

Ingrid Jæger Landsnes

Muligheter med kontinuerlig energi- kostnadsminimering basert på prisprediksjon og lastpåvirkning

Masteroppgave i Energi og Miljø

Veileder: Natasa Nord

Juni 2021

Ingrid Jæger Landsnes

Muligheter med kontinuerlig energi- kostnadsminimering basert på prisprediksjon og lastpåvirkning

Masteroppgave i Energi og Miljø
Veileder: Natasa Nord
Juni 2021

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



Kunnskap for en bedre verden

MASTEROPPGAVE

for

Ingrid Jæger Landsnes

Våren 2021

Hva er mulighetene med kontinuerlig energi-kostnadsminimering basert på prisprediksjon og lastpåvirkning?

*What are the possibilities with continuous energy cost minimization based on
price prediction and demand?*

Bakgrunn

Digitalisering av energioppfølging til bygninger begynner å bli mer vanlig. Det er mye data som lagres om bygninger, og som kunne blitt utnyttet bedre for å forbedre drift av eksisterende og nye bygninger. På sikt betyr det at bygningsdata kan brukes mye mer effektivt for energi- og effektreduksjon basert på pris og last (varme og elektrisk). Den siste kaller vi på engelsk «Demand Response». Likevel blir bygningsdriftsdata bare lagret og kunnskapen som mulig finnes i disse dataene blir ikke helt utnyttet. Samtidig er det mulig å simulere bygninger i bygningssimuleringsprogrammer som IDA ICE for eksempel. Det som kunne vært best er å koble kunnskap fra bygningsdata og simuleringsprogrammer. Simuleringsprogrammer kunne gitt mye bedre resultater dersom input kunne blitt mer reelt. Fram til nå er det utviklet flere bygningssimuleringsmodeller i IDA ICE. Mye data for en kontorbygning i Trondheim er samlet og analysert. På basis av arbeid utviklet i prosjektoppgave, skal studenten fortsette og utvikle videre analyser for å evaluere tekniske, økonomiske og reelle potensialer og muligheter ved «Demand Response» i en kontorbygning bygd etter passivhus-standard og oppvarmet med luftbåren system.

Mål

Målet med oppgaven er å evaluere potensialer og muligheter med kontinuerlig energi- og effektreduksjon basert på pris og behov (varme og elektrisk).

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter:

1. Litteraturstudie innen følgende temaer: «Demand Response», brukeradferd og smarte indikatorer for bygninger.
2. Forbedre modellen fra prosjektoppgave.
3. Utvikle smarte indikatorer eller andre indikatorer som kan vise påvirkning av variasjon i behov. Strøm- og fjernvarmepris skal tas til hensyn.
4. Utvikle flere relevante scenarioer som kan hjelpe å redusere behovstopper. Studenten skal se på muligheter innen styring av ventilasjon.
5. Analysere simuleringsresultater med hensyn til introduserte scenarioer for reduksjon av behovstopper. Timesprofiler og varighetskurver skal analyseres. Fokus skal være på antall timer med maksimum varmebelastning, viftedrift, relevant driftsdata og mulig forbedring.
6. Gjør enklere parameterstudie eller følsomhetsanalyse av oppnådde resultater.
7. Oppsummere resultater.

Sammendrag

I denne oppgaven studeres energibruk i en kontorbygning i Trondheim i 2019, som har oppvarming via ventilasjon. Målet med oppgaven er å analysere effektreduksjon av ventilasjonsvarmen, og se hvordan dette påvirker ventilasjonsvarmen, vifteeffekt, inneklima og kostnader for termisk og elektrisk energi. Det fokuseres på om bygningen har potensial for reduksjon av effekttopper for ventilasjonsvarmen ved å analysere Energi-Temperatur-kurver. Ved styring av ventilasjon vil spesifikk vifteeffekt (SFP) påvirkes, og av den grunn er det gjort en analyse av SFP også. Bakgrunnen for oppgaven er at høye effekttopper kan gi utfordringer for fjernvarme- og strømmettet, som for eksempel overbelastning. Ved å redusere eller flytte energibruk for ventilasjonsvarme til perioder med mindre belastning i nettet, kan det oppnås kostnadsbesparelser for termisk og elektrisk effekt gjennom et redusert effektledd i fjernvarme- og elektrisitetstariffen. I tillegg vil lavere SFP gi et mer energieffektivt ventilasjonsanlegg.

Opgaven startet med å utvikle en modell av kontorbygningen i simuleringsprogrammet IDA ICE, hvor datainnsamling av bygningskroppen, uteklima, energiforsyning, energidistribusjon, settpunkter for romkontroll, drift og tidsplaner var nødvendig. Dette inkluderer målinger for utetemperatur, tilluftstemperatur, interne laster, varmpumpe, fjernvarme og varmt tappevann, samt innetemperatur, luftmengde og SFP. Deretter ble det utviklet ulike scenarioer for å redusere effekttopper med fokus på styring av ventilasjon. Det ble både utviklet scenarioer for en bestemt kald dag, og scenarioer for hele året.

Det første daglige scenarioet endrer minimum settpunkt for innetemperatur, det andre daglige scenarioet endrer minimum og maksimum settpunkt for luftmengde, og det tredje daglige scenarioet endrer minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur. Resultatene for den kalde dagen viste en effektreduksjon for ventilasjonsvarmen på 31%, 16% og 23% for henholdsvis det første, det andre og det tredje daglige scenarioet. Kostnadsbesparelse for termisk og elektrisk effekt var 21%, 8% og 13% for de samme scenarioene.

Det første årlige scenarioet forflytter profiler av tilluftstemperaturen, det andre årlige scenarioet reduserer større økninger i tilluftstemperaturen, det tredje årlige scenarioet endrer settpunkt for innetemperatur og det fjerde årlige scenarioet endrer settpunkt for maksimum luftmengde. Resultatene for hele året viste en effektreduksjon for ventilasjonsvarmen på 12%, 20%, 16% og 33% for henholdsvis det første, det andre, det tredje og det fjerde årlige scenarioet. Videre viste resultatene en kostnadsbesparelse for termisk og elektrisk effekt på 10%, 4%, 10% og 16% for de samme scenarioene. I tillegg er det et femte årlig scenario som regulerer tilluftstemperatur etter et settpunkt for returtemperaturen i aggregatene. Det femte årlige scenarioet er delt inn i tre delscenarioer, hvor det første delscenarioet kun inkluderer endringen i reguleringen av tilluftstemperatur, det andre delscenarioet inkluderer også endring i settpunkt for innetemperatur, og det tredje delscenarioet inkluderer også endring i regulering av luftmengdene. Resultatene viste ingen effektreduksjon for ventilasjonsvarmen, men en betydelig effektreduksjon for energiposten pumper og vifter på 57%, 82% og 95% for henholdsvis det første, det andre og det tredje delscenarioet. SFP var også redusert i alle scenarioene. Årsaken til de betydelige effektreduksjonene skyldes at resultatene sammenliknes med referansemodellen, samt at scenarioene trenger forbedringer for valg av settpunkt for innetemperatur, returtemperatur, tilluftstemperatur og ikke minst type regulering av luftmengdene. Videre viste resultatene en kostnadsbesparelse for elektrisk effekt på 30%, 35% og 37% for de samme scenarioene.

Opgaven er til nytte for driftsansvarlige, operatører og sluttbrukere av kontorbygninger som ønsker bedre styring av ventilasjon, hvor referansebygningen blir brukt som eksempel.

Abstract

In this thesis, the energy use of an office building in Trondheim in 2019 is studied, which distributes heat through ventilation. The aim of the thesis is to analyze power reduction of the ventilation heat, and examine how it affects ventilation heat, fan power, indoor climate and the cost of thermal and electrical energy. The focus is on whether the building has a potential for reducing the peak power for the ventilation heat by analyzing energy signatures. When controlling the ventilation, the specific fan power (SFP) will also be affected, and as such an analysis of SFP was made as well. The background for the thesis is that high power peaks can present challenges for the district heating grid and power grid, for instance overload. By reducing or moving the energy consumption of the ventilation heat to periods with low grid loads, cost savings for power can be achieved through a reduced power addend in the district heating and electricity tariff. Additionally, the lower SFP will give a more energy efficient ventilation system.

First, a model of the building was created in the simulation program IDA ICE, where data collection about building body, outdoor climate, energy supply, energy distribution, set points for room control, operation and schedules were necessary. This includes measurements of the outdoor temperature, supply temperature, internal loads, heat pump, district heating and hot water, as well as indoor temperature, air flow rate and SFP. Subsequently, various scenarios were developed to reduce power peaks with focus on controlling the ventilation system. Scenarios were made for a specific, cold day, and scenarios for the entire year.

The first daily scenario changes minimum set point for indoor temperature, the second daily scenario changes minimum and maximum set point for air flow rate, and the third scenario changes minimum and maximum set point for indoor temperature. The results for the cold day showed a power reduction for the ventilation heat of 31%, 16% and 23% for the first, second and third daily scenario, respectively. Cost savings for thermal and electrical power was 21%, 8% and 13% for the same scenarios.

