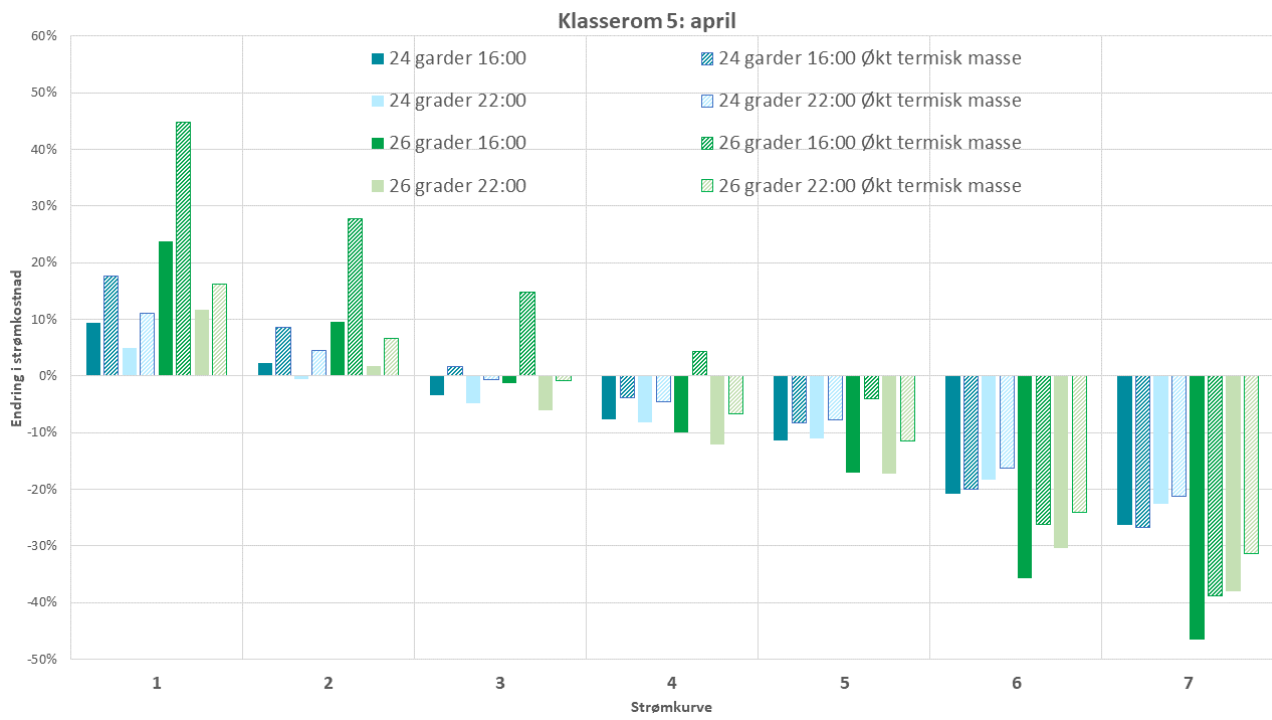
Figur 5.39: Energibalanse 26°C 16:00, klasserom 2, økt termisk masse, januar



Figur 5.40: Romtemperatur og effektbruk med økt termisk masse, klasserom 2, april.



Figur 5.41: Resultater økonomisk optimalisering, variasjon termisk masse, klasserom 5, januar



Figur 5.42: Resultater økonomisk optimalisering, variasjon termisk masse, klasserom 5, april.

6 Diskusjon

6.1 Kalibrering

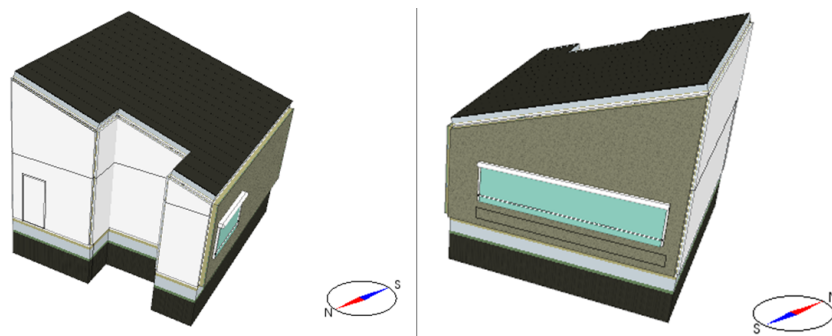
I dette kapitlet vurderes kalibreringen av basismodellen, både metode og de oppnådde resultatene. Målet for kalibreringen av basismodellen var å oppnå et godt samsvar mellom simulert og avlest romtemperatur i de valgte rommene, samt realistisk energibruk basert på til de kjente egenskapene til skolebygget.

6.1.1 Valg av rom

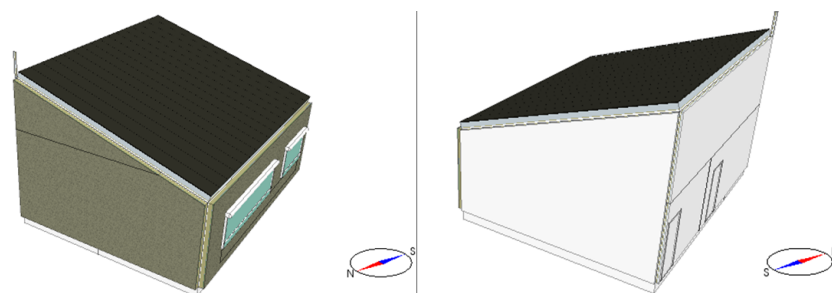
Klasserom 2 og 5, se figur 4.7, er valgt ut for å undersøke optimaliseringssystemet. Derfor er disse rommene kalibrert i detalj. Alle endringene i iterasjonene presentert i tabell 4.11, bortsett fra nummer 5, er gjort i alle rommene i basismodellen. Endringene er imidlertid gjort med utgangspunkt i sammenligning av avlest og simulert data for klasserom 2 og 5. Klasserom 2 og 5 er valgt fordi de er forholdsvis like, men det er også noen forskjeller mellom rommene som gjør de interessante å sammenligne. Det er valgt å undersøke klasserom fordi dette er den vanligste romtypen ved skolen. Resultatene fra klasserom 2 og 5 kan overføres til de andre klasserommene ved skolen. På grunn av rommenes felles funksjon er de interne lastene like. Rommene har samme antall personer og den installerte effekten til belysningen og det tekniske utstyret er basert på samme størrelse per gulvareal.

Geometrien til rommene er også forholdsvis lik. Figur 6.1 viser utformingen av klasserom 2 og figur 6.2 viser utformingen av klasserom 5. På grunn av det skrå taket har begge rommene et innvendig tak som skrå oppover, og siden rommene er like brede er minimum og maksimum takhøyde i rommene like. Klasserom 5 er noe lenger enn klasserom 2, gulvarealet i klasserom 5 er $69,12 \text{ m}^2$ og klasserom 2 har et gulvareal på $56,86 \text{ m}^2$. Begge rommene har to yttervegger og to vegger mot andre rom. Klasserom 5 ligger over et uoppvarmet tilfluktsrom som gjennom kalibreringsperioden 01.01-16.01 2022 har en stabil romtemperatur på rundt 14°C , mens klasserom 2 ligger rett på grunnen. Gulvet i klasserom 2 er imidlertid bedre isolert, i henhold til TEK85, og det antas derfor at det ikke er stor forskjell mellom rommene. Klasserom 2 har et noe større vindusareal enn klasserom 5, og en lang vindusrekke mot sør, som kan være nyttig å merke seg i månedene med mye solinnstråling. Alle vinduene i begge rommene har samme type solskjerming, markiser, modellert med samme type regulering basert på solinnstrålingen.

En viktig forskjell mellom rommene, som gjør de interessante å undersøke, er de installerte oppvarmingsenhetene. I klasserom 5 er det kun panelovner ($Q_{panelovner} = 3\text{kW}$), derfor antas en relativt liten t_s og kort t_d . I klasserom 2 er det både elektriske varmekabler ($Q_{gulvvarme} = 1,9\text{kW}$) og panelovner ($Q_{panelovner} = 1,8\text{kW}$), som gjør at en lenger t_d og større t_s forventes. Det vil bli interessant å se på hvordan dette påvirker akkumuleringen i rommene.



Figur 6.1: Romgeometri klasserom 2.



Figur 6.2: Romgeometri klasserom 5.

6.1.2 Valg av periode

Kalibreringen er gjort for en begrenset periode, kalibreringsperioden, 01.01-16.01 2022. Denne perioden er valgt for å kunne justere hvordan modellen responderer på plutselige endringer i SPT. I løpet av 2022 er dette en av de få periodene hvor endringer i SPT forekommer. Det er også nyttig at akkumulering av varme skjer flere døgn etter hverandre for å se hvordan gjentakende akkumulering påvirker romtemperatur og effektbruk. I tillegg er variasjonene i utendørstemperatur relativt store og varmembalansen er lite påvirket av solinnstråling.

6.1.3 Resultatene av kalibreringen

Siden korrekte data for avlest effektbruk fra undermålere ikke var tilgjengelig, var fokuset i kalibreringen å oppnå et godt samsvar mellom avlest og simulert romtemperatur. De avleste dataene for effektbruk er likevel undersøkt fordi de viser når enhetene er i bruk eller ei.

Resultatene for kalibreringen av klasserom 2 er vist i figur 5.2. Om man ser på romtemperaturen når SPT øker, ser man at modellen reagerer relativt likt som det virkelige bygget. Særlig under de tre første økningene, 3.-7. januar, følger kurvene for romtemperatur hverandre veldig godt fram til 25°C nås. Her er utendørstemperaturen omtrent 10°C grader høyere enn under den siste økningen, 10.-11. januar, hvor det er større forskjell mellom avlest og simulert romtemperatur fra temperaturøkningen starter til 25°C nås. Kurven til den simulerte romtemperaturen er forholdsvis lik gjennom alle økningene mens avlest romtemperatur endrer seg mer. Dette kan tyde på at modellen dårligere fanger opp rommets dynamikk ved lavere utendørstemperaturer.

Etter at 25°C er nådd er forskjellen i utviklingen til avlest og simulert romtemperatur større. I modellen flater

romtemperaturen ut fordi SPT er nådd og effektbruken til panelovnene reduseres, mens varmekablene fortsatt leverer 100 % av sin kapasitet fordi gulvtemperatur på 28°C ikke er nådd enda. Det ser ut til at det samme skjer i det virkelige rommet, basert på avlest effektbruk, men her fortsetter romtemperaturen å øke. Det kan være flere årsaker til dette; den installerte effekten til varmekablene kan være høyere enn det som er oppgitt i plantegningene, større termisk treghet i det virkelige rommet eller brukeradferd. På dagene uten akkumulering ser man at avlest romtemperaturen øker utenfor driftsperioden med rundt 1°C selv om effektbruken til de lokale enhetene reduseres. Dette kan skyldes en annen kilde som tilfører varme, eventuelt infiltrasjon fra rommene rundt med CAV når ventilasjonen skrur av i klasserom 2 kl. 16:00. Dette kan være grunnen til at romtemperaturen fortsetter å øke (forbi 25°C) etter at SPT er nådd i akkumuleringsperiodene. Ulike tiltak ble prøvd ut for å gjenspeile denne økningen i romtemperaturen i modellen, blant annet ved økt kapasitet på varmekablene og åpning av dører, men dette ga dårligere samsvar mellom simulert og avlest romtemperatur. Det ble konkludert med at simulerte og avleste data samsvarer godt nok. En viktig likhet mellom avlest og simulert data er hvordan temperaturen synker etter akkumuleringen.