The first yearly scenario moves profiles of the supply temperature, the second yearly scenario reduces higher increases in supply temperature, the third yearly scenario changes the set point for indoor temperature and the fourth yearly scenario changes the set point for maximum air flow rate. The results of the entire year showed a reduction in power for ventilation heat of 12%, 20%, 16% and 33% for the first, the second, the third and the fourth yearly scenario, respectively. Further on, the results showed a cost saving for thermal and electrical power of 10%, 4%, 10% and 16% for the same scenarios. There is also a fifth scenario which control the supply temperature to achieve a given set point for return temperature in the air handling units. The fifth yearly scenario is divided into three sub scenarios; the first sub scenario will only include the change in how the supply temperature is controlled, the second sub scenario also includes a change in set point for indoor temperature, and the third sub scenario also include a change in the control of the air flow rates. The results showed no power reduction for the ventilation heat, but a substantial power reduction for the energy item pumps and fans of 57% in the first, 82% in the second and 95% in the third sub scenario. SFP was also reduced in every scenario. The reason why there was a substantial power reduction is because the results are compared to the reference model, and because the scenarios need improvements with regards to set point for indoor temperature, return temperature, supply temperature and last, but not least, air flow rates. The results further showed a cost saving for electrical power of 30%, 35% and 37% for the same scenarios.

The thesis is most useful for managers, operators and end users of office buildings which wants better control of ventilation, where the reference building is used as example.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet våren 2021 ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim (NTNU). Målet med oppgaven er å benytte simuleringsprogrammet IDA ICE til å modellere en kontorbygning i Trondheim som har oppvarming via tilluft, og studere påvirkningen av effektreduksjon på ventilasjonsvarme, vifteeffekt, inneklime og kostnader for termisk og elektrisk energi ved å utvikle ulike scenarier. Det studeres om kontorbygningen har potensial for effektreduksjon gjennom Energi-Temperatur-kurver, og hvor energieffektivt ventilasjonsanlegget er gjennom spesifikk vifteeffekt.

Jeg ønsker å rette en stor takk til alle som har samarbeidet i arbeidet med masteroppgaven. I første rekke ønsker jeg å takke veilederen min, Natasa Nord, for kontinuerlig veiledning og rådgivning gjennom semesteret. Hun har også bidratt med å utvikle modellen i simuleringsprogrammet, samt at hun har delt artikler og kontakter som er relevante for oppgaven. Videre ønsker jeg takke medveilederen min, Yuemin Ding, som har vært imøtekommende og videresendt store datamengder fra kontorbygningen. Til slutt ønsker jeg både å takke bedriften GK Inneklime for tilgang til deres systemer og data om kontorbygningen, og ikke minst prosjektingeniøren Jonas Stokkeland Fuglseth som har vært tilgjengelig for spørsmål om kontorbygningen og andre tekniske emner.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	i
Abstract	ii
Forord	iii
Figurer	x
Tabeller	xii
Forkortelser	xiii
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Mål	2
1.3 Begrensninger	2
1.4 Oppbygning	3
2 Teori	4
2.1 Energibruk i bygninger	4
2.2 Energiforsyning	5
2.2.1 Varmepumpe	6
2.2.2 Fjernvarme	6
2.3 Energidistribusjon	7
2.3.1 Vannbåren system	7
2.3.2 Ventilasjonssystem	7
2.4 Energikrav i bygninger	9
2.5 Inneklimakrav i bygninger	10
2.6 Spesifikk vifteeffekt	11
2.7 Energieffektivisering i bygninger	12
2.8 Demand Response	12
2.9 Brukeradferd	14
2.10 Smarte indikatorer	15
2.11 Kostnader	19
2.11.1 Elektrisitetstariff	19
2.11.2 Fjernvarmetariff	20
2.12 ET-kurve og enkel lineær regresjonsmodell	21
2.13 Sentraldriftskontrollanlegg og IDA ICE	23

3	Metode	24
3.1	Litteratur	24
3.2	Datainnsamling	24
3.3	Simuleringer i IDA ICE	24
3.4	Beregninger	25
3.5	Antakelser	25
3.6	Forbedret modell	25
4	Referansebygning	26
4.1	Bygning og uteklima	26
4.2	Energiforsyning	27
4.2.1	Varmepumpe	27
4.2.2	Fjernvarme	27
4.3	Energidistribusjon	28
4.3.1	Ventilasjonssystem	28
4.4	Romkontrollsystem	31
4.5	IDA ICE modell	32
4.6	Scenarier for reduksjon av effekttopper for kald dag	35
4.7	Scenarier for reduksjon av effekttopper for året	38
5	Resultater	40
5.1	Målinger av utetemperatur og tilluftstemperatur	40
5.2	Målinger for interne laster	41
5.3	Målinger for varmpumpe, fjernvarme og varmt tappevann	43
5.4	Sammenlikning av målt og simulert romoppvarming	45
5.5	Målinger av innetemperatur og luftmengde	46
5.6	Målinger av spesifikk vifteeffekt	48
5.7	Kalibrert modell (for kald dag)	51
5.7.1	Daglig energibruk og effekttopp for kalibrert modell	51
5.7.2	Daglig inneklima for kalibrert modell	53
5.8	Scenarier for reduksjon av effekttopper for kald dag	56
5.8.1	Daglig energibruk og effekttopp for scenarier	56
5.8.2	Daglig inneklima for scenarier	59
5.9	Daglige kostnader for termisk og elektrisk energi	63
5.9.1	Fjernvarmetariff og elektrisitetstariff	63
5.10	Kalibrert modell (for året)	67
5.10.1	Månedlig og årlig energibruk for kalibrert modell	67
5.10.2	Varighetskurve for ventilasjonsvarme for kalibrert modell	69
5.10.3	Profiler for ventilasjonsvarme og pumper og vifter for kalibrert modell	70
5.10.4	Energi-Temperatur-kurver for kalibrert modell	71

5.10.5	Profiler for tilluftstemperatur for kalibrert modell	82
5.10.6	Årlig inneklime for kalibrert modell	88
5.10.7	Spesifikk vifteeffekt for kalibrert modell	93
5.11	Scenarier for reduksjon av effekttopper for året	95
5.11.1	Årlig energibruk og effekttopp for scenarier	97
5.11.2	Årlig inneklime for scenarier	99
5.11.3	Spesifikk vifteeffekt for scenarier	119
5.12	Årlige kostnader for termisk og elektrisk energi	121
5.13	Sensitivitetsanalyse	127
5.14	Forbedret modell	129
5.14.1	Implementert reversibel varmpumpe	129
5.14.2	Regulering av tilluftstemperatur	130
6	Diskusjon	131
6.1	Kalibrert modell, forbedret modell og videre arbeid	131
6.2	Effekttopper og forsyningsside	132
6.3	Demand Response, brukeradferd og smarte indikatorer	133
6.4	Kostnadsbesparelser for effektreduksjon	134
7	Konklusjon	135
	Tillegg A Referansebygning	141
	Tillegg B Tidsplaner for interne laster	142
	Tillegg C IDA ICE	145
	Tillegg D Varmebalanse for kald dag	146
	Tillegg E Kostnadsberegning for kald dag	147
	Tillegg F Kostnadsberegning for et år	149
	Tillegg G Kalibrert modell og målinger	151
	Tillegg H Årlige scenarier	158

Figurer

1	Varmepumpeprosess [18]	6
2	Demand Side Management (DSM) [34]	13
3	Effektvariasjon per time for driftsdøgn i en normert beregning [13]	15
4	Grunnleggende funksjoner for smarte bygninger [40]	16
5	Ulike måter for effektreduksjon [42]	19
6	Eksempel på enkel lineær regresjonsmodell [49]	22
7	Vestre Rosten 69 (referansebygning)	26
8	Settpunkt for tilluftstemperatur (romkompensert)	29
9	Settpunkt for vanntemperatur ved vinterdrift (utekompensert)	31
10	Settpunkt for innetemperatur ved vinterdrift (Kalibrert modell)	33
11	Minimum settpunkt for innetemperatur (Scenario 1)	35
12	Settpunkt for luftmengde (Scenario 2)	36
13	Minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur (Scenario 3)	37
14	Spesifisert ytre kontor, indre kontor og møterom (markert i rødt)	37
15	Målinger av utetemperatur og tilluftstemperatur for 2019	40
16	Gjennomsnittlig samtidighet for interne laster for del A_{vest} (04.02.19-10.02.19)	42
17	Målinger av varmpumpe for 2019	43
18	Målinger av fjernvarme for 2019	43
19	Målinger av varmt tappevann for 2019	44
20	Målinger av romoppvarming for 2019	45
21	Sammenlikning av målt og simulert romoppvarming	45
22	Profil av gjennomsnittlig målt innetemperatur av hvert rom i hver sone (året 2019)	47
23	Målt luftmengde fra aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 (året 2019)	48
24	Målt spesifikk vifteeffekt mot tilluftsmengde for hvert av aggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 (året 2019)	49
25	Målt total spesifikk vifteeffekt mot tilluftsmengde for aggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 (året 2019)	50
26	Utetemperatur for kald dag i Trondheim (05.02.2019)	51
27	Daglig energibruk for kalibrert modell (05.02.2019)	52
28	Ventilasjonsvarme og pumper og vifter for kalibrert modell (05.02.2019)	52
29	Innetemperatur, operativ temperatur, tilluftstemperatur og luftmengde for spesifiserte rom for kalibrert modell (05.02.19)	53
30	Daglig energibruk for kalibrert modell og scenarioene (05.02.19)	57
31	Ventilasjonsvarme og pumper og vifter for kalibrert modell og scenarioene (05.02.2019)	57
32	Innetemperatur for spesifiserte rom for kalibrert modell og scenarioene (05.02.19)	59
33	Luftmengde for spesifiserte rom for kalibrert modell og scenarioene (05.02.19)	61
34	Daglig kostnad for elektrisk og termisk energi (05.02.19)	64

35	Månedlig energibruk (Kalibrert modell)	67
36	Årlig energibruk (Kalibrert modell)	68
37	Årlig spesifikt effektbruk for ventilasjonsvarme og pumper og vifter (Kalibrert modell)	69
38	Varighetskurve for ventilasjonsvarme (Kalibrert modell)	69
39	Daglig profil av spesifikk ventilasjonsvarme (Kalibrert modell)	70
40	Daglig profil av spesifikk effekt for pumper og vifter (Kalibrert modell)	71
41	Simulert årlig ventilasjonsvarme mot utetemperatur (Årstider)	72
42	Simulert årlig ventilasjonsvarme mot utetemperatur (måneder og arbeidstid/ikke-arbeidstid)	72
43	Simulert månedlig ventilasjonsvarme mot utetemperatur (med og uten inndeling i arbeidstid og ikke-arbeidstid)	73
44	Simulert ET-kurve for arbeidstid og ikke-arbeidstid (året 2019)	74
45	Simulert ET-kurve for arbeidstid og ikke-arbeidstid vinter (vinter 2019)	75
46	Simulert månedlig ET-kurve for arbeidstid og ikke-arbeidstid	76
47	Konfidens- og prediksjonsintervall	77
48	Ventilasjonsvarme mot tilluftstemperatur (Kalibrert modell)	78
49	Ventilasjonsvarme mot tilluftstemperatur for separert arbeidstid vinter (Kalibrert modell)	78
50	Ventilasjonsvarme mot differansen mellom tilluftstemperatur og utetemperatur for vinter (Kalibrert modell)	79
51	Ventilasjonsvarme mot differansen mellom tilluftstemperatur og utetemperatur for separert arbeidstid vinter (Kalibrert modell)	79
52	Ventilasjonsvarme mot differansen mellom tilluftstemperatur og utetemperatur for vinter-måneder (Kalibrert modell)	80
53	Ventilasjonsvarme, tilluftstemperatur og utetemperatur for 2019 (Kalibrert modell) .	80
54	Ventilasjonsvarme per AHU mot differansen mellom gjennomsnittlig innetemperatur for hver sone og utetemperatur for vinter-måneder (Kalibrert modell)	81
55	Daglig profil av tilluftstemperatur (Kalibrert modell)	82
56	Profil av tilluftstemperatur (heltrukket linje) og profil av ventilasjonsvarme (stiplet linje) for vinter-måneder (Kalibrert modell)	83
57	Profiler for tilluftstemperatur, ventilasjonsvarme og utetemperatur for vinter-måneder (Kalibrert modell)	84
58	Boksplokk av tilluftstemperatur for januar (Kalibrert modell)	85
59	Boksplokk av tilluftstemperatur for februar (Kalibrert modell)	85
60	Boksplokk av tilluftstemperatur for mars (Kalibrert modell)	86
61	Boksplokk av tilluftstemperatur for november (Kalibrert modell)	86
62	Boksplokk av tilluftstemperatur for desember (Kalibrert modell)	87
63	Profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone (Kalibrert modell)	88

64	Antall timer i løpet av året med gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone (Kalibrert modell)	89
65	Antall timer i løpet av året med innetemperatur for hvert rom (Kalibrert modell) . .	90
66	Profil av luftmengde til hver sone (Kalibrert modell)	91
67	Luftmengde fra aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 (Kalibrert modell)	92
68	Spesifikk vifteeffekt mot tilluftsmengde (Kalibrert modell)	93
69	Profil av tilluftstemperatur for kalibrert modell (heltrukket linje) og forskyvning i forhold til den kalibrerte modellen (stiplet linje) (Scenario 1)	95
70	Varighetskurve for ventilasjonsvarme for kalibrert modell og scenario 1-4	97
71	Varighetskurve for ventilasjonsvarme for kalibrert modell og scenario 5	97
72	Profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone (Scenario 1) . . .	99
73	Profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone (Scenario 2) . . .	100
74	Profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone (Scenario 3) . . .	101
75	Profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone (Scenario 4) . . .	102
76	Profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone (Scenario 5.2) . .	104
77	Profil av tilluftstemperatur fra hvert aggregat (Scenario 5.2)	105
78	Profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone (Scenario 5.3) . .	106
79	Profil av tilluftstemperatur fra hvert aggregat (Scenario 5.3)	107
80	Profil av luftmengde til hver sone (Scenario 1)	108
81	Profil av luftmengde til hver sone (Scenario 2)	109
82	Profil av luftmengde til hver sone (Scenario 3)	110
83	Luftmengde fra aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for scenario 3 (året 2019) .	111
84	Profil av luftmengde til hver sone (Scenario 4)	112
85	Luftmengde fra aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for scenario 4 (året 2019) .	113
86	Luftmengde fra aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for scenario 5.1 (året 2019)	113
87	Profil av luftmengde til hver sone (Scenario 5.2)	114
88	Luftmengde fra aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for scenario 5.2 (året 2019)	115
89	Profil av luftmengde til hver sone (Scenario 5.3)	116
90	Profil av gjennomsnittlig CO ₂ -nivå av hvert rom i hver sone (Scenario 5.3)	117
91	Luftmengde fra aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for scenario 5.3 (året 2019)	117
92	Returtemperatur til ventilasjonsaggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for kalibrert modell og scenario 5 (året 2019)	118
93	Profil av returtemperatur for vinter (Scenario 5)	118
94	Spesifikk vifteeffekt mot tilluftsmengde for kalibrert modell og scenarioer	119
95	Årlige kostnader for termisk og elektrisk energi (året 2019)	122
96	Sensitivitetsanalyse av innetemperatur på ventilasjonsvarme	127
97	Sensitivitetsanalyse av luftmengde på ventilasjonsvarme	128
98	Anlegg i IDA ICE	129
99	Ventilasjonsaggregat AHU1 i IDA ICE	130

100	Systemskjema for referansebygning	141
101	Målt gjennomsnittlig samtidighet for personer for hver sone (2019)	142
102	Målt gjennomsnittlig samtidighet for belysning for hver sone (2019)	143
103	Målt gjennomsnittlig samtidighet for teknisk utstyr for hver sone (2019)	144
104	Referansebygningen i IDA ICE	145
105	VAV temperatur- og CO ₂ -regulering i IDA ICE	145
106	Varmebalanse for spesifisert ytre kontor kald dag (Kalibrert modell)	146
107	Varmebalanse for spesifisert indre kontor for kald dag (Kalibrert modell)	146
108	Varmebalanse for spesifisert møterom for kald dag (Kalibrert modell)	146
109	Energibruk per energipost for kald dag (Kalibrert modell)	147
110	Beregning av elektrisitetskostnad for kald dag (Kalibrert modell)	148
111	Beregning av fjernvarmekostnad for kald dag (Kalibrert modell)	148
112	Beregning av effektledd for termisk og elektrisk energi for 2019 (Kalibrert modell)	149
113	Energibruk per energipost for 2019 (Kalibrert modell)	149
114	Beregning av elektrisitetskostnad for 2019 (Kalibrert modell)	150
115	Beregning av fjernvarmekostnad for 2019 (Kalibrert modell)	150
116	Boksplott av ventilasjonsvarme for januar (Kalibrert modell)	151
117	Boksplott av ventilasjonsvarme for februar (Kalibrert modell)	151
118	Boksplott av ventilasjonsvarme for mars (Kalibrert modell)	152
119	Boksplott av ventilasjonsvarme for november (Kalibrert modell)	152
120	Boksplott av ventilasjonsvarme for desember (Kalibrert modell)	152
121	Simulert og målt ET-kurve (romoppvarming) for arbeidstid og ikke-arbeidstid (året 2019)	153
122	Simulert og målt ET-kurve (romoppvarming) for arbeidstid og ikke-arbeidstid (vinter 2019)	153
123	Simulert og målt månedlig ET-kurve (romoppvarming) for arbeidstid og ikke-arbeidstid (vinter 2019)	154
124	Ventilasjonsvarme mot tilluftstemperatur for vinter-måneder (Kalibrert modell)	155
125	Spesifikk bruk for ventilasjonsvarme og ventilasjonskjøling (Kalibrert modell)	155
126	Varighetskurve for ventilasjonsvarme og ventilasjonskjøling (Kalibrert modell)	155
127	Profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone for årstider (Kalibrert modell)	156
128	Profil av luftmengde av hvert rom i hver sone for årstider (Kalibrert modell)	157
129	Profil av utetemperatur 2019 (Kalibrert modell)	157
130	Profil av ventilasjonsvarme (Scenario 1, Scenario 2, Scenario 3, Scenario 4)	160

Tabeller

1	Energikrav til bygninger	9
2	Inneklimakrav og anbefalinger til bygninger	10
3	Key Performance Indicators (KPIs) [40]	18
4	Effektpris for elektrisitet og fjernvarme for vinter (nov-feb) [44] [45]	20
5	Effektpris for elektrisitet og fjernvarme for sommer (mar-okt) [44] [45]	20
6	Målinger fra referansebygning	24
7	U-verdier for referansebygningen	26
8	Informasjon om varmepumpen	27
9	Informasjon om fjernvarmen	27
10	Informasjon om ventilasjonssystemet	28
11	Settpunkt for tilluftstemperatur	29
12	Driftstid i arbeidsdager for ventilasjonsaggregatene	30
13	Oppbygning av kalibrert modell	32
14	Settpunkt for luftmengde for kalibrert modell	34
15	Input-verdier for kalibrert modell	34
16	Maksimal gjennomsnittlig samtidighet for interne laster for 2019	42
17	Sammenlikning av målt og simulert (kalibrert) romoppvarming	46
18	Scenarioer for reduksjon av effekttopper for kald dag	56
19	Daglig energibruk og effekttopp for kalibrert modell og scenarioene (05.02.19)	58
20	Verdier for beregning av elektrisitets- og fjernvarmekostnad for kald dag [44, 45]	63
21	Verdier for daglig kostnad uten og med effektledd (05.02.19)	65
22	Temperature Moving Average (TMA)	76
23	Statistikk for konfidens- og prediksjonsintervall for ventilasjonsvarme mot utetemperatur (Kalibrert modell)	77
24	Tidsforsinkelse mellom høyeste tilluftstemperatur og effekttopp for ventilasjonsvarme (Kalibrert modell)	83
25	Høyeste effekttopp for ventilasjonsvarmen ved 24 ulike profiler for tilluftstemperatur for hver vinter-måned (Scenario 1)	96
26	Scenarioer for reduksjon av effekttopper for året	96
27	Effekttopp og energibruk for ventilasjonsvarme og pumper og vifter for kalibrert modell og scenarioene (året 2019)	98
28	Verdier for beregning av elektrisitets- og fjernvarmekostnad for 2019 [44, 45]	121
29	Verdier for årskostnad uten og med effektledd (året 2019)	123
30	Total kostnadsbesparelse og redusert effektledd (året 2019)	126
31	Sensitivitetsanalyse av innetemperatur på ventilasjonsvarme	127
32	Sensitivitetsanalyse av luftmengde på ventilasjonsvarme	128
33	Spotpris for 05.02.19 [43]	147