Resultatene i figur 5.3 viser at kalibreringen av klasserom 5 er mer vellykket enn klasserom 2. Kurvene for simulert og avlest romtemperatur følger hverandre tett i akkumuleringsperiodene. I likhet med klasserom 2, følger kurvene hverandre noe dårligere når utendørstemperaturen er lavere. For kalibreringen av dette rommet hadde reduksjonen av $Q_{panelovner}$ fra 4 til 3 kW stor påvirkning. Sammenligner man avlest og simulert effektbruk under akkumuleringen ser det ut til at effekten reduseres fra maksimal kapasitet til et lavere nivå på omtrent samme tidspunkt. Dette tyder på at det virkelige rommet og modellen har et relativt likt energibehov.

6.1.4 Vurdering av kalibreringen

Oppsummert er kalibreringen av basismodellen tilstrekkelig for å gjøre en energianalyse og økonomisk verifisering av modellen. De overordnede termiske egenskapene til rommene er modellert, noe bedre i klasserom 5 enn i klasserom 2. Årsaken til forskjellen mellom rommene skyldes utfordringen med å modellere samspillet mellom panelovner og gulvvarme i klasserom 2.

En svakhet ved kalibreringen er at kun én periode er brukt for å sammenligne avlest og simulert data. Selv om variasjonen i utendørstemperaturene er relativt store, har en ikke mulighet til å se på større sesongvariasjoner som høyere eller lavere utendørstemperaturer eller endringer i solinnstråling og vindforhold. I tillegg kan uforutsette faktorer få større påvirkning, for eksempel uvanlig brukeradferd i kalibreringsperioden, selv om man kan ha en viss kontroll på disse faktorene ved å undersøke avleste data for tilluftsmengde og CO_2 -nivå i rommene.

Modellen vurderes likevel til å være tilstrekkelig for formålet. Det er ikke gjort store endringer fra basismodellen, som betyr at de fleste inndataene som brukes er realistiske og/eller ekte verdier lest av plantegninger og annen dokumentasjon. Et annet holdepunkt for hvorfor modellen er tilstrekkelig er at de simulerte dataene skal sammenlignes med hverandre, ikke med avlest data. Det betyr at eventuelle feil og mangler i den kalibrerte simuleringsmodellen vil påvirke alle datamengdene som sammenlignes, dermed vil det ikke være disse feilene og manglene som utgjør forskjellene i sammenligningene.

6.2 Energiytelse

6.2.1 Ulike SPT-kurver

Grafene i figur 5.5 til 5.10 viser at endringene i SPT, som gjøres for å akkumulere varme, tydelig påvirker både romtemperatur og effektbruk i klasserommene. Det er tydelig at temperaturøkningen, som gjøres når akkumuleringsperioden starter, krever mye energi. I begge klasserommene, i alle månedene, er oppvarmingsenhetenes effekt lik maksimal kapasitet i en periode før effektbruken etter hvert synker. Ingen av grafene viser at effektbruken synker til samme nivå som i situasjonen hvor SPT er konstant 25°C . Dette betyr at i situasjonen med SPT på konstant 25°C er det lagret mer varme i konstruksjonen. Altså kan konstruksjonen i KI-SPT scenariet fremdeles varmes opp mer når akkumuleringen er ferdig kl. 05:00.

Det totale energiforbruket til situasjonen med KI-SPT er i alle periodene og i begge klasserommene høyere enn ved SPT konstant 22°C og lavere enn ved SPT konstant 25°C . Målet er at den økte energibruken akkumuleringen medfører skal kompenseres for med store nok døgnvariasjoner i strømprisen. Altså at det skal være lønnsomt å heve energibruken.

6.2.2 Sammenligning av rommene

Figur 5.5 til 5.10 kan benyttes for å analysere forskjellen mellom akkumuleringen i klasserom 2 og 5. Hvordan romtemperaturen og energibruken øker, fra SPT settes opp til 25°C til en romtemperatur på 25°C er nådd, i de to klasserommene er forholdsvis likt for samme periode. Den samme tendensen kan, som vist i 5.1, observeres i de avleste verdiene for romtemperaturen. t_d er tilnærmet lik null i begge rommene. t_s for temperaturøkningen er relativt liten og tilnærmet lik i klasserom 2 og 5. t_s for temperaturøkningen avhenger av den installerte effekten i forhold til den termiske massen til rommene. Jo høyere installert effekt, desto mindre er t_s , som gjør at det tar kortere tid å nå 25°C . Siden installert kapasitet per m^2 i klasserom 2 er større, takhøyden i rommene er lik og t_s er tilnærmet lik som i klasserom 5, kan en anta at den termiske massen er større i klasserom 2 enn i klasserom 5. Dette samsvarer godt med teorien om den termiske massen til gulvvarme og panelovner presentert i kapittel 3.6.

Etter at akkumuleringen er ferdig og SPT reduseres, kan tydeligere forskjeller mellom klasserommene observeres. I denne fasen har ikke den installerte effekten i rommene noen påvirkning på utviklingen i romtemperaturen. Her har imidlertid ventilasjonen en vesentlig betydning for resultatene. På grunn av luftstrømmene som oppstår når ventilasjonen skrur på og en tilluftstemperatur som er lavere enn romtemperaturen, har ventilasjonen en betydelig påvirkning på klasserommens varmebalanse. Alle hverdager skrur ventilasjonen på kl. 06:00, fra 0 til 20 % av maksimal luftmengde, videre gjennom dagen øker tilluftsmengden som forklart i 4.3.2. I klasserom 5 synker romtemperaturen til 22°C før ventilasjonen skrur på, dermed skrur panelovnene på momentant kl. 06:00. Dette gjelder for både januar, april og desember. Videre gjennom skoledagen varierer effektbehovet på grunn av de interne lastene og variasjonene i tilluftsmengde. Mot slutten av skoledagen stiger effektbehovet opp mot effektbehovet i scenariet med SPT konstant på 22°C .

Utviklingen i romtemperatur etter akkumuleringsperioden er annerledes i klasserom 2, det er tydelig at t_s når

romtemperaturen synker er større i dette rommet. Siden rommet bedre evner å holde på den akkumulerte varmen har ikke temperaturen sunket til 22°C enda når ventilasjonen settes i gang. I temperaturgrafene i figurene 5.5, 5.6 og 5.7 ser man derfor at romtemperaturen synker noe raskere fra kl. 06:00. At romtemperaturen holdes høyere i klasserom 2 blir en buffer for når oppvarmingsenhetene skrur på. I januar og desember holder denne bufferen i omtrent 1 time, mens i april holder den store deler av dagen. I den siste akkumuleringsperioden i april trengs ikke varme fra gulvvarme eller panelovner for å holde 22°C i det hele tatt gjennom dagen. I dette tilfellet har solinnstrålingen stor påvirkning på rommets varmebalanse. Klasserom 2 har, som tidligere forklart, store vindusflater mot sør.

Ved sammenligning av klasserommene er det viktig å merke seg at tilluftsmengden til de to rommene er forskjellig. I klasserom 2 er maksimal tilluftsmengde $19,33 \text{ m}^3/\text{h}$ per m^2 , mens i klasserom 5 er den $15,91 \text{ m}^3/\text{h}$ per m^2 . Timeplanen for personbelegget og CO_2 -settpunkt er også forskjellig. Med like luftmengder er det mulig at de gode akkumuleringsegenskapene i klasserom 2, sammenlignet med klasserom 5, ville vært enda bedre.

6.2.3 Sesongvariasjoner

Sesongvariasjoner har en betydelig påvirkning på akkumuleringen i klasserommene. Figur 5.11 og 5.12 viser hvordan sesongvariasjoner påvirker varmeakkumuleringen. I figur 5.4 presenteres utendørstemperaturene i de tre periodene simulert i figur 5.11 og 5.12. Resultatene indikerer at akkumuleringen er mest effektiv ved lave utendørstemperaturer fordi forskjellen mellom økt energibruk på natta (16:00-05:00) og redusert energibruk på dagen (05:00-16:00) er minst. Samtidig gir høyere utendørstemperatur større reduksjon i energibruk på dagen. Denne tendensen kan observeres for begge klasserommene. Samlet ser man av resultatene at en lavere utendørstemperatur gir en større t_s . t_d er tilnærmet lik null i alle månedene.

For 8.-9. desember, hvor utendørstemperaturen ligger stabilt mellom -10 og -15°C , er forskjellen mellom økt energibruk på natta og spart energi på dagen liten. I klasserom 2, hvor akkumuleringen i denne perioden er mest effektiv, brukes det $18,1 \text{ kWh}$ mer på natta for KI-metoden enn ved konstant temperatur og det spares $13,8 \text{ kWh}$ på dagen. Altså gir KI-metoden en økt energibruk på $4,2 \text{ kWh}$, som sannsynligvis vil gi økonomiske besparelser med normale døgnvariasjoner i strømprisen.

Selv om utendørstemperaturforskjellen mellom akkumuleringen i januar og desember er forholdsvis stor, $7-8^{\circ}\text{C}$, er utviklingen i effektbruk relativt lik. Det tar omtrent like lang tid fra akkumuleringen starter til romtemperaturen er 25°C . Dette samsvarer med egenskapene til modellen som ble observert i 6.1, den evner dårligere å modellere romtemperaturen ved lavere utendørstemperaturer. Likt for de to periodene er at det er små døgnvariasjoner i utendørstemperaturen. Forskjellen mellom kurvene for januar og desember i ?? og 5.12 er hvor raskt effektbruken til oppvarmingsenhetene synker etter at 25°C er nådd. Dette viser at når utendørstemperaturen er høyere vil en ha mer tilgjengelig effekt for akkumulering. Mer av varmen avgitt fra de lokale oppvarmingsenhetene vil i januar lagres i rommets termiske masse. Resultatet av dette kan man se i den prosentvise energibesparelsen på dagtid, sammenlignet med om SPT hadde vært konstant 22°C , som er høyere i januar enn desember. Dette skyldes at mer varme er lagret i konstruksjonen fra natt til dag. Dette

krever høyere energibruk på natta, fordi en større andel av varmen fra oppvarmingsenhetene går til oppvarming av konstruksjonen. Derfor er den prosentvise energibruken høyere på natta i januar enn desember. Det må her gjøres en vurdering rundt hvor mye varme det lønner seg å lagre fra dag til natt, hvor strømprisen vil ha en betydelig påvirkning på lønnsomheten.

Før 8.-9. desember var det to netter med akkumulering, dette kan ha en påvirkning på resultatet. Temperaturkurven i figur 5.7 viser at romtemperaturen mot slutten av den foregående akkumuleringsperioden synker til $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ før den nye perioden starter, men det er mulig at varme er lagret i konstruksjonen. I tillegg har utendørstemperaturen vært høyere de to foregående dagene.