34	Gjennomsnittlig månedlig spotpris for 2019 [43]	149
35	Tilluftstemperatur for scenario 2 sammenliknet med kalibrert modell	158
36	Effekttopp og energibruk for ventilasjonsvarmen for kalibrert modell og scenarioene (vinter-måneder 2019)	159
37	Effekttopp og energibruk for pumper og vifter for kalibrert modell og scenarioene (vinter-måneder 2019)	159

Forkortelser

VR69	Vestre Rosten 69
SFP	Spesifikk vifteeffekt
DR	Demand Response
DSM	Demand Side Management
KPI	Key Performance Indicator
SRI	Smart Readiness Indicator
SD-anlegg	Sentraldriftskontrollanlegg
EOS	Energioppfølgingsystem
nZEB	nearly Zero Energy Building
DCV	Demand-Controlled Ventilation
VAV	Variabel Air Volume
PPD	Percentage of Dissatisfied
PMV	Predicted Mean Vote
PD	Percent Dissatisfied
ET-kurve	Energi-Temperatur-kurve
CPT	Change Point Temperature
TMA	Temperature Moving Average

1 Introduksjon

I dette kapittelet vil motivasjonen for oppgaven beskrives.

1.1 Bakgrunn

Totalt energibruk i Norge var 235 TWh i 2018 [1]. Av dette utgjorde energibruk i bygninger 84 TWh, og tilsvarer dermed 36% av totalt energibruk. Innenfor energibruk i bygninger var elektrisitetsbruket 66 TWh, som tilsvarer 79% av totalt energibruk i bygninger, og fjernvarmebruket var 6 TWh, som tilsvarer 7% av totalt energibruk i bygninger [2]. Før 2020 ble det forbudt å bruke fossil fyringsolje til oppvarming av bygninger, og klimagassutslippene fra selve oppvarmingen er dermed lave og representerer under 2% av totale utslipp [3, 4]. Imidlertid er lavere energibruk i bygninger viktig for å oppnå klimamålene innen 2030, fordi fornybar energi kan frigjøres til å redusere klimagassutslipp i andre sektorer som transport og industri [5]. Dermed er energieffektivisering i bygninger avgjørende for å nå klimamålene. Både energimerkeordningen og de stadig strengere kravene for energi i bygninger i Plan- og bygningsloven gjennom Byggeteknisk forskrift, er med på å bidra til bedre energieffektivitet i bygninger [6].

Tradisjonelt har fokuset vært på tiltak på bygningskroppen for å oppnå bedre energieffektivitet. Fremtidens energieffektivisering i bygninger vil være avhengig av forbrukerfleksibilitet som understøtter energisystemet ved at bygninger bruker mindre energi ved høy belastning i energisystemet og tilsvarende motsatt [5]. Dette skyldes at høye effekttopper kan gi utfordringer for strømmettet og fjernvarmenettet, da disse energisystemene må være dimensjonert for dette. Av den grunn vil energieffektivisering i bygninger både inkludere energireduksjon i bygninger, men også effektreduksjon i bygninger i perioder ved høy belastning i nettet. Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) er et direktiv som stiller krav til økt energiytelse og energieffektivisering i bygninger i EU [7]. Første del av Bygningsenergidirektivet er innlemmet i norsk rett som en del av EØS-avtalen, mens den andre delen er under EØS-prosess [8]. Direktivet krever for eksempel at alle kunder skal ha avanserte strømmålere, som vil tillate automatisk avlesning. Dette muliggjør ytterligere installasjon av intelligente systemer for styring og regulering [9]. Videre er det frivillig for medlemslandene å ta i bruk smartindikatoren i bygninger, som sier hvor godt tilpasset bygninger er for bruk av for eksempel informasjonsteknologi og styring av energibruk [8].

For å motivere sluttbrukere til energieffektivisering må det ofte være lønnsomt. Redusert energibruk vil føre til kostnadsbesparelser. Imidlertid kan reduksjon av effekttopper, ved å redusere eller flytte forbruket til andre tidspunkt enn etterspurt, kreve motivasjon. Demand Response kan defineres som endringer i sluttbrukernes energiforbruk fra deres normale forbruksmønster, som respons på endringer i prisen på energi over tid [10, 11]. Med andre ord kan tariffer for elektrisitet og fjernvarme motivere til endringer i brukeradferd. Dermed kan bedre energieffektivitet oppnås.

1.2 Mål

Målet med oppgaven er å benytte simuleringprogrammet IDA ICE til å modellere en kontorbygning i Trondheim som har oppvarming via tilluft, og utvikle ulike scenarioer for å redusere effekttopper for ventilasjonsvarme. Reduksjon av effekttopper påvirker ventilasjonsvarme, vifteeffekt, inneklima og kan føre til kostnadsbesparelser for termisk og elektrisk energi. Resultatene består av målinger av temperaturer, tidsplaner for interne laster, energibruk av varmepumpe, fjernvarme og varmt tappevann som er nødvendige for å modellere referansebygningen, samt sammenlikning av innetemperatur, luftmengde og spesifikk vifteeffekt fra målingene og simuleringene. I tillegg består resultatene av simuleringer og analyse av de ulike scenarioene som er utviklet. Det analyseres om bygningen har potensial for reduksjon av effekttopper gjennom Energi-Temperatur-kurver, og hvor energieffektivt ventilasjonsanlegget er gjennom spesifikk vifteeffekt.

1.3 Begrensninger

I oppgaven er det begrensninger som inkluderer energiposter, simuleringer, datamengder og beregninger. Oppgaven fokuserer på ulike scenarioer for å redusere effekttopper for ventilasjonsvarmen, men energiposten pumper og vifter påvirkes ved styring av ventilasjon. I tillegg påvirkes energiposten ventilasjonskjøling ved styring av ventilasjon, men oppgaven er begrenset til å studere energipostene ventilasjonsvarme og pumper og vifter. Dermed studeres ikke ventilasjonskjøling i denne oppgaven. Når det gjelder energiposten pumper og vifter er det vifter som er sentralt ved styring av ventilasjon. Likevel er pumper og vifter slått sammen til en energipost, da det begrenser mengden beregninger i betydelig grad.

Scenarioene for reduksjon av effekttopper for ventilasjonsvarme analyseres både for en kald dag og for hele året. For den kalde dagen er analysen begrenset til å kun studere den kalde dagen, og ikke hvordan styring av ventilasjon påvirker dagene etter. Likevel vil påvirkningen fra dagene før inkluderes i analysen. For hele året er analysen begrenset til å fokusere på vinter-månedene januar, februar, mars, november og desember da det er størst behov for ventilasjonsvarme i disse månedene. I tillegg har referansemodellen for effektreduksjon en styring av tilluftstemperaturen som ikke er hensiktsmessig, og av den grunn er scenarioene begrenset til å være enkle.

Store datamengder av målinger og simuleringer gir automatisk muligheter til begrensning. Data fra målingene er begrenset til å inkludere de nødvendige målingene for å modellere referansebygningen i IDA ICE. I tillegg er det inkludert målinger for å kunne sammenlikne sentrale parametere mellom målinger og simuleringer slik at scenarioene er så realistiske som mulig. For målingene er det også slik at flere målinger mangler og kan være misvisende, samt at det er varierende tidssteg for målingene slik at det er tidkrevende å for eksempel lage profiler for ulike parametere. Når det gjelder data fra simuleringene er disse også begrenset til å inkludere de mest sentrale resultatene. Det er med andre ord betydelig mengder data som kan dokumenteres, men som må begrenses.

1.4 Oppbygning

Oppbygningen til oppgaven er som følger:

Kapittel 2 presenterer teori med fokus på energi i bygninger, energiforsyninger, oppvarming via tilluft, inneklime, krav i forskrifter, spesifikk vifteeffekt, Demand Response, brukeradferd, smarte indikatorer, kostnader for termisk og elektrisk energi og Energi-Temperatur-kurver.

Kapittel 3 gir metoden for oppgaven, som inkluderer datainnsamling, simuleringer, beregninger, antakelser og forbedringer.

Kapittel 4 beskriver referansebygningen som skal analyseres og modelleres i IDA ICE. I tillegg er det utviklet ulike scenarioer med fokus på styring av ventilasjon for å redusere effekttopper for ventilasjonsvarmen. Det er utviklet scenarioer for en kald dag og for hele året.

Kapittel 5 er delt inn i tre deler. Første del er analyse av målte og simulerte resultater. Andre del er analyse av kald dag. Tredje del er årlig analyse.

Første del gir målinger og analyser av utetemperatur, tilluftstemperatur, tidsplaner for interne laster og energibruk av varmepumpe, fjernvarme og varmt tappevann som er nødvendige for å modellere referansebygningen i IDA ICE. Deretter sammenliknes simulert og målt varighetskurve for romoppvarming slik at modellen kan brukes for analyse av romoppvarming. I tillegg inkluderes målinger av innetemperatur, luftmengde og spesifikk vifteeffekt som vil sammenliknes med simulerte verdier.

Andre del gir resultater og analyser av simuleringer i IDA ICE for den kalde dagen. Resultatene inkluderer daglig energibruk, effekttopp og inneklime for referansemodellen. Deretter sammenliknes disse resultatene med tilsvarende resultater for de ulike scenarioene, og eventuelle kostnadsbesparelser for termisk og elektrisk energi vil også presenteres.

Tredje del gir resultater og analyser av simuleringer i IDA ICE for hele året. Resultatene inkluderer årlig energibruk, effekttopp og inneklime for referansemodellen. Det fokuseres på om bygningen har potensial for reduksjon av effekttopper for ventilasjonsvarmen ved å analysere profiler av ventilasjonsvarmen, profiler av tilluftstemperaturen og Energi-Temperatur-kurver. Det analyseres også hvor energieffektivt ventilasjonsanlegget er gjennom spesifikk vifteeffekt. Deretter studeres årlig energibruk, effekttopp, inneklime og eventuelle kostnadsbesparelser for de ulike scenarioene. Til slutt inkluderes en enkel sensitivitetsanalyse for ventilasjonsvarmen, og forbedringer av modellen i IDA ICE.

Kapittel 6 diskuterer resultatene, som inkluderer en diskusjon av referansemodellen og hvordan effekttopper påvirker forsynings- og behovsside. I tillegg presenteres videre arbeid.

Kapittel 7 konkluderer med å svare på oppgaven ved å oppsummere de mest sentrale resultatene.

2 Teori

Dette kapittelet består av teori som er relevant for å kunne svare på oppgaven.

2.1 Energibruk i bygninger

Energibruk i bygninger kan inneholde både termisk og elektrisk energi [12]. Romoppvarming, ventilasjonsvarme, varmt tappevann, vifter, pumper, belysning, teknisk utstyr, romkjøling og ventilasjonskjøling er ulike energiposter innenfor energibudsjettet til en bygning [13]. Oppvarming i bygninger består av temperaturavhengig varmebehov, nærmere bestemt romoppvarming og ventilasjonsvarme, samt oppvarming av varmt tappevann som ikke er avhengig av utetemperaturen. Kjøling i bygninger består av temperaturavhengige kjølebehov, nærmere bestemt romkjøling og ventilasjonskjøling, i tillegg til prosesskjøling [14].

Energibalanse

Bygningens energibalanse brukes for å beregne energi- og effektbehovet for de forskjellige energipostene, der varmebalansen inkluderer varmetap, varmetilskudd og varmeakkumulering. Når det kommer til varmetapet, eksisterer det transmisjonstap og infiltrasjonstap gjennom bygningskroppen, i tillegg til ventilasjonstap. Det er spesielt U-verdier, bygningsform, lufttetthet, ventilasjonskrav, ventilasjonssystem, varmegjenvinning og styring som påvirker disse tapene. Videre inkluderer varmetilskuddet varmeanlegg, solinnstråling og interne laster som personer, belysning og teknisk utstyr. Det er spesielt vindusløsninger, bygningens orientering, avskjerming, personeksposering, utstyrsmengde og effektivitet som påvirker disse tilskuddene. Til slutt er det varmeakkumulering i bygningens konstruksjon eller spesielle varmelagre. Denne akkumuleringen av varme blir spesielt påvirket av overflater og varmekapasitet [15].

Faktorer som påvirker energibruk

Energibruk i bygninger påvirkes av tekniske, fysiske og menneskelig påvirkede faktorer, som igjen er delt opp i følgende [16]:

- Uteklima: lufttemperatur, solstråling, vindhastighet og relativ fuktighet
- Bygningskarakteristikk: U-verdier, tetthet, areal, type og orientering av bygning
- Tekniske systemer: energiforsyningssystemer og tekniske installasjoner
- Drift og vedlikehold: energieffektivitet
- Brukeradferd: personer som betjener tekniske systemer som oppvarming, ventilasjon og belysning

- Betingelser for inneklima: innetemperatur og luftkvalitet
- Sosiale faktorer: bruksareal, inntekt, alder og stadiet i livet

De tre første faktorene blir betegnet som tekniske og fysiske faktorer ettersom personer ikke enkelt kan endre på disse faktorene. Uteklima defineres av lokasjonen til bygningen. Bygningskarakteristikk og tekniske systemer er installert, men kan endres. De fire siste faktorene blir betegnet som menneskelig påvirkede faktorer, som betyr at personer kan endre disse faktorene. Drift og vedlikehold påvirker f.eks. energieffektiviteten, og som en konsekvens av det blir også energiforbruket påvirket. Videre er det ulike krav for inneklima. Energiforbruket påvirkes også av sosiale faktorer, og sosiale aspekter inkluderer bl.a. lokale vaner på bygningsbruk, politiske betingelser, dominerende energikilde i området og ikke minst energipris. Aspektene er også en påvirker for levestandard og mulighet til å betale energiregninger eller investere i energieffektive tiltak [17].

Ettersom energibruk i bygninger blir påvirket av såpass mange forskjellige faktorer, er det utfordrende å prediktere energiforbruket. De tekniske og fysiske faktorenes innflytelse er enklest å identifisere, mens de menneskelige faktorene, som må inkluderes for å gi det reelle energiforbruket, er utfordrende å identifisere innflytelsen til. Årsaken er at drift og vedlikehold, sosiale faktorer og betingelser for inneklima påvirkes av brukeradferd, og den ulike brukeradferden gir forskjellig påvirkning på energibruket [16]. Delkapittel 2.9 beskriver brukeradferden tydeligere.

Varighetskurve

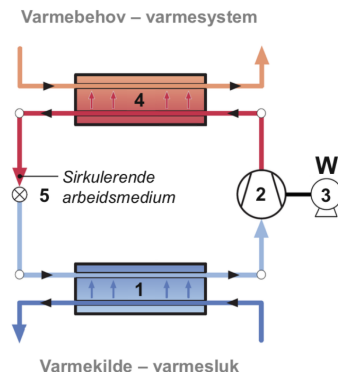
En varighetskurve er et diagram som viser effektbehovet som funksjon av tid, hvor effektbehovet kan bestå av romoppvarming og ventilasjonsvarme. Effektbehovet i diagrammet er sortert fra størst til minst i løpet av et år, og arealet under varighetskurven gir det årlige energibehovet. For å fordele energibehovet som forsynes fra de ulike energiteknologiene skilles det mellom grunn- og topplast. Grunnlasten er den delen av energibehovet hvor det brukes en bestemt energiforsyning store deler av året, mens topplasten er den delen av energibehovet som krever ekstra energiforsyning for å kunne dekke det totale energibehovet. Det er hovedsakelig kostnader som bestemmer hvordan varmebehovet fordeles mellom grunn- og topplast. Energiforsyningen til grunnlasten har en høy investeringskostnad og lav driftskostnad, mens energiforsyningen til topplasten har en lav investeringskostnad og høy driftskostnad [14].

2.2 Energiforsyning

Energiforsyningssystem er forsyningen fra energikilden til oppvarmingssystemet, kjølesystemet og det elektriske systemet, og inkluderer produksjon, omforming og distribusjon av energibærere [15]. Varmepumpe og fjernvarme er eksempler på energiteknologier.

2.2.1 Varmepumpe

De fire hovedkomponentene i en varmepumpe er kompressor med elektromotor, fordamper, strupeventil og kondensator. Disse komponentene blir koblet sammen med et lukket rørsystem hvor det sirkulerer et arbeidsmedium. Arbeidsmediet overfører termisk energi fra varmekilde til varmesystem ved å gjennomgå tilstandsendringer i en kontinuerlig prosess [18]. Figur 1 viser en skisse av varmepumpeprosessen. Figur 1 inkluderer fordamperen (1), kompressoren (2), elektromotoren (3), kondensatoren (4) og strupeventilen (5).



Figur 1 Varmepumpeprosess [18]

Fordamperen (1) gir termisk varmeoverføring fra varmekilden til arbeidsmediet som fordamper på grunn av temperaturdifferanse. Kompressoren (2) tilføres effekt (W) ved hjelp av en elektromotor (3), og komprimerer arbeidsmediet slik at temperaturen på arbeidsmediet øker. Kondensatoren (4) gir termisk varmeoverføring fra arbeidsmediet, som kondenserer, til varmesystemet på grunn av temperaturdifferanse. Strupeventilen (5) senker temperaturen på arbeidsmediet ved å redusere trykket. Syklusen fortsetter deretter med fordamperen igjen. Reverseres prosessen, kan arbeidsmediet overføre termisk energi ut av bygningen i stedet, og da oppnås kjøling. Varmepumpen blir da kalt for en kjølemaskin. En reversibel varmepumpe kan levere varme eller kjøling [18]. Ulike varmekilder har forskjellige egenskaper, og utformingen og driften av varmepumpen vil derfor påvirkes forskjellig. Uteluft, jord, sjøvann og fjell/berg er eksempler på ulike varmekilder [19].