For 4.-5. april er utviklingen i energibruk forholdsvis forskjellig fra 3.-4. januar og 8.-9. desember. I løpet av disse 24 timene er utendørstemperaturen høyere og den varierer mer. Dette resulterer i at etter akkumuleringen har startet tar det kort tid før SPT er nådd, litt under en time i klasserom 5 og litt over en time i klasserom 2. Når utendørstemperaturen synker gjennom natta kreves mer varme fra oppvarmingsenhetene, dermed øker avgitt effekt igjen, motsatt av hva som skjer i januar og desember, hvor effektbruken er konstant eller synker gjennom hele natta. Som vist i figur 5.11 og 5.12 krever økningen i temperatur gjennom natta nesten 3 ganger mer energi enn å holde temperaturen konstant. Selv om den høye utendørstemperaturen gir et lavere energibehov er den ekstra energibruken, sammenlignet med SPT konstant 22°C , på grunn av akkumuleringen større enn for 8.-9. desember. For denne perioden er det mulig at kortere akkumuleringsperiode eller lavere akkumuleringstemperatur ville vært mer lønnsomt.

Det fremgår ikke som klart at en litt høyere utendørstemperatur, sammenlignet med januar, skal ha så stor innvirkning på energibruken i april, men mye av forskjellen skyldes variasjoner i solinnstråling. I de simulerte periodene i januar og desember er det lite eller ingen direkte solinnstråling, mens i april har solinnstråling en betydelig påvirkning på energibalansen på dagtid. Dette kan blant annet observeres mot andre halvdel av 07.04. i figur 5.6 og 5.9 hvor utendørstemperaturen holder seg under $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ og energibruken reduseres betydelig, mens romtemperaturen øker.

6.3 Variasjoner av akkumuleringsperioden

6.3.1 Starttidspunkt

Lengden på akkumuleringsperioden har en tydelig påvirkning på mengden varme som akkumuleres. Figur 5.13 og 5.14, for henholdsvis klasserom 2 og 5, viser hvordan ulike starttidspunkt på akkumuleringsperioden påvirker romtemperatur og effektbruk. Akkumuleringstemperaturen er 25°C i alle simuleringene. t_s for økningen i romtemperatur når SPT økes er tilnærmet lik for de forskjellige starttidspunktene, altså tar det omtrent like lang tid for romtemperaturen å nå 25°C . De små forskjellene skyldes trolig at utendørstemperaturen synker gjennom natta. Dette gjelder for begge klasserommene.

I klasserom 5 gir de ulike starttidspunktene relativt små variasjoner i romtemperaturutviklingen etter akkumuleringen er ferdig. I klasserom 2 derimot, har starttidspunktet større betydning, her er det større forskjell

mellom t_s for romtemperaturreduksjonen. Her ser man at en større termisk masse i klasserom 2, gir mulighet for å øke t_s ved å starte akkumuleringen tidligere. I klasserom 5, hvor den termiske massen er lavere, har en lengre akkumuleringsperiode liten påvirkning på t_s .

Etter at romtemperaturen har sunket til $22^\circ C$ er det varme lagret i veggene som bidrar til å holde effektbehovet nede. Som vist i figur 3.12 har gipsveggene betydelig større C_v enn luft på grunn av luftens lave d . C_v beskriver hvor godt materialet holder på varme. Det er derfor ønskelig å varme opp veggene så mye som mulig slik at varmen tilført rommet på natta kan lagres til dagen. Figur 5.15 viser at overflatetemperaturen til veggene synker jevnt gjennom hele dagen. Av grafen kan man også se at lengre akkumuleringsperiode gir høyere overflatetemperatur ved endt akkumulering. Det ser imidlertid ut til at forskjellen i overflatetemperatur er av liten betydning. Når SPT settes ned er forskjellen i overflatetemperatur så liten at reduksjonen i overflatetemperatur for de tre starttidspunktene blir relativt lik. Om man videre ser på hvordan overflatetemperaturen øker underveis i akkumuleringsperioden ser man at når romtemperaturen har nådd SPT flater økningen i overflatetemperaturen ut. Overflatetemperaturen i scenariet med starttidspunkt 16:00 øker omtrent $0,5^\circ C$ fra romtemperaturen har nådd SPT til akkumuleringen er ferdig. Denne økningen tilsvarer differansen i overflatetemperaturen mellom starttidspunkt 16:00 og 22:00 når akkumuleringen er ferdig.

I scenariet hvor akkumuleringsperioden starter 22:00 er det tydelig at kortere lengde på akkumuleringsperioden gir begrenset mulighet for akkumulering. Intervallet hvor temperaturen er $25^\circ C$ er kort sammenlignet med de andre scenariene, og natt til 5. januar tangerer romtemperaturen $25^\circ C$ rett før klokka 05:00. En kortere akkumuleringsperiode enn dette i januar ville gitt en betydelig lavere overflatetemperatur til veggene, fordi etter at økningen i romtemperatur er ferdig fortsetter overflatetemperaturen å øke. Dermed kan man konkludere med at starttidspunktet har en betydelig påvirkning på hvor mye varme som akkumuleres i konstruksjonen.

6.3.2 Akkumuleringstemperatur

I figur 5.16 og 5.17 presenteres det hvordan ulike akkumuleringstemperaturer påvirker romtemperaturen og effektbruken i henholdsvis klasserom 2 og 5. Også her ser man at økningen i romtemperaturen når akkumuleringsperioden starter er relativt lik i de to klasserommene. Som forventet, jo høyere akkumuleringstemperaturen er, desto lengre tid tar det å nå SPT. Frem til $23^\circ C$ øker romtemperaturen raskt, deretter reduseres økningen. Fra omtrent $24^\circ C$ er denne økningen tilnærmet lineær. Der akkumuleringsperioden starter 16:00 er det tilstrekkelig med tid til å nå $26^\circ C$. Dersom akkumuleringsperioden hadde startet 22:00, som simulert for $25^\circ C$ i 5.3.1, er det tydelig at SPT ikke ville blitt nådd.

I likhet med tilfellene hvor ulike starttidspunkt for akkumuleringen ble undersøkt, kommer variasjonene tydeligere frem i klasserom 2 enn i klasserom 5 på grunn av en større termisk masse. Samtidig har endring av akkumuleringstemperatur en større effekt på klasserom 5 enn endring av starttidspunkt. Dette kan tydelig observeres i effektkurven i 5.17, hvor en akkumuleringstemperatur på $26^\circ C$ gir mye lavere energibruk på dagen enn $24^\circ C$. Dette viser at dersom strømprisvariasjonene er hyppige og relativt store, kan det ha god effekt å sette en høy akkumuleringstemperatur i klasserom 5.

Effekten av å øke akkumuleringstemperaturen er tydeligere i klasserom 2. I tilfellet hvor akkumuleringstemperaturen er 24°C har romtemperaturen sunket til 22°C innen kl. 06:00, som gjør at oppvarmingsenhetene skrues på i det ventilasjonen skrues på. Men når akkumuleringstemperaturen er 26°C , skrues oppvarmingsenhetene på rundt kl. 11:00. En tydelig forskjell kan også observeres i figur 5.18 hvor romtemperaturen er plottet sammen med overflatetemperaturen i de tre scenariene. Her ser man også at økning i temperatur har større effekt enn en lengre akkumuleringsperiode. Forskjellen i overflatetemperatur mellom de tre scenariene er større, som betyr at det er større forskjell mellom hvor mye varme som er lagret i konstruksjonen. I scenariet med 26°C tar det lang tid før romtemperaturen og overflatetemperaturen når 22°C , som er grunnen til at oppvarmingsenhetene skrues på så sent som kl. 11:00.

6.3.3 Kombinasjoner av starttidspunkt og akkumuleringstemperatur

I figur 5.19 og 5.20 ser man de samme tendensene for januar som i resultatene hvor starttidspunkt og akkumuleringstemperatur er variert hver for seg. Her er ulike kombinasjoner av akkumuleringstemperatur og starttidspunkt for akkumuleringsperioden undersøkt.

Som diskutert i 6.3.1 og 6.3.2 har endringene i akkumuleringstemperatur og starttidspunkt mindre betydning i klasserom 5 enn i klasserom 2. I januar er det en liten økning i andelen akkumulert varme ved høyere akkumuleringstemperatur, dette gjelder for alle starttidspunkt. I klasserom 5 er denne økningen så liten at den er ubetydelig. I klasserom 2, hvor varme bedre lagres, kan en tydeligere økning observeres. For kurven med starttidspunkt 22:00, hvor økningen er størst, øker andelen akkumulert varme med 6 prosentpoeng fra simuleringen med 24°C til 26°C som akkumuleringstemperatur.

I begge klasserommene, både i januar og april, kan det observeres at kortere akkumuleringsperiode gjør at en større andel av varmen lagres fra natt til dag. En kortere akkumuleringsperiode gir mindre tid til varmetap. Samtidig gir en kortere akkumuleringsperiode større begrensinger på hvor mye varme som kan lagres. Derfor vil variasjonene i strømprisen være avgjørende for å konkludere med hvilken løsning som gir de største besparelsene i strømkostnader.

I april er starttidspunktet for akkumuleringen mer avgjørende. I klasserom 2 er det stor forskjell mellom starttidspunktene særlig når akkumuleringstemperaturen er høy. Dette er fordi energibehovet på dagen er lavt på grunn av forholdsvis høy utendørstemperatur og høy solinnstråling. Dette gjør at effektbruken på dagen blir tilnærmet lik null uavhengig av hvor mye varme som er akkumulert på natta. I tilfellene med både høy akkumuleringstemperatur og lang akkumuleringsperiode brukes det derfor for mye energi på natta i forhold til hva energibehovet er på dagen. På dagtid den 07.04 i scenariet med akkumuleringstemperatur 26°C og starttidspunkt 16:00, holder klasserom 2 en romtemperatur på mellom 23 og 24°C gjennom hele skoledagen. Om romtemperaturen blir ubehagelig høy kan brukerne motvirke dette ved å f.eks. åpne vinduer eller dører, som vil føre til økt energibruk dersom temperaturen reduseres for mye. Resultatene viser at det er viktig å ta hensyn til forventet energibruk, slik at det ikke akkumuleres for mye varme.

Generelt, er ikke forskjellene mellom scenariene undersøkt over veldig store, sammenlignet med hvilken betydning variasjoner i strømprisen vil ha for lønnsomheten. Det må derfor undersøkes hvordan energibruken kan fordeles utover døgnet på en optimal måte i forhold til strømprisvariasjonene. Som diskutert gjennom dette delkapittelet (6.3), må det, basert på strømprisvariasjonene, avveies mellom to overordnede strategier: 1) akkumulering gjennom hele natta, som gir mulighet for mer akkumulering, men også større varmetap. Eller 2) et senere starttidspunkt som gir mindre varmetap, men redusert mulighet for akkumulering.

6.4 Økonomisk verifisering

Målet for den økonomiske verifiseringen var å undersøke om optimaliseringssystemet sørger for økonomiske besparelser i form av reduserte strømkostnader. Den økonomiske verifiseringen viser at i perioden 14.02-10.04 2023 oppnås lavere strømkostnader med optimaliseringssystemet enn uten i klasserom 2 og 5, selv om energibruken øker. I tillegg holdes det termiske inn klimaet på et akseptabelt nivå.

6.4.1 Vurdering av verifiseringsresultatene

Som vist i tabell 5.1 sørger optimaliseringssystemet for 6 % lavere strømkostnader sammenlignet med basisscenariet hvor SPT er på konstant $22^{\circ}C$, til tross for at energibruken øker med 6 %. Ved større døgnvariasjoner i strømprisen oppnås større økonomiske besparelser med mindre økning i energibruk, som vist i samme tabell for 12.03-14.03. De samme tendensene kan observeres for klasserom 5 i tabell 5.2, og her er resultatene enda bedre. I begge de undersøkte periodene oppnås det i klasserom 5 større besparelser i strømkostnadene med mindre økning i energibruk enn i klasserom 2.