2.2.2 Fjernvarme

Fjernvarmesystemet består av et rørsnettverk, en varmesentral og abonnentsentraler. Varmesentralen produserer varme, og varmer opp vann ved å utnytte lokale energikilder som ellers ikke ville blitt brukt. Dette gjelder f.eks. varmeenergi fra avfallsforbrenning, forbrenning av biomasse eller spillvarme fra industri. Det varme vannet går deretter gjennom rørsnettverket til abonnentsentralene som forbruker vannet [20]. Rørsnettverket består av tur- og returrør, hvilket er rør inn og ut av abonnentsentralene. Temperaturen inn i bygningen heter turtemperatur, mens temperaturen ut av bygningen heter returtemperatur. Med andre ord er returtemperaturen den temperaturen som fjernvarmevannet har når det har gitt fra seg varme i bygningen og returnerer til fjernvarme-

nettet. Differansen mellom tur- og returtemperatur forteller hvor mye varme som er overført fra fjernvarmevannet til bygningen [21].

For å varme opp fjernvarmevannet i Trondheim er det hovedsakelig et anlegg for avfallsforbrenning på Heimdal som benyttes, og herfra går vannet videre i rør til store deler av byen [22]. På anlegget forbrennes avfall som ikke kan nyttiggjøres eller gjenvinnes på andre måter. Avfallsforbrenningen er lovpålagt, og regnes også som fornybar [23]. Det eksisterer også undersentraler i Trondheim som sørger for sikker forsyning av fjernvarme, og topplasten blir dermed dekket av disse sentralene [22]. Kjelenes driftes på bioolje, elektrisitet og enkelte fortsatt på fossile kilder, men disse skal nå fases ut for å nå miljøambisjoner. I 2020 oppnådde nettet i Trondheim en fornybarandel på 95%. 2019 var et utfordrende år, grunnet driftsproblemer på Heimdal, og fornybarandelen ble derfor kun 85,9%. Det vedtatte målet er at nettet skal være helt klimanøytralt innen 2040, med et delmål om en fornybarandel på 98% innen 2030 [23].

2.3 Energidistribusjon

Energidistribusjonssystem distribuerer termisk eller elektrisk energi gjennom bygningen ved bruk av et vannbåren system, et ventilasjonssystem eller et elektrisk system.

2.3.1 Vannbåren system

Vann fra fjernvarme og f.eks. en luft-til-vann varmepumpe distribueres i rør i et vannbåren system. Vannet kan f.eks. distribueres videre til ventilasjonssystem, hvor varme overføres fra det sirkulerende vannet i rørene til tilført luft for ventilasjon. Overføringen fra varmt vann til luft skjer i varmebatteriet i ventilasjonsaggregatet. Vannet kan også distribueres videre til f.eks. bruk av varmt tappevann.

2.3.2 Ventilasjonssystem

Ventilasjonssystem distribuerer luft i kanalnett til ulike rom ved bruk av vifter som bruker elektrisitet, og skal tilfredsstillere krav til inn klima som vil bli beskrevet i delkapittel 2.5. Ventilasjonssystemet kan bestå av komponentene [24]:

- Luftinntak: tar inn uteluft til ventilasjonssystemet.
- Luftavkast: kaster ut brukt luft fra ventilasjonssystemet.
- Ventilasjonsaggregat: inneholder typisk vifter, filtre, varmegjenvinner, varme-/kjølebatteri, spjeld og automatikk. Ventilasjonsaggregat fungerer som hjerte i ventilasjonssystemet. Til-luftsfilter filtrerer bort forurensninger fra uteluften, mens avtrekksfilter beskytter aggregatet mot nedsmussing. Varmegjenvinneren overfører varme i avtrekksluften til tilluften. Varme-batterier overfører varme fra vann til luft, og kjølebatterier overfører varme fra luft til vann.

Rør med varmt eller kaldt vann føres da gjennom luften slik at luften får eller avgir varme til vannet. Automatikk regulerer komponentene i aggregatet, slik at riktig tilluftstemperatur og luftmengde oppnås med lavest mulig energibruk.

- Kanalnett: distribuerer luften til og fra de ulike sonene og rommene. Kanalnett fungerer som blodårene i ventilasjonssystemet, og må ha lavt trykktap og være tett.
- Spjeld: regulerer at riktig luftmengde kommer til riktig sone og rom. Det lager en motstand som øker trykktapet, og fordeler dermed luften til riktig sted.
- Tilluftsventiler: tilfører luft inn i sonene og rommene. Tilførselen gjøres hovedsakelig etter prinsippene omrøringsventilasjon eller fortreningsventilasjon. Målet med omrøring er å blande hele romluften, slik at konsentrasjonen av forurensing er lik i hele rommet. Luften kan tilføres via en tilluftsventil i taket med høy lufthastighet for å få fullstendig omrøring utenfor oppholdssonen for å unngå trekk. Målet med fortrenning er å presse varmen og forurensningen til taket over sonen hvor personer oppholder seg.
- Avtrekksventiler: trekker brukt luft ut fra rommene.
- Overluftsventiler: overfører luft mellom rom dersom tillufts- og avtrekksventiler plasseres i ulike rom.

Behovsstyrt ventilasjon

I kontorbygninger kan energibruk til ventilasjon utgjøre en betydelig del av det totale energibehovet. For å redusere energibruk til ventilasjon, kan behovsstyrt ventilasjon benyttes ved å minimalisere luftmengdene uten å redusere kvaliteten på inneklimate [15]. Dette kalles Demand-Controlled Ventilation (DCV), og benyttes når belastningen for ulike rom kan ha stor variasjon gjennom døgnet [24]. Da reguleres luftmengdene automatisk i hvert rom ut fra målt luftkvalitet fra en sensor i rommet [25]. Avhengig av behovet, vil luftmengden reguleres kontinuerlig mellom minimum og maksimum luftmengde. Behovsstyrt ventilasjon refereres ofte til det som på engelsk blir kalt for Variabel Air Volume (VAV). Dette systemet kan både regulere luftmengden etter målt behov med sensormåling eller antatt behov uten sensormåling. Dermed inkluderer VAV både DCV og personstyrt ventilasjon [26].

Tilstedeværelse, temperatur og CO₂-nivå er de mest brukte, og aktuelle, styringsparameterne for ventilasjon i kontorbygninger. Sensorer for tilstedeværelse i rommet registrerer om det er personer, og kan brukes til regulering av luftmengder, temperaturstyring og lysstyring. Som et eksempel kan luftmengden reguleres etter antatt personbelastning, men det vil ikke bli avdekket om luftmengden er korrekt sammenliknet med belastningen. Med andre ord er det begrensede muligheter til å regulere etter reell personbelastning for tilstedeværelse. Sensorer for temperatur i rommet brukes til regulering ut fra temperaturen, og det er kun termisk belastning det kan reguleres etter.

Dermed benyttes temperaturstyring ofte med tilstedeværelse eller CO₂-nivå. Kombinasjon av temperaturstyring og tilstedeværelse øker luftmengden når det registreres tilstedeværelse. Da reguleres luftmengden etter antatt personbelastning og videre etter temperaturøkning. Kombinasjon av temperaturstyring og CO₂-nivå gir bedre regulering i forhold til reell personbelastning [25].

Oppvarming via tilluft

Rapporten "Oppvarming via tilluft" [27] gir veiledning og krav for oppvarming via tilluft. Separate systemer for oppvarming og ventilasjon har tidligere vært anbefalt [15], men til tross for dette eksisterer det i dag systemer for oppvarming via temperert tilluft. Årsaken til dette er stadig strengere energikrav i bygninger som gir mindre behov for oppvarming. Godt isolerte bygningskropper og behovsstyrt ventilasjon gir dermed mulighet for forenklete løsninger for oppvarming.

For et system med oppvarming via tilluft, eksisterer det flere forutsetninger. Ifølge rapporten må oppvarmingsbehovet være så lite at det dekkes av interne laster mesteparten av året. Behovet bør være rundt 15 kWh/m² per år. Ekstra varme kan på kalde dager tilføres via svak overtemperatur, hvilket betyr høyere tilluftstemperatur enn innetemperatur. Videre bør bygningen ha lave U-verdier, tett bygningskropp og minimal kuldebro, i tillegg til at en treg bygning er en fordel. Bygningen må med andre ord ha en betydelig forbedret bygningskropp. Bygninger med dårlig isolasjon gir store oppvarmingsbehov som kan gi en ubehagelig høy tilluftstemperatur, mens bygninger med god isolasjon har et mindre oppvarmingsbehov og en lavere tilluftstemperatur er nødvendig. Basert på forutsetningene, eksisterer det også vurderingskriterier på de kaldeste dagene for inn klima for utsatte rom. For å gi en god ventilasjonseffektivitet og for å unngå fare for trekk, er det nødvendig med behovsstyrt ventilasjon med aktive tilluftsventiler som gir god lufthastighet og omrøring. I et slikt system er det også viktig med utjevning av temperatur mellom ulike rom [27].

2.4 Energiforbruk i bygninger

Gjennom Byggeteknisk forskrift TEK17 [6] stiller Plan- og bygningsloven krav til energi i bygninger. TEK17 er det nyeste regelverket, mens TEK10 er det tidligere regelverket. Begge regelverkene inneholder krav til energieffektivitet, der totalt netto energibehov for en kontorbygning ikke skal gå over energirammen på 115 kWh/m² oppvarmet bruksareal per år. Forskriftene har også andre krav til energieffektivitet. Kravene er de samme, og er gitt i tabell 1.