Sammenligner man avlest og simulert romtemperatur for klasserom 2 og 5 i henholdsvis figur 5.24 og 5.27 ser man at modellen klarer å representere klasserom 5 bedre enn klasserom 2. I klasserom 5 samsvarer avlest og simulert temperatur veldig godt. For klasserom 2 samsvarer avlest og simulert romtemperatur dårligere, særlig når romtemperaturen synker. Når romtemperaturen synker, synker den simulerte temperaturen fortere. Dette kan bety at i det virkelige bygget holder rommet bedre på varme. En annen årsak kan være hvordan gulvvarmen reguleres. Selv om romtemperaturen er høyere enn SPT og panelovnene ikke er skrudd på, er gulvtemperaturen lavere enn SPT, som gjør at varmekablene skrur på. I modellen brukes overflatetemperaturen til gulvet for regulering av gulvvarmen. Trolig samsvarer ikke dette med hvordan gulvtemperaturen måles i det virkelige klasserommet. Rommets termiske masse kan også være en årsak, men under kalibreringen ble ulike tiltak for å øke den termiske massen til rommet prøvd ut, uten at det ga noen vesentlig effekt på resultatene.

I noen perioder er samsvaret mellom simulert og avlest romtemperatur i klasserom 2 veldig godt, blant annet 25.02.23. Her synker de to temperaturene på akkurat samme måte. Etter akkumuleringsperioden skrur både panelovnene og gulvvarmen av, både i modellen og det virkelige bygget. Siden rommet, i dette tidsintervallet, ikke er påvirket av noen oppvarmingsenheter kan bygningskroppen vurderes. Resultatene viser at bygningskroppen og den termiske massen i det virkelige bygget og modellen samsvarer godt. En annen forskjell som kan observeres er hvordan temperaturen øker når akkumuleringen settes i gang. Simulert temperatur øker mye fortere enn

avlest temperatur. Det kan tyde på at installert effekt i modellen er høyere enn i det virkelige rommet. Det er mulig at en reduksjon i oppvarmingsenhetenes effekt hadde vært nødvendig slik som det ble gjort for klasserom 5 i iterasjon 5 i kalibreringen.

Oppsummert, er verifiseringen utført i klasserom 5 mer pålitelig enn i klasserom 2. Samtidig viser sammenligning av avlest og simulert romtemperatur at den termiske massen i simuleringsmodellen er forholdsvis lik som i det virkelige rommet. Forskjellen i avlest og simulert temperatur skyldes kapasitet til oppvarmingsenheten når akkumuleringen starter, og målingen av gulvtemperaturen når temperaturen synker. Det er likevel tydelig at optimaliseringssystemet gir økonomiske besparelser i begge klasserommene.

6.4.2 Termisk komfort i verifiseringsperioden

En viktig forutsetning for at optimaliseringssystemet skal kunne brukes er at brukerkomforten er ivaretatt. Variasjonene i SPT utgjør en risiko for dårlig termisk komfort. I figur 5.29 og 5.30 er T_o i verifiseringsperioden i klasserommene simulert. Her kommer det klart frem at det termiske innklimaet i begge rommene er tilfredsstillende i de fleste timene det er personer til stede. I henhold til NS-EN-16798:2019, er det i klasserom 2 to uakseptable timer med personer til stede, mens i klasserom 5 er det null. T_o er generelt høyere i klasserom 2 på grunn av gulvvarmen, som reguleres med en høyere SPT. I tillegg har rommet store vindusflater mot sør, som vil føre til høyere temperatur i timene med høy solinnstråling.

I verifiseringsperioden er utendørs gjennomsnittstemperatur $-0,6^{\circ}C$, maksimumstemperatur $11,0^{\circ}C$ og minimumstemperatur $-15,8^{\circ}C$. Minimumstemperaturen ble registret natt til 9. mars, og 6.-11. mars var utendørstemperaturen, som vist i figur 5.22 relativt lav. I figur 5.21 ser man at strømprisen i denne perioden var høy. Kombinasjonen av høy strømpris og lav utendørstemperatur gjør at T_o i denne perioden synker. Det samme skjer i månedsskiftet mars-april, utendørstemperaturen er lav og strømprisen er høy, som fører til at T_o synker til et nivå hvor den termiske komforten er lavere. Selv om T_o synker holdes den på et akseptabelt nivå. Ifølge den adaptive komfortmodellen vil brukerne også godta en lavere innetemperatur når utetemperaturen er lav. Oppsummert tyder resultatene på at lave innendørstemperaturer ikke vil være et problem. Oppvarmingsenhetene har relativt kort t_d og liten t_d , i tillegg er deres y_0 , SPT, aldri lavere enn $19,5^{\circ}C$. Dette gjør at T_o sannsynligvis aldri vil synke til uakseptable nivåer over lang tid.

Simuleringene indikerer at overoppheting trolig vil være et større problem enn lave temperaturer. De to uakseptable timene i klasserom 2 er på grunn av for høy T_o . Disse timene forekommer 20. februar. Grunnen til overopphetingen er at det denne dagen, og de foregående dagene, akkumuleres mye varme, slik at effektbruken kan senkes når strømprisen øker kraftig 21. februar. Når utendørstemperaturen og solinnstrålingen øker mot sommeren kan problemet med for høye temperaturer forekomme oftere. Samtidig vil oppvarmingsbehovet reduseres. Akkumuleringen på natta vil da tilpasses energibehovet på dagen, som vil redusere risikoen for høye temperaturer på dagen. I tillegg vil brukerne, ifølge teorien om adaptiv komfort, i større grad akseptere høyere temperatur. Og siden dette er en skole vil ikke bygget være i bruk den varmeste perioden av året.

En svakhet ved systemet er at brukerens mulighet til å påvirke det termiske inn klimaet reduseres. Som forklart i 3.3.1 er NS-EN-16798:2019 primært tilpasset bygg hvor brukerne kan påvirke det termiske inn klimaet. Når optimaliseringssystemet brukes har ikke brukerne mulighet til å påvirke oppvarmingsenheter i rommet, dette kan føre til at brukerne føler på diskomfort både på grunn av for høy eller for lav romtemperatur. Som forklart i avsnittet over, vil for høye temperaturer mest sannsynlig være et større problem enn for lave temperaturer. Dermed brukerne opplever ubehag på grunn av for høye temperaturer vil de prøve å motvirke dette. En konsekvens av dette kan være at vinduer eller dører åpnes opp for å redusere temperaturen i rommene. Som presentert i 3.3.1 er muligheten for åpning av vinduer viktig for å ha muligheten til å ivareta en behagelig lufttemperatur, ifølge Folkehelseinstituttet og Helsedirektoratet. Om dette gjøres rett etter en periode med akkumulering vil den akkumulerte varmen gå til spille, og energibruken og strømkostnadene vil øke.

6.4.3 Årlige reduksjoner i strømkostnader ved Halsan skole

Resultatene fra klasserom 2 og 5 i verifiseringsperioden kan brukes til å estimere den totale reduksjonen i strømkostnader for hele skolen. Som vist i tabell 5.1 og 5.2 oppnås det i verifiseringsperioden en reduksjon av strømkostnadene på 6 % i klasserom 2 og 9 % sammenlignet med om SPT hadde vært konstant 22°C.

Det er rimelig å anta at 1997-fløyen har et lavere energibehov på grunn av en bedre isolert konstruksjon. Dette gjør det samlede potensialet for økonomiske besparelser lavere. En rekke ukjente faktorer vil ha en påvirkning på hvordan optimaliseringssystemet påvirker strømkostnadene i 1997-fløyen, blant annet U-verdier, termisk masse, romutforming, vindusareal, ventilasjon og lokale oppvarmingsenheter.

Videre må det vurderes om verifiseringsperioden er representativ for et helt år, dette gjelder både utendørstemperatur og strømpris. Som vist i figur 3.15 var variasjonene i strømpris i verifiseringsperioden relativt store sammenlignet med de to foregående årene, som generelt vil gi større økonomiske besparelser. Samtidig er det forventet at fremtidens strømmarked vil være preget av store variasjoner i strømprisen på grunn av en energimiks med større andel fornybare energikilder. [66] Selv om værforholdene i verifiseringsperioden ikke kan representere et helt år er variasjonene i utendørstemperaturen relativt store, som gjør at været er representativt for relativt store deler av oppvarmings sesongen.

Romtype vil også påvirke effektiviteten til optimaliseringssystemet. Unikt for klasserommene er at varmebalansen påvirkes spesielt mye av interne laster under skoledagen. Ventilasjonen påvirker også varmebalansen, både luftmengde og regulering (VAV eller CAV). I tillegg vil forholdet mellom den installerte effekten til panelovner og gulvvarme påvirke effektiviteten til systemet.

Oppsummert vil faktorene diskutert over alle ha en betydning for de årlige besparelsene i strømkostnader optimaliseringssystemet gir for hele Halsan barneskole. Samtidig er det ingen av faktorene som veldig tydelig preger lønnsomheten, og en har klart å fange opp forholdsvis store variasjoner i verifiseringsperioden. Derfor kan det antas at optimaliseringssystemet vil gi en årlig reduksjon i strømkostnadene for hele skolen som er forholdsvis lik det som er observert for klasserom 2 og 5, anslagsvis 5-10 %. En utvidelse av simuleringsmodellen, samt en

lengre verifiseringsperioden vil gi resultater med større nøyaktighet. I tillegg ligger det et utforsket potensial i de effektreduserende tiltakene, som mest sannsynlig vil gi reduserte nettleiekostnader.

6.4.4 Vurdering av verifiseringskonseptet

I dette delkapittelet utføres en vurdering av konseptet for verifisering av økonomiske besparelser presentert i 4.1. Deler av delkapittelet er hentet fra fordypningsprosjektet [1].

I dette tilfellet, hvor det ikke var tilgang på detaljert informasjon om skolens energibruk før oppgraderingen og avleste verdier fra undermålere viste seg å være ukorrekte, var det nødvendig å simulere bygget for å verifisere effekten av optimaliseringssystemet. Samtidig gir bruk av en modell til verifisering andre fordeler. Først og fremst blir verifiseringsmetoden svært fleksibel. Både under kalibreringen av basismodellen, samt i vurderingen av ulike variasjoner, som akkumuleringstemperatur og endret termisk masse, har det vært nyttig med en svært fleksibel verifiseringsmetode. Metoden gjør det enkelt å endre på parametere for å se hvordan dette påvirker romtemperatur, overflatetemperatur og energibruk. I tillegg gir IDA-ICE, og andre simuleringsprogram som også kunne blitt valgt, detaljerte rapporter som gjør det mulig å undersøke endringene av disse faktorene på en detaljert måte.

Modellen kan også være til nytte etter at verifiseringen er utført. Simuleringsmodellen kan senere benyttes for å vurdere ulike energieffektiviseringstiltak. Tiltak som utskifting av vinduer eller etterisolering kan enkelt implementeres i modellen for å undersøke tiltakenes effekt. Størst nytte vil modellen ha for ISI-Tech som kan bruke modellen av skolen til å teste endringer for optimaliseringssystemet og sammenligne ulike tiltak for en mer effektiv regulering av temperatur, belysning og ventilasjon.[1]

Som diskutert i 6.1 gjør sammenligningen av to modeller verifiseringen mer nøyaktig. På grunn av feil i de avleste dataene måtte den originale planen med å sammenligne modell A med avleste data endres til sammenligning av modell A og B. Selv om ikke modell B gjenspeiler den eksakte ytelsen til bygget, som korrekte avleste data gjør, gjør sammenligningen av to modeller verifiseringen mer nøyaktig.

Korrekte målinger fra SD-anlegget er viktig. Selv om faren for ukorrekte målinger fra SD-anlegget er eliminert til en viss grad ved sammenligning av to modeller, kan ukorrekte data fortsatt ha en påvirkning på verifiseringsresultatene. Et eksempel på dette er målingene av CO_2 -konsentrasjonen som viste seg å være feil. Når variablene implementeres i modellen er det avgjørende at de er så korrekte som mulig for å fange opp dynamikken i det virkelige bygget. En for liten tilluftsmengde til rommene, for eksempel, vil redusere energibruken i simuleringsmodellen betraktelig. [1]

En modell vil aldri bli helt lik som det virkelige bygget. Dette kan en for eksempel se for klasserom 2, hvor samspillet mellom gulvarme og panelovner gjorde det vanskelig å oppnå et godt samsvar mellom avlest og simulert romtemperatur. En annen svakhet ved den valgte metoden er at kun en del av skolen er undersøkt. Ved å kun undersøke 1987-fløyen av skolen får en ikke et fullstendig bilde av hvordan oppgraderingen påvirker

hele skolen. Forskjellene mellom 1987-fløyen og 1997-fløyen vil, som diskutert i 6.4.3, påvirke lønnsomheten til optimaliseringssystemet. På den andre siden, gjør avgrensingen av omfanget for verifisering det mulig å kalibrere og undersøke de valgte sonene med større nøyaktighet.

6.5 Økonomisk optimalisering

I den økonomiske optimaliseringen er ulike parametere endret og kombinert for å undersøke hvordan de påvirker de økonomiske besparelsene. I dette delkapittelet er disse endringene analysert med mål om å finne tiltak som vil øke lønnsomheten til optimaliseringssystemet.

6.5.1 Akkumuleringstemperatur- og lengde

I dette delkapittelet er ulike kombinasjoner av akkumuleringstemperatur og starttidspunkt på akkumuleringsperioden i kombinasjon med ulike variasjoner i strømprisen analysert og diskutert.

Som forklart innledningsvis i 5.5 har ikke amplituden på strømprisene noen betydning for størrelsen på den prosentvise reduksjonen i strømkostnader. Det vi si at så lenge størrelsesforholdet i variasjonene er de samme, f.eks. dobling av strømprisen fra natt til dag, vil den prosentvise endringen i strømkostnadene være den samme. Dette resultatet er av stor betydning for KI-algoritmen i optimaliseringssystemet som bestemmer hvordan SPT skal variere. I praksis betyr dette at algoritmen ikke trenger å ta hensyn til sesongvariasjoner i strømprisen, kun døgnvariasjonene.

Resultatene vist i figur 5.32 til 5.35 gir verdifull informasjon om hvordan ulike variasjoner i strømprisen kan utnyttes. De samme tendensene kan observeres i begge klasserommene og i begge månedene. Resultatene viser imidlertid at potensialet for økonomiske besparelser er større i klasserom 2. Dette er motsatt av hva som ble observert i den økonomiske verifisering, hvor de økonomiske besparelsene i klasserom 5 var størst. Dette kan være på grunn av lengden til akkumuleringsperiodene i verifiseringsperioden som bestemmes av strømprisen, som er bedre tilpasset klasserom 5 enn 2.

Strømkurvene brukt i den økonomiske optimaliseringen er vist i figur 5.31. Resultatene for *strømkurve 1* viser at det brukes mer energi når akkumulering skjer på natta, som innebærer at konstant strømpris gir økt strømkostnad. *Strømkurve 2* viser at økningen i strømpris fra natt til dag må være av en viss størrelse for å oppnå økonomiske besparelser. Allerede med en økning på 50 % fra natt til dag, i *strømkurve 3*, kan besparelser observeres for de fleste kombinasjonene av akkumuleringstemperatur og starttidspunkt. Selv om noen forskjeller kan observeres er det generelt liten forskjell på besparelsene for *strømkurve 3-5*. Det ser ut som at når økningen i strømpris er liten er det hensiktsmessig med en kortere akkumuleringsperiode slik at størrelsen på energitapet i akkumuleringsperioden minimeres. Når økningen i strømpris fra natt til dag blir større, blir det mer lønnsomt å bruke mye energi til akkumulering på natta. Denne tendensen kan observeres i begge klasserommene i både januar og april. Jo større variasjonen fra natt til dag blir, desto mer lønnsomt blir det å bruke en høy akkumuleringstemperatur og en lang akkumuleringsperiode. Dette stemmer godt overens med observasjonene fra 6.3.3. En kortere akkumuleringstemperatur gjør at energitapet blir mindre, men ved en lengre akkumuleringsperiode

kan mer varme akkumuleres, som er fordelaktig når strømprisvariasjonene er store.

Den mest ekstreme kombinasjonen av akkumuleringstemperatur og starttidspunkt med hensyn til økonomiske besparelser er 26°C ved 16:00. Ved små variasjoner i strømprisen er denne kombinasjonen den minst lønnsomme, og motsatt når variasjonene er store. Dette viser at det er viktig å tilpasse akkumuleringsperioden til strømprisvariasjonene. Den største besparelsen oppnås i klasserom 2 i april med *strømkurve 7*. I simuleringen med akkumuleringstemperatur på 26°C og når akkumuleringsperioden starter 16:00, er strømkostnadene redusert med nesten 50 % sammenlignet med om SPT hadde vært konstant 22°C . For denne strømkurven er det også store forskjeller mellom de ulike kombinasjonene av akkumuleringstemperatur og akkumuleringslengde. I den dårligste kombinasjonen, 24°C og akkumuleringsstart 22:00, er den økonomiske besparelsen omtrent 25 prosentpoeng lavere enn for 26°C ved 16:00. Resultatene viser at det er viktig å utnytte de store døgnvariasjonene i strømprisene.

Som diskutert over, lønner det seg å bruke så mye som mulig energi på natta når økningen i strømpris fra natt til dag er stor. Det kan derfor vært interessant å øke både akkumuleringstemperaturen og -lengden for enda bedre ytelse i disse situasjonene. Samtidig vil termisk komfort og typiske døgnvariasjoner i strømprisen sette begrensinger for dette. Med strømkurvene vist i figur 5.31, og vanlige døgnvariasjoner i strømprisen, vil det ikke være hensiktsmessig å starte akkumuleringen tidligere fordi strømprisene ofte er høyere tidligere på dagen. I tillegg vil den dårlig isolerte bygningskroppen etter hvert sette begrensinger for hvor lenge det er lønnsomt å lagre varme i rommene. Et tidligere starttidspunkt vil være i konflikt med de effektreduserende tiltakene. Av figur 3.2 ser man at om akkumuleringen starter før kl. 16:00 vil dette begrense de effektreduserende tiltakene. Høyere akkumuleringstemperatur kan også være et alternativ for akkumulering av mer varme, men da må man sørge for at T_o synker nok til skoledagen starter, slik at den ikke oppleves ubehagelig høy. Til slutt må også energibehovet på dagen vurderes. Som diskutert i 6.3.3, vil det ikke være lønnsomt å akkumulere mer varme enn energibehovet krever. Om bygget hadde vært bedre isolert kunne varme blitt lagret lengre. På den andre siden, vil et bedre isolert bygg, med lav termisk masse, ført til en høyere romtemperatur.

6.5.2 Termisk masse

For å undersøke hvor godt konstruksjonen til rommene ved Halsan skole egner seg for akkumulering av varme er noen av kombinasjonene i 6.5.1 undersøkt i en simuleringsmodell med økt termisk masse. I figur 5.32 til 5.42 er effekten av økt termisk masse i klasserom 2 og 5 presentert. Det var ønskelig å undersøke de mest ekstreme scenariene fra 6.5.1. Først og fremst kan man her se at den økte termiske massen ikke endrer hvilke kombinasjoner som er mest lønnsomme i de ulike klasserommene og periodene. Generelt lønner det seg å bruke mye energi til akkumulering på natta når variasjonene i strømprisene er store.

Felles for alle scenariene er at den økte termiske massen gjør at t_s øker. Dette gir blant annet relativt like resultater for 24°C og 26°C ved starttidspunkt 22:00 i klasserom 2 i januar. Grunnen er at en større t_s fører til at kl. 05:00 har romtemperatur akkurat nådd 24°C , selv om oppvarmingsenhetene har levert 100 % av maksimal kapasitet gjennom hele akkumuleringsperioden.

I scenariene med akkumuleringstemperatur 24°C og i januar for 26°C ved 16:00 kan de samme tendensene observeres. Utslagene er imidlertid størst i scenariet med 26°C ved 16:00. Den generelle tendensen er at ved små strømprisvariasjoner er lav termisk masse mer lønnsomt, mens ved store variasjoner er en større termisk masse mer lønnsomt. Årsaken til dette kan man se i forskjellen mellom figur 5.38 og 5.39. I disse grafene er energibalansen i klasserom 2 ved 26°C 16:00 i januar vist, men den samme tendensen kan ses i de nevnte scenariene over i begge klasserommene. Fordi t_s er større i tilfellet med økt termisk masse (figur 5.39) brukes de lokale oppvarmingsenhetene ved maksimal kapasitet gjennom hele akkumuleringsperioden. Med den originale termiske massen i figur 5.38 reduseres effekten til de lokale oppvarmingsenhetene mellom 00:00 og 01:00 fordi SPT er nådd. Når effekten til de lokale enhetene reduseres avgis det mindre varme til konstruksjonen (*Bygningskropp og kuledebroer [W], Interne vegger og masser [W]*). Resultatet av dette ser man mot slutten av den påfølgende skoledagen i energibalansen. I den originale konstruksjonen er effektbruken til de lokale enhetene større enn i konstruksjonen med økt termisk masse. Forskjellen skyldes større varmetap til konstruksjonen i tilfellet med original termisk masse fordi det fra natta er lagret mindre varme i konstruksjonen. Den høyere mengden varme som er lagret i konstruksjonen med større termisk masse fungerer som en buffer. Den økte termiske massen fungerer altså slik at varmebehovet flyttes fra ettermiddagen, når strømprisen er høy, til etter midnatt den foregående natta, når strømprisen er lavere. I figur 5.39 ser man at denne effekten blir bedre for hver akkumuleringsperiode, mer og mer varme lagres i konstruksjonen. Flyttingen av dette energibehovet fra ettermiddagen til den foregående dagen medfører et energitap under lagringen av varmen. Derfor må strømprisvariasjonene fra natt til dag være av en viss størrelse for at lagringen skal lønne seg. Dette er grunnen til at en lav termisk masse er mer lønnsomt når strømprisvariasjonene er små, og motsatt når variasjonene er store.

Når akkumuleringen starter 22:00 er det den samme dynamikken som beskrevet over som avgjør lønnsomheten for original og høyere termisk masse. Men her gjør en kort akkumuleringsperiode at større strømprisvariasjoner kreves for at en økt termisk masse skal gi større besparelser enn original konstruksjon. I løpet av den korte akkumuleringsperioden er det begrenset hvor mye varme som kan lagres i konstruksjonen. Dette ble også observert i 6.3.1 hvor overflatetemperaturene i den originale konstruksjonen for ulike starttidspunkt for akkumuleringsperioden ble undersøkt. Her så man også at starttidspunkt 22:00 gir begrenset mulighet for akkumulering av varme i konstruksjonen. Effekten øker i tilfellet med økt termisk masse.