Tabell 1 Energiforbruk i bygninger

Parameter	Krav TEK17/TEK10
Totalt netto energibehov [kWh/m ² år]	≤ 115
U-verdi yttervegg [W/m ² K]	≤ 0,22
U-verdi tak [W/m ² K]	≤ 0,18
U-verdi gulv på grunn og mot det fri [W/m ² K]	≤ 0,18
U-verdi vindu og dør inkludert karm/ramme [W/m ² K]	≤ 1,2
Lekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell [luftveksling per time]	≤ 1,5
Spesifikk vifteeffekt (SFP) i driftstid [kW/(m ³ /s)]	≤ 1,5

I forskriftene stilles det også krav til løsninger for energiforsyning når oppvarmet bruksareal er større enn 1000 m². Da skal bygningen ha varmesystemer som er energifleksible, og det skal tilrettelegges for bruk av lavtemperatur varmeløsninger.

2.5 Inneklimakrav i bygninger

Gjennom TEK17 stiller Plan- og bygningsloven også krav til helse og inneklima i bygninger [28]. Det stilles minimumskrav til lufttilførsel og luftavtrekk i ventilasjonsanlegg. Ventilasjonssystem skal være egnet for forurensning og fuktighetsbelastning i rommet som sikrer tilfredsstillende luftkvalitet. Arbeidsmiljøloven gir anbefalinger til operativ temperatur og CO₂-nivå gjennom Arbeidstilsynets veiledning "444 Veiledning om klima og luftkvalitet på arbeidsplassen", og henviser videre til standarden NS-EN15251 [29]. Standarden NS-ISO 7730 gir kriterier for antatt prosentvis misfornøyde (PPD), forventet middelvotering (PMV), trekk og prosent misfornøyde (PD) [30]. Disse veiledningene, forskriftene og lovene skal sikre at det termiske og atmosfæriske inneklimaet er tilfredsstillende [24], og er gitt i tabell 2.

Tabell 2 Inneklimakrav og anbefalinger til bygninger

Parameter	Forklaring	Krav
Lufttilførsel (A, B)	Personer med lett aktivitet	≥ 26 m ³ /h per person
	Materialer, produkter og installasjoner (rom i bruk)	≥ 2,5 m ³ /h per m ²
	Materialer, produkter og installasjoner (rom ikke i bruk)	≥ 0,7 m ³ /h per m ²
Luftavtrekk (C)	Bad/dusj	≥ 54 m ³ /h per dusj
	Toaletter	≥ 36 m ³ /h per toalett
	Heissjakt	≥ 30 m ³ /h per heis
	Kjellerrom	≥ 2,5 m ³ /h per m ²
	Garasje for langtidsparkering	≥ 3 m ³ /h per m ²
	Garasje for korttidsparkering	≥ 30 m ³ /h per m ²
Lufttemperatur	Ved oppvarmingsbehov	< 22°C
Operativ temperatur	Personer med lett aktivitet	19°C < T ₀ < 26°C
PPD	Middels krav	< 10 %
PMV	Middels krav	-0,5 < PMV < 0,5
Trekk	Middels krav	< 20 %
PD	Vertikal temperaturgradient (middels krav)	< 5 %
PD	Forårsaket av varmt eller kaldt gulv (middels krav)	< 10 %
PD	Asymmetrisk stråling (middels krav)	< 5 %
CO ₂ -nivå	Arbeidstilsynet	< 1000 ppm

Tabell 2 viser at lufttilførsel på grunn av forurensninger fra personer med lett aktivitet (A) minimum må være 26 m³/h per person. Lufttilførselen på grunn av forurensning fra materialer, produkter og installasjoner (B) må minimum være 2,5 m³/h per m² og 0,7 m³/h per m², henholdsvis når rommet er i bruk og ikke i bruk. For rom med forurensende aktiviteter og prosesser, må det være luftavtrekk (C) slik at tilfredsstillende luftkvalitet opprettholdes. Den største verdien av (A+B) og C dimensjonerer lufttilførselen [28].

Tabell 2 viser også parametere som lufttemperatur og operativ temperatur. Ved oppvarmingsbehov er det anbefalt at lufttemperaturen er under 22°C. Den operative temperaturen, som er den

sammensatte virkningen av lufttemperaturen og den termiske strålingen fra overflater i rommet [24], er et mål på hvordan personer opplever innnetemperaturen [24]. Med unntak av situasjoner der det er driftsforstyrrelser ved anlegget eller andre feil, bør den laveste grensen på 19°C alltid kunne holdes. Det kan være utfordrende å holde den høyeste grensen på 26°C på dager med høy utetemperatur, og overskridelse bør derfor aksepteres [28].

2.6 Spesifikk vifteeffekt

Spesifikk vifteeffekt er en parameter som kan brukes til å vurdere energieffektiviteten til et ventilasjonssystem. Energibruk til vifter utgjør en betydelig del av energifordelingen til ventilasjon, hvor postene er ventilasjonsvarme, ventilasjonskjøling og vifter. Energibruk til vifter utgjør også en betydelig del av det totale energibudsjettet i kontorbygninger. Spesifikk vifteeffekt (SFP) er forholdet mellom den elektriske effekten som er nødvendig for å drive viftene i et ventilasjonssystem og den luftmengden som distribueres ved hjelp av viftene, og er gitt i likning 1 [31].

$$SFP = \frac{\sum P}{\dot{V}} [kW/(m^3/s)], \quad (1)$$

hvor

$\sum P$ er summen av alle vifteeffekter [kW].

\dot{V} er total sirkulert luftmengde [m^3/s]. Dette er den største av tillufts- og avtrekksmengdene i systemet, og det skal brukes netto luftmengde på romnivå.

Likning 1 viser at energibruk til vifter er avhengig av luftmengde og SFP, i tillegg til driftstid. Videre er summen av alle vifteeffekter fra likning 1 gitt i likning 2 [31].

$$\sum P = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_{tot}}{\eta_{tot}} [kW], \quad (2)$$

hvor

\dot{V} er total sirkulert luftmengde [m^3/s].

Δp_{tot} er totaltrykkfallet [kPa].

η_{tot} er viftesystemets totale virkningsgrad [-]. Denne angir hvor stor del av tilført effekt til viftemotor som går med til å distribuere luft.

Likning 2 viser at energibruk til vifter også er avhengig av trykkfallet i ventilasjonssystemet og viftesystemets totale virkningsgrad. Dermed er SFP også gitt i likning 3 [31].

$$SFP = \frac{\sum P}{\dot{V}} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_{tot}}{\eta_{tot} \dot{V}} = \frac{\Delta p_{tot}}{\eta_{tot}} [kPa], \quad (3)$$

hvor

$\sum P$ er summen av alle vifteeffekter [kW].

\dot{V} er total sirkulert luftmengde [m^3/s].

Δp_{tot} er totaltrykkfallet [kPa].

η_{tot} er viftesystemets totale virkningsgrad [-].

Systemkarakteristikk er en kurve som forteller hvordan trykket i et ventilasjonssystem endres med luftmengden, og er gitt i likning 4 [26].

$$\Delta p_{tot} = k \cdot \dot{V}^a \text{ [Pa]}, \quad (4)$$

hvor

k er proporsjonalfaktor [-].

\dot{V} er luftmengde [m^3/s].

a er eksponent [-]. For laminær strømning er $a=1$, mens for turbulent strømning er $a=2$.

2.7 Energieffektivisering i bygninger

Energieffektivisering i bygninger er tiltak som reduserer energi- og effektbehov i bygninger, og det kan avdekkes teoretiske, tekniske, økonomiske og reelle potensialer for reduksjonen [32]. Det kan være tiltak på bygningskroppen, tekniske installasjoner og selve driften, og et eksempel på energieffektivisering er styring av ventilasjon.

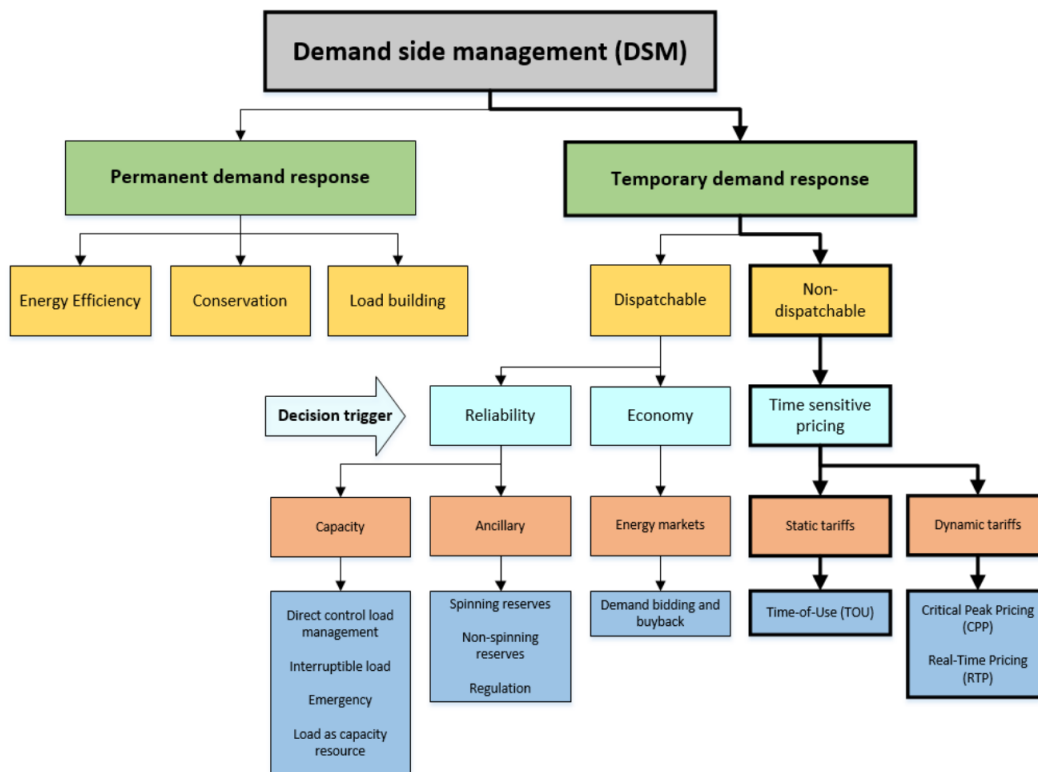
2.8 Demand Response

Demand Response (DR) vil spille en viktig rolle for fremtidens smarte bygninger og energisystemer. I dag finnes det flere studier som har gått i dybden på Demand Response for strømmettet, men en liknende fremgang har ikke blitt gjort for fjernvarmenettet [11]. I dette delkapittelet vil Demand Response bli definert for energisystemene strømmett og fjernvarmenett.