I det mest ekstreme scenariet 26°C 16:00 er forskjellen mellom januar og april betydelig i begge klasserommene. Uansett variasjon i strømprisene blir ikke denne kombinasjonen av akkumuleringstemperatur og -lengde mer lønnsom med økt termisk masse i april. Bruk av denne kombinasjonen i april gjør at det akkumuleres mer varme enn nødvendig. I figur 5.40 er utviklingen i romtemperaturen og effektbruken gjennom de ulike akkumuleringsperiodene i april i klasserom 2 vist. Den høye utendørstemperaturen gjør at romtemperatur etter akkumuleringen avtar sakte. Mot slutten av dagen har ikke romtemperaturen sunket til 22°C enda. Dette gjør at akkumuleringen de neste nettene krever mindre energi og energibruken til de lokale enhetene er lik null på dagtid gjennom hele perioden. Samtidig gjør kombinasjonen av akkumuleringstemperatur og -lengde at for mye varme akkumuleres på natta. Dette medfører at romtemperaturen blir høy på dagen. Fordi en så stor andel av varmen lagres fra natt

til dag, blir scenariet med økt termisk masse mindre lønnsomt sammenlignet med den originale konstruksjonen. Om akkumulering av varme fra natt til dag skal gjøres i rom med økt termisk masse når utendørstemperaturen er forholdsvis høy, kan en lavere akkumuleringstemperatur eller kortere akkumuleringsperiode benyttes. Dette ble også konstatert i 6.2.2.

En viktig årsak til at konstruksjonen med økt termisk masse ikke presterer bedre, er at den er dårlig isolert. Som forklart i 3.6 bør en termisk tung konstruksjon være godt isolert for å oppnå en god varmelagringsevne over lengere tid på vinteren. Her er U-verdiene fremdeles i henhold til TEK85-kravene. Resultatet av dette er at mye av varmen som overføres til den termiske massen på natta går tapt, og kun en mindre andel av denne varmen slippes fri tilbake i rommet på dagtid. Dette vises tydelig ved sammenligning av figur 5.38 og 5.39. Dersom konstruksjonen hadde vært bedre isolert hadde mer varme blitt lagret fra natta til ettermiddagen. Dermed ville også mindre variasjoner i strømprisen gitt bedre lønnsomhet for den høye termiske massen enn den lave.

Den økonomiske optimaliseringen med økning av simuleringsmodellens termiske masse har vist at Halsan skoles lave termiske masse ikke nødvendigvis trenger å være en ulempe. I scenariet hvor de største besparelsene oppnås, for begge konstruksjonene, gjør den økte termiske massen lønnsomheten klart bedre. I januar ser man dette klart i resultatene, og i april vil dette mest sannsynlig oppnås med justert akkumuleringsperiode for å bedre møte energibehovet på dagen. I de kortere akkumuleringsperiodene vil man, særlig når variasjonene i strømprisen ikke er alt for store, dra fordel av å ha en lavere termisk masse. Dette skyldes at en høyere termisk masse krever en lengre akkumuleringsperiode. Som igjen betyr at med et effektivt optimaliseringssystem som kjenner byggets dynamikk kan gode resultater oppnås, selv om varmelagringsevnen til bygget er begrenset.

6.6 Potensiale for videre bruk

Som forklart i litteraturstudiet (2) er bruk av KI innenfor BAS fremdeles under utvikling. Systemene presentert i litteraturstudiet er hovedsakelig gjennomført på et vitenskapelig nivå og har i begrenset grad blitt testet ut i virkelige bygg over lengre tid. Implementeringen av optimaliseringssystemet ved Halsan skole har gitt verdifull informasjon om hvordan KI kan brukes til energieffektivisering i et virkelig bygg.

Unikt for optimaliseringssystemet ved Halsan skole er målet for reguleringen. De fleste studiene i litteraturstudiet har som mål å redusere energibruk og/eller sørge for et forbedret inneklima. Målet ved Halsan skole er økt forbrukerfleksibilitet med strøm- og effektkostnader som motivasjon, samtidig skal brukerkomforten ivaretas. Optimaliseringssystemet må både tilpasse seg byggets fysikk og brukernes adferd, samt lokale variasjoner i strømmarkedet og været. Det er derfor vanskelig å sammenligne ytelsen til optimaliseringssystemet med andre studier, men resultatene fra den økonomiske verifiseringen viser tydelig at målet om reduserte strømkostnader er oppnådd.

6.6.1 Tilpasningsdyktighet

KI teknologien gjør at optimaliseringssystemet enklere kan overføres til andre bygg. Akkumulering av varme fra natt til dag med mål om å redusere effekttopper og strømkostnader kan også utføres av systemer som ikke er

basert på læringsbaserte metoder/KI. Som forklart i litteraturstudiet, kan modellbaserte metoder også brukes. Dette er metoder som bruker forenklete matematiske modeller og data om bygget. Fordelen til de læringsbaserte modellene er at de gjør det lettere å lage en detaljert modell av systemet, og de er ikke avhengig av detaljerte beskrivelser av systemet. I tillegg kan de læringsbaserte modellene generaliseres mer, fordi de i motsetning til de modellbaserte metodene, kan læres opp til å fungere i ulike bygninger [1]. Dette betyr at optimaliseringssystemet har et godt spredingspotensiale, på grunn av systemets tilpasningsdyktighet. Siden de læringsbaserte metodene ikke krever detaljerte data om hvert enkelt bygg, er de godt egnet for eldre bygg som Halsan skole, hvor en stor del av byggets egenskaper er ukjent på grunn av manglende data. Resultatene i denne rapporten har vist at systemet også vil fungere bra i bygg med lav termisk masse og lave U-verdier, som er typisk for den eldre delen av den norske bygningsmassen.

6.6.2 Begrensninger

Som forklart i litteraturstudiet, kan utbredelsen av BAS basert på KI-algoritmer begrenses av både brukerbestemte og tekniske faktorer. De brukerbestemte begrensningene nevnt i litteraturstudiet, lønnsomhet og personvern, er også relevant her. Blant de tekniske begrensningene er tilgang på data, datakvalitet og pålitelighet relevant.

For at optimaliseringssystemet skal kunne spres videre til bruk i andre bygg er det avgjørende at det er lønnsomt å installere for de som driver byggene. Sammenlignet med andre energisparingstiltak, som etterisolering og installering av solceller eller en varmepumpe, er investeringskostnaden til systemet relativt lav. Ingen av de eksisterende systemene ved skolen måtte byttes ut eller endres. Optimaliseringssystemet sørger for at de eksisterende systemene brukes på en mer kostnadseffektiv måte. Investeringene vil inkludere installasjon av sensorer og undermålere, i tillegg til oppsett av optimaliseringssystemet og koble det til SD-anlegget. Små fysiske inngrep i bygget gjør også at klimafotavtrykket til oppgraderingen vil være lavt.

Personvern og datasikkerhet er også et viktig aspekt som må vurderes. Optimaliseringssystemet er koblet til internett og enhetene benytter IP-basert kommunikasjon. Data som forteller om brukernes adferd lagres over lengre tid. Ved Halsan skole er ikke overvåkingen like omfattende som i for eksempel Huang og Hao [18] og Tien mfl. [16], hvor brukerne filmes. Likevel sier CO_2 -nivået noe om når det er personer til stede i rommet. Systemets tilknytning til internett kan gjøre det utsatt for dataangrep og hacking.

Tilgang på data av god kvalitet er avgjørende for at systemet skal fungere best mulig. Som diskutert i litteraturstudiet, er tilgang på data en viktig forutsetning før at læringsbaserte systemer skal driftes best mulig. Ved Halsan skole betyr dette at etter at systemet var installert måtte en periode med datainnsamling gjennomføres. En annen viktig faktor for best mulig drift er datakvaliteten. I optimaliseringssystemet sjekkes det om målingene er pålitelige. Et filter brukes og hvis data avviker fra det som er forventet, erstattes dataene med forventet verdi. Alle feil vil ikke oppdages med et slikt filter. Som forklart i 4.2.7 er det oppdagte feil ved undermålerne som måler de lokale oppvarmingsenhetens effektbruk og i CO_2 -målinger som brukes i regulering av ventilasjonen. Det vil alltid være en risiko for at måleutstyr er dårlig kaliberet eller ikke fungerer på tiltenkt måte og dette

må tas høye for. Dette gjelder også i tradisjonelle BAS.

Oppsummert vil faktorene diskutert over trolig ikke være begrensende for bruk av optimaliseringssystemet i andre bygg, men dette må vurderes individuelt. Bruken av systemet ved Halsan skole siden 2019 har vist at systemet kan fungere godt tross potensielle begrensinger.

6.6.3 Samfunnsnytte

I et større bilde kan optimaliseringssystemet gi en samfunnsmessig gevinst. Som Energikommisjonen trekker frem i sin rapport om det norske kraftmarkedet, *NOU 2023: 3 Mer av alt - raskere*, vil forbrukerfleksibilitet være en viktig del av utviklingen av kraftmarkedet [79]. Videre ligger det mye potensiale i oppgraderingen av norske eksisterende bygg. I fastlands-Norge står bygningsmassen for over 50 % av bruken av elektrisitet. I rapporten skrevet av SINTEF Byggforsk på oppdrag av Riksantikvaren, *Grønt er ikke bare en farge: Bærekraftige bygninger eksisterer allerede*, konkluderer forfatterne med at det er et stort uutnyttet potensiale for miljøgevinster i den eksisterende bygningsmassen. Videre sier rapporten at rehabilitering burde prioriteres foran riving og bygging av nye bygg, dersom dette er mulig. Oppgradering av eksisterende bygg er i større grad i tråd med FNs bærekraftsmål og med Paris-avtalens ambisjoner.[87] Optimaliseringssystemet kan være en av lagringsløsningene nevnt i Energikommisjonens rapport, som gjør det lettere å flytte energibruken vekk fra topplasttimene. Funnene gjort ved simulering av Halsan skole, som viser at optimaliseringssystemet effektivt kan flytte effektforbruket bort fra topplasttimene i en eldre trebygning, viser at en større utbredelse vil ha en samfunnsmessig nytte. I tillegg er det essensielt for spredningen av systemet, at det gjør at skolen kan redusere kostnadene sine.

I denne rapporten har kun den ene delen av optimaliseringssystemet blitt verifisert, reduksjon av strømkostnader basert på variasjoner i strømprisen. I tillegg ligger det et potensiale i delen av optimaliseringssystemet som går på reduksjon av effekttopper, presentert i 3.1.4. I det videre arbeidet vil det være interessant å se på hvordan dette kan bidra til å redusere forbruket i topplasttimene ytterligere.

7 Konklusjon

I denne rapporten har optimaliseringssystemet, som optimaliserer regulering av varme og ventilasjon basert på beregninger ved bruk av KI, installert ved Halsan skole, blitt undersøkt. Hovedmålet for rapporten var å verifisere de økonomiske besparelsene systemet gir. I tillegg har systemets energiytelse blitt undersøkt. Avslutningsvis er en økonomisk optimalisering utført for å undersøke hvordan ulike faktorer påvirker lønnsomheten til systemet.

Den økonomiske verifiseringen, hvor det ble undersøkt om optimaliseringssystemet ga reduserte strømkostnader, ble gjennomført for perioden 14.02-10.04 2023. Av verifiseringen kan det konkluderes med at systemet gir reduserte strømkostnader. Verifiseringen ble utført for to av klasserommene i den eldste delen av skolen, den totale reduksjonen av strømkostnader i verifiseringsperioden i klasserommene var henholdsvis 6 % og 9 %. Analyser av det termiske inneklimaet viser at et akseptabelt inneklima er ivarettatt. Likevel er romtemperaturen, i noen tilfeller, relativt høy. I disse periodene må systemet tilpasses brukernes adaptive muligheter.

Vurderingen av systemets energiytelse bekreftet antagelsen om at varmekablene i klasserom 2 gir bedre utnyttelse av rommets termiske masse. Sammenligningen av ulike perioder i løpet av oppvarmingsseasonen viser at potensialet for økonomiske besparelser er tydelig bedre ved lavere utendørstemperaturer på grunn av et større energibehov til oppvarming. I de varmere månedene er det viktig å tilpasse akkumuleringen på natta til energibehovet den påfølgende dagen for å sikre et godt termisk inneklima, samt at akkumuleringen skal være mest mulig lønnsom.

I den økonomiske optimaliseringen ble ulike faktorer variert for å undersøke hvordan de påvirker de økonomiske besparelsene. Her kom det frem at når variasjonene i strømprisene er store bør det akkumuleres mye varme i periodene med lav strømpris, i form av høy akkumuleringstemperatur og lang akkumuleringsperiode. I perioder med mindre variasjoner i strømprisen har endring av akkumuleringstemperatur og -lengde mindre påvirkning på de økonomiske besparelsene. Videre ble det konstatert at den lave termiske massen til den undersøkte delen av skolen, en trebygning bygget i 1987, ikke nødvendigvis er en begrensning for effektiv utnyttelse av strømprisvariasjoner ved akkumulering av varme. Ved akkumulering over lengre perioder, 12-13 timer, og når strømprisvariasjonene er store, vil en økt termisk masse være klart fordelaktig. Ved mindre variasjoner i strømprisen, og særlig når akkumuleringsperioden er forholdsvis kort, vil bedre resultater oppnås for den originale konstruksjonen med en lavere termisk masse.

Oppsummert er det klart at optimaliseringssystemet, ved bruk av KI, klarer å redusere Halsan skoles strømkostnader med anslagsvis 5-10 %. Ved bruk av KI kan skolebyggets dynamikk utnyttes på en kostnadseffektiv måte, tross byggets i utgangspunktet dårlige termiske egenskaper. Videre gjør bruk av en læringsmodell, sammenlignet med en matematisk modell, systemet svært tilpasningsdyktig. Dermed øker spredningspotensialet til optimaliseringssystemet for bruk i andre bygninger. Denne metoden for regulering av romoppvarming passer godt inn i dagens og fremtidens kraftmarked, fordi fleksibilitet på brukersiden er essensielt for å kunne implementere en større andel fornybare energikilder i energimiksen som en del av det grønne skiftet.

8 Videre arbeid

I denne rapporten er det utviklet en detaljert simuleringsmodell av Halsan skole og i tillegg gjort omfattende undersøkelser av optimaliseringssystemet installert ved skolen. Likevel er det mye arbeid som kan videreføres for å bedre forstå ytelsen til systemet og verifisere økonomiske besparelser.

Først og fremst bør verifiseringsperioden utvides, slik at sesongvariasjoner i vær og strømpriser kan tas hensyn til i større grad. Når optimaliseringssystemet har blitt brukt over en lengre periode vil man få tilgang på data som kan brukes for å utvide verifiseringen.

Simuleringsmodellen kan forbedres og utvides for å mer nøyaktig kunne undersøke optimaliseringssystemets ytelse. Hovedfokuset innenfor forbedring av modellen bør være å bedre modelleringen av varmekablenes regulering. Oppvarming ved bruk av varmekabler har vist seg å være effektivt med tanke på akkumulering av varme i konstruksjonen, derfor bør dette undersøkes ytterligere. Videre vil det være nyttig å utvide simuleringsmodellen, ved å kalibrere flere rom i detalj og modellere 1997-fløyen.

Avslutningsvis vil det være interessant å undersøke hvordan de effektreduserende tiltakene påvirker energibruken, og på grunnlag av dette undersøke om de effektreduserende tiltakene er økonomisk lønnsomme. Siden fastleddet i nettleien baserer seg på hele byggets effektuttak bør en utvidet modell, som omfatter større deler av skolen, brukes i dette arbeidet.

Referanser

- [1] Emma D. Myrbekk. “Verifisering av tiltak for energieffektivisering basert på kunstig intelligens - Halsan skole”. Fordypningsprosjekt. Trondheim: NTNU, 20. des. 2022.
- [2] NTNU og SINTEF. *Enøk i bygninger - Effektiv energibruk*. 3. utgave. Gyldendal undervisning, 2007.
- [3] Harald Øverby. *tingenes internett*. I: *Store norske leksikon*. 19. okt. 2021. URL: http://snl.no/tingenes_internett (sjekket 07.12.2022).
- [4] Axel Tidemann. *kunstig intelligens*. I: *Store norske leksikon*. 8. jan. 2020. URL: http://snl.no/kunstig_intelligens (sjekket 08.11.2022).
- [5] Yassine Himeur mfl. “AI-big data analytics for building automation and management systems: a survey, actual challenges and future perspectives”. I: *Artificial Intelligence Review* (15. okt. 2022). ISSN: 0269-2821, 1573-7462. DOI: 10.1007/s10462-022-10286-2. URL: <https://link.springer.com/10.1007/s10462-022-10286-2> (sjekket 11.11.2022).
- [6] Henrik Dvergsdal og Anne Cathrine Elster. *stordata*. I: *Store norske leksikon*. 15. sep. 2022. URL: <http://snl.no/stordata> (sjekket 11.11.2022).
- [7] *Machine Learning Steps: A Complete Guide* | *Simplilearn*. Simplilearn.com. URL: <https://www.simplilearn.com/tutorials/machine-learning-tutorial/machine-learning-steps> (sjekket 15.12.2022).
- [8] *A free online introduction to artificial intelligence for non-experts*. Elements of AI. URL: <https://course.elementsofai.com/> (sjekket 07.12.2022).
- [9] Pablo Aparicio-Ruiz mfl. “KNN and adaptive comfort applied in decision making for HVAC systems”. I: *Annals of Operations Research* 303.1 (1. aug. 2021), s. 217–231. ISSN: 1572-9338. DOI: 10.1007/s10479-019-03489-4. URL: <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03489-4> (sjekket 16.11.2022).
- [10] J. Fergus Nicol. “Adaptive comfort”. I: *Building Research & Information* 39.2 (1. apr. 2011). Publisher: Routledge eprint: <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.558690>, s. 105–107. ISSN: 0961-3218. DOI: 10.1080/09613218.2011.558690. URL: <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.558690> (sjekket 16.11.2022).
- [11] Paulo Carreira mfl. “Can HVAC really learn from users? A simulation-based study on the effectiveness of voting for comfort and energy use optimization”. I: *Sustainable Cities and Society* 41 (1. aug. 2018), s. 275–285. ISSN: 2210-6707. DOI: 10.1016/j.scs.2018.05.043. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670717312301> (sjekket 16.11.2022).
- [12] H. Hagrais mfl. “Creating an ambient-intelligence environment using embedded agents”. I: *IEEE Intelligent Systems* 19.6 (2004), s. 12–20. ISSN: 1541-1672. DOI: 10.1109/MIS.2004.61.
- [13] Abdul Afram og Farrokh Janabi-Sharifi. “Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC)”. I: *Building and Environment* 72 (1. feb. 2014), s. 343–355. ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.11.016. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132313003363> (sjekket 14.12.2022).
- [14] Guanyu Gao, Jie Li og Yonggang Wen. “DeepComfort: Energy-Efficient Thermal Comfort Control in Buildings Via Reinforcement Learning”. I: *IEEE Internet of Things Journal* 7.9 (sep. 2020). Conference

Name: IEEE Internet of Things Journal, s. 8472–8484. ISSN: 2327-4662. DOI: 10.1109/JIOT.2020.2992117.

- [15] Fatma Mtibaa mfl. “Context-aware Model Predictive Control framework for multi-zone buildings”. I: *Journal of Building Engineering* 42 (1. okt. 2021), s. 102340. ISSN: 2352-7102. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102340. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221001960> (sjekket 19.11.2022).
- [16] Paige Wenbin Tien, Shuangyu Wei og John Calautit. “A Computer Vision-Based Occupancy and Equipment Usage Detection Approach for Reducing Building Energy Demand”. I: *Energies* 14.1 (jan. 2021). Number: 1 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, s. 156. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en14010156. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/1/156> (sjekket 20.11.2022).
- [17] Weiming Shen, Guy Newsham og Burak Gunay. “Leveraging existing occupancy-related data for optimal control of commercial office buildings: A review”. I: *Advanced Engineering Informatics* 33 (1. aug. 2017), s. 230–242. ISSN: 1474-0346. DOI: 10.1016/j.aei.2016.12.008. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034616301987> (sjekket 21.11.2022).
- [18] Qian Huang og Kangli Hao. “Development of CNN-based visual recognition air conditioner for smart buildings”. I: *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)* 25.21 (21. jul. 2020), s. 361–373. DOI: 10.36680/j.itcon.2020.021. URL: <http://itcon.org/paper/2020/21> (sjekket 20.11.2022).
- [19] Brent Huchuk, Scott Sanner og William O’Brien. “Comparison of machine learning models for occupancy prediction in residential buildings using connected thermostat data”. I: *Building and Environment* 160 (1. aug. 2019), s. 106177. ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106177. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132319303877> (sjekket 20.11.2022).
- [20] Sasa Pesic mfl. “BLEMAT: Data Analytics and Machine Learning for Smart Building Occupancy Detection and Prediction”. I: *International Journal on Artificial Intelligence Tools* 28 (1. sep. 2019), s. 1960005. DOI: 10.1142/S0218213019600054.
- [21] Nivethitha Somu, Gauthama Raman M R og Krithi Ramamritham. “A deep learning framework for building energy consumption forecast”. I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 137 (1. mar. 2021), s. 110591. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110591. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120308753> (sjekket 19.11.2022).
- [22] Jihoon Moon mfl. “Forecasting power consumption for higher educational institutions based on machine learning”. I: *The Journal of Supercomputing* 74.8 (1. aug. 2018), s. 3778–3800. ISSN: 1573-0484. DOI: 10.1007/s11227-017-2022-x. URL: <https://doi.org/10.1007/s11227-017-2022-x> (sjekket 05.12.2022).
- [23] Abdul-Rahman Al-Ali mfl. “A smart home energy management system using IoT and big data analytics approach”. I: *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 63.4 (2017). Publisher: IEEE, s. 426–434.
- [24] Yong Yu. *AI Chiller: An Open IoT Cloud Based Machine Learning Framework for the Energy Saving of Building HVAC System via Big Data Analytics on the Fusion of BMS and Environmental Data*. 9. okt. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2011.01047. arXiv: 2011.01047[cs,math]. URL: <http://arxiv.org/abs/2011.01047> (sjekket 05.12.2022).

- [25] Rafia Mumtaz mfl. “Internet of Things (IoT) Based Indoor Air Quality Sensing and Predictive Analytic—A COVID-19 Perspective”. I: *Electronics* 10.2 (jan. 2021). Number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, s. 184. ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics10020184. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/2/184> (sjekket 05.12.2022).
- [26] Saman Taheri og Ali Razban. “Learning-based CO2 concentration prediction: Application to indoor air quality control using demand-controlled ventilation”. I: *Building and Environment* 205 (1. nov. 2021), s. 108164. ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108164. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132321005655> (sjekket 05.12.2022).
- [27] Shaharil Mad Saad mfl. “Pollutant recognition based on supervised machine learning for indoor air quality monitoring systems”. I: *Applied Sciences* 7.8 (2017). Publisher: MDPI, s. 823.
- [28] Saman Taheri mfl. “Fault detection diagnostic for HVAC systems via deep learning algorithms”. I: *Energy and Buildings* 250 (1. nov. 2021), s. 111275. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111275. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821005594> (sjekket 07.12.2022).
- [29] Mariam Elnour, Nader Meskin og Mohammed Al-Naemi. “Sensor data validation and fault diagnosis using Auto-Associative Neural Network for HVAC systems”. I: *Journal of Building Engineering* 27 (1. jan. 2020), s. 100935. ISSN: 2352-7102. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100935. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219306011> (sjekket 07.12.2022).
- [30] Fisayo Caleb Sangogboye, Olaf Droegehorn og Jari Porras. “Analyzing the Payback Time of Investments in Building Automation”. I: *Sustainable Ecological Engineering Design*. Red. av Mohammad Dastbaz og Chris Gorse. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 367–381. ISBN: 978-3-319-32646-7. DOI: 10.1007/978-3-319-32646-7_25.
- [31] Vittorio Miori, Dario Russo og Luca Ferrucci. “Interoperability of home automation systems as a critical challenge for IoT”. I: 1. okt. 2019, s. 1–7. DOI: 10.1109/CCCS.2019.8888125.
- [32] Andrea Rygg Nøttveit. *Om ti år kan 8 prosent av verdas energi gå til datalagring*. Framtida. 28. jan. 2020. URL: <https://framtida.no/2020/01/28/atte-prosent-av-verdas-energi-kan-ga-til-datalagring-i-2030> (sjekket 07.12.2022).
- [33] Mohammad Riyaz Belgaum mfl. “Role of artificial intelligence in cloud computing, IoT and SDN: Reliability and scalability issues”. I: *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* 11.5 (1. okt. 2021). Number: 5, s. 4458–4470. ISSN: 2722-2578. DOI: 10.11591/ijece.v11i5.pp4458-4470. URL: <https://ijece.iaescore.com/index.php/IJECE/article/view/24597> (sjekket 21.05.2023).
- [34] Per Henriksen. *Lager verdens smarteste skolebygg med selvlærende SD-anlegg*. ITBaktuel.no. Section: Eiendomsdrift. 31. jan. 2019. URL: <https://www.itbaktuel.no/2019/01/31/lager-verdens-smarteste-skolebygg-med-selvlaerende-sd-anlegg/> (sjekket 19.12.2022).
- [35] Roger M. Svendsen. *(+) Disse ni vil bli rektor*. innherred.no. 30. jun. 2021. URL: <https://www.innherred.no/nyheter/i/L5j3GR/disse-ni-vil-bli-rektor> (sjekket 16.05.2023).
- [36] *Halsan barneskole · Tømtevegen 176, 7608 Levanger*. Halsan barneskole · Tømtevegen 176, 7608 Levanger. URL: https://www.google.com/maps/place/Halsan+barneskole/@63.7239287,11.3085968,353m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x466d655af7590a35:0x62f7cdd0a6ee1894!8m2!3d63.7242883!4d11.3087331!16s%2Fg%2F11g4d2_nv1 (sjekket 12.05.2023).

- [37] Novema kulde AS. *Vann glykol anlegg og varmpumper*. 13. des. 2022. URL: https://novemakulde.no/01/dot20_199.pdf (sjekket 25.01.2023).
- [38] *Simien 6* | *simien.no*. URL: <https://simien.no/simien-6/> (sjekket 18.04.2023).
- [39] Damian Mindykowski. “Optimization of heating and cooling system for a passive house equipped with heat pump and heat storage”. Accepted: 2016-09-07T14:02:01Z Publication Title: 187. Master thesis. NTNU, 2016. URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2405175> (sjekket 18.04.2023).
- [40] *EnergyPlus*. URL: <https://energyplus.net/quick-start> (sjekket 20.04.2023).
- [41] *IDA ICE - Simulation Software* | *EQUA*. URL: <https://www.equa.se/en/ida-ice> (sjekket 14.12.2022).
- [42] *ESP-r*. I: *Wikipedia*. Page Version ID: 1112421919. 26. sep. 2022. URL: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=ESP-r&oldid=1112421919> (sjekket 18.04.2023).
- [43] Aasem, E.O. mfl. “Current building systems modelling potential of ESP-r”. I: *Proc. 4th International Conference on System Simulation in Buildings*. Université de Liège, 1994, s. 1–15. URL: <https://research.tue.nl/nl/publications/23d1b92b-7a19-46eb-adcb-36babe9b5cf8> (sjekket 20.04.2023).
- [44] *ESP-r* | *University of Strathclyde*. URL: <https://www.strath.ac.uk/research/energysystemsresearchunit/applications/esp-r/> (sjekket 18.04.2023).
- [45] Ida Karin Auråen. “Modeling of heat exchange with the ground and analyses of energy use for a frost proof leisure building with active solar heating”. Accepted: 2014-12-19T11:50:49Z Publication Title: 240. Master thesis. Institutt for energi- og prosesseteknikk, 2013. URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/235172> (sjekket 20.04.2023).
- [46] *Welcome* | *TRNSYS : Transient System Simulation Tool*. URL: <http://www.trnsys.com/index.html> (sjekket 16.12.2022).
- [47] Beidi Li. *Use of building energy simulation software in early-stage of design process*. 2017.
- [48] *Termisk Inneklima - Bransjeveileder (Digitalt produkt)*. RIF. URL: <https://rif.no/product/termisk-inneklima-bransjeveileder-digitalt-produkt/> (sjekket 16.05.2023).
- [49] Folkehelseinstituttet og Helsedirektoratet. *Inneklima i skoler og barnehager. Helsemessig betydning for barn og unge*. 26. okt. 2016. URL: <https://www.fhi.no/publ/2016/inneklima-i-skoler-og-barnehager/> (sjekket 29.05.2023).
- [50] *Thermal comfort*. I: *Wikipedia*. Page Version ID: 1155056203. 16. mai 2023. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Thermal_comfort&oldid=1155056203 (sjekket 20.05.2023).
- [51] J. F. Nicol og M. A. Humphreys. “Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings”. I: *Energy and buildings* 34.6 (2002). Place: LAUSANNE Publisher: Elsevier B.V, s. 563–572. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00006-3.
- [52] Anna Marwig. “Termiske forhold i boliger - årsaker og akseptkriterier”. Norsk Bygningsfysikkdag 2019. Trondheim, 27. nov. 2019. URL: <https://www.bygningsfysikk.no/NorskBygningsfysikkdag2019.php>.
- [53] (+) *Termisk inneklima*. Section: vannbaserte. 23. aug. 2019. URL: <https://vannbaserte.nemitek.no/kapittel-21-vannbaserte-oppvarmings-og-kjolesystemer-2014-varme-og-kjoleavgivere/termisk-inneklima/165283> (sjekket 16.05.2023).
- [54] Janusz Feber og Hana Krásničanová. “Measures of Body Surface Area in Children”. I: *Handbook of Anthropometry* (2012). Publisher: Springer, New York, NY, s. 1249–1256. DOI: 10.1007/978-1-4419-

- 1788-1_76. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-1788-1_76 (sjekket 12.12.2022).
- [55] Per Erik Nilsson (ed.) *Achieving the Desired Indoor Climate - Energy Efficiency Aspects of System Design*. IMI Indoor Climate og Studentlitteratur, 2003.
- [56] *Reguleringsteknikk*. I: *Wikipedia*. Page Version ID: 23037315. 19. okt. 2022. URL: <https://no.wikipedia.org/w/index.php?title=Reguleringsteknikk&oldid=23037315> (sjekket 02.05.2023).
- [57] Jens G. Balchen, Trond Andresen og Bjarne A. Foss. *Reguleringsteknikk*. 5. Trondheim: Institutt for teknisk kybernetikk, NTNU, jan. 2003.
- [58] Vojislav Novakovic. "Lecture TEP20 Thermal Energy and Indoor Environment, Specialization Course, NTNU - Control systems - control properties, controllability, controller parameters". Forelesning. Forelesning. Trondheim, 15. okt. 2021.
- [59] (+) *Modulerende regulering*. Section: vannbaserte. 23. aug. 2019. URL: <https://vannbaserte.nemitek.no/effektregulering-kapittel-623-vannbaserte-oppvarmings-og-kjolesystemer-2014/modulerende-regulering/164104> (sjekket 02.05.2023).
- [60] kirsti. *Varmelagringsevne – termisk masse*. Betongfokus. 28. aug. 2017. URL: <https://www.betongfokus.no/2017/08/28/varmelagringsevne-termisk-masse/> (sjekket 25.04.2023).
- [61] Lars Egil Helseth. *varmekapasitet*. I: *Store norske leksikon*. 6. mar. 2023. URL: <https://snl.no/varmekapasitet> (sjekket 30.04.2023).
- [62] *Thermal mass | YourHome*. URL: <https://www.yourhome.gov.au/passive-design/thermal-mass> (sjekket 25.04.2023).
- [63] Sigurd Hveem mfl. *Energy efficiency and Comfort of Concrete Structures*. 17. des. 2007.
- [64] (+) *Ziegler og Nichols empiriske metoder*. Section: styring. 23. aug. 2019. URL: <https://styring.nemitek.no/kapittel-74-styring-og-regulering-av-tekniske-anlegg-i-bygg-uttesting-og-vedlikehold-av-automatikk/ziegler-og-nichols-empiriske-metoder/162800> (sjekket 29.04.2023).
- [65] (+) *Innledning, terminologi og grunnleggende begrep*. Section: vannbaserte. 23. aug. 2019. URL: <https://vannbaserte.nemitek.no/effektregulering-kapittel-61-vannbaserte-oppvarmings-og-kjolesystemer-2014/innledning-terminologi-og-grunnleggende-begrep/164121> (sjekket 17.12.2022).
- [66] Ellen Krohn Aasgård. *Slik kan effektariffer redusere belastningen på strømmettet*. #SINTEFblogg. 10. sep. 2020. URL: <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/effektariff-reducere-belastningen-strommettet/> (sjekket 26.04.2023).
- [67] *Radiant Heating*. Energy.gov. URL: <https://www.energy.gov/energysaver/radiant-heating> (sjekket 29.04.2023).
- [68] Per Gundersen. *Energifleksible varmeanlegg - Energieffektiv vannbåren lavtemperaturvarme*. SINTEF Byggforsk, 2000. 63 s. URL: https://www.sintefbok.no/book/index/241/energifleksible_varmeanlegg (sjekket 17.12.2022).
- [69] Jørn Stene. *Oppvarmingssystemer for boliger av lavenergi- og passivhusstandard*. 2008. URL: <https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/1269009/> (sjekket 26.04.2023).
- [70] *Hva består strømregningen av?* URL: <https://norgesenergi.no/stromsmart/hva-bestaar-stromregningen-av/> (sjekket 17.12.2022).