Strømmettet og sluttbruker

Effekttopper oppstår ved høyt energibruk på kort tid. Et eksempel er når en større kontorbygning varmes opp mandags morgen etter nedsenket temperatur i helgen, eller når flere elbiler lader samtidig etter jobb. For strømmettet kan det da bli nødvendig å investere i mer nett ved effekttopper, da nettet må være dimensjonert for dette. På den andre siden kan strømkunder flytte forbruket bort fra de timene nettet er mest belastet. Dette reduserer nødvendig investering, og bidrar til å holde nettleien nede [33]. Med andre ord ønskes det å opprettholde en systembalanse mellom energiforsyningen fra strømmettet og energibehovet hos sluttbrukeren. Balansen kan oppnås ved å administrere enten forsyningssiden eller behovssiden, og sistnevnte blir på engelsk kalt for Demand Side Management (DSM) [34].

Figur 2 viser ulike kategorier innen Demand Side Management, hvor det skilles mellom permanent Demand Response og midlertidig Demand Response markert i grønn farge. I denne oppgaven er det valgt å fokusere på prisbasert Demand Response, og av den grunn er det nødvendig å definere flere kategorier i figur 2.



Figur 2 Demand Side Management (DSM) [34]

Rapporten "Demand Response in electricity generation planning" [10] definerer Demand Response som:

Endringer i sluttbrukernes strømforbruk, fra deres normale forbruksmønstre, som respons på endringer i prisen på strøm over tid.

Fra figur 2 blir midlertidig Demand Response i grønn farge normalt bare kalt for Demand Response. Da endrer sluttbruker forbruket midlertidig på tidspunkt det er nødvendig for systemet. [34] Denne kategorien skiller videre mellom sendbar og ikke-sendbar Demand Response i gul farge i figur 2. Ved ikke-sendbar Demand Response endrer sluttbruker behovet frivillig, og dette er vanligvis som respons på prissignaler varslet flere timer eller dager i forkant. Vanligvis belastes sluttbruker tidsvarierende tariffer, som er i turkis farge i figur 2. Denne kategorien motiverer for endringer i forbruksmønstret på grunn av energipris, og kalles derfor ofte prisbasert Demand Response. Som tidligere beskrevet, er det i denne oppgaven valgt å studere denne kategorien. Prisba-

sert Demand Response er frivillig siden det er helt opp til sluttbruker hvordan den skal respondere på tariffene. Det finnes flere modeller for tariffene, og figur 2 viser tre eksempler i blå farge hvor en av modellene går under statiske tariff, mens de to andre modellene går under dynamiske tariff [34]. Dermed er brukeradferd og kostnader sentralt for prisbasert Demand Response, og vil henholdsvis bli beskrevet i delkapittel 2.9 og delkapittel 2.11.

Fjernvarmenettet og sluttbruker

Fjernvarme utnytter som regel varmeenergien fra avfallsforbrenning, spillvarme fra industri eller forbrenning av biomasse som grunnlast. Ved effekttopper må det benyttes fossile brensler eller elektrisitet som toppplast [35]. Nåværende fjernvarmesystemer går mot fjerde generasjons fjernvarme, hvor sluttbruker spiller en viktig rolle i driften av fjernvarmesystemet. Forskning har vist at optimalisering av oppvarming i bygninger kan redusere belastning i nettet og bidra til å redusere primærenergibruk [36]. Med andre ord kan Demand Response for fjernvarme redusere kostnader og utslipp i hele energisystemet ved å redusere eller flytte forbruket til et annet tidspunkt. Ettersom produksjon av fornybar energi og sluttbrukere øker, vil fremtidige energisystemer trenge økt fleksibilitet [11]. Fleksibilitet i fjernvarme har blitt foreslått som en viktig måte å legge til rette for bruk fornybare energiresurser i energisystemet. Dette kan være lagring av termisk energi i form av termisk treghet av bygninger, varmelagringsenheter og selve fjernvarmenettet [37].

Rapporten "Demand Response events in district heating: Results from field tests in a university building" definerer Demand Response som [11]:

Endringer i sluttbrukernes energiforbruk, fra deres normale forbruksmønster, som respons på endringer i prisen på energi over tid, incentiver fra forsyningen eller en mulig trussel mot systemets pålitelighet.

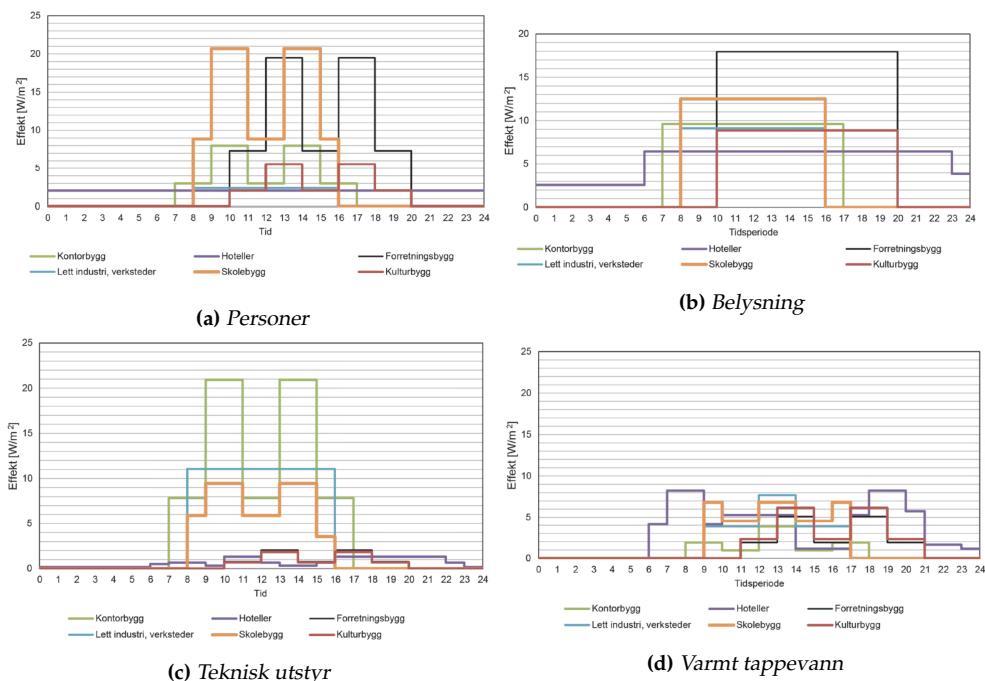
Dermed øker Demand Response energifleksibiliteten i bygninger med hensyn til både termiske og elektriske systemer. Egnede strategier for Demand Response er nødvendig for at forskjellige bygningstyper kan redusere energibruk uten at det går på bekostning av inneklima [38].

2.9 Brukeradferd

Som beskrevet i delkapittel 2.8, er brukeradferd sentralt for Demand Response. Demand Response kan bidra til endring i forbruksmønsteret slik at energi- og effektreduksjon kan oppnås. Brukeradferd er adferden til personer som bruker bygningen. For en kontorbygning er dette de ansatte i en bedrift. Brukeradferd kan både være kjøp av nye systemer og utstyr, eller automatiske vaner som brukerne har uten å tenke over hvilke konsekvenser handlingene får. For eksempel om personer skrur av lys når et rom forlates.

Brukeradferd gir dermed ulike brukerprofiler basert på personens valg. Figur 3 viser brukerprofiler ved normert teoretisk beregning av bygningers netto energibehov, gjort etter Norsk Standard

NS3031. Brukerprofilene er utarbeidet for å dokumentere energiytelse med standardiserte betingelser. Profilene gjelder for personer, belysning, teknisk utstyr og varmt tappevann som henholdsvis er gitt i figur 3a, figur 3b, figur 3c og figur 3d. Fargen grønn indikerer kontorbygg.



Figur 3 Effektvariasjon per time for driftsdøgn i en normert beregning [13]

Som regel avviker teoretisk energibehov fra reelt energibehov, som beskrevet i delkapittel 2.1. En årsak til dette avviket er brukeradferden, som både påvirker energiforbruket og inneklimate i en bygning. Av den grunn gir implementert brukeradferd i beregninger bedre resultater for det reelle energibehovet.

Brukeradferd har stor påvirkning på energiforbruket og inneklimate i en bygning. Energioppfølgings-system (EOS) gir brukere informasjon om energibehovet i en bygning, og er en systematisk og kontinuerlig kontroll av energitilstanden av bygningen i drift. Da kan brukerne bli mer bevisste på å oppnå lavt energibruk og unngå høye effekttopper. Disse systemene kan være alt fra avlesning fra en energimåler i boliger til datasystemer med flere målere i kontorbygninger [39]. Fleksibel brukeradferd er dermed et viktig tiltak ved høye effekttopper, da brukerne kan redusere eller flytte forbruket fra perioder med høy belastning i nettet [34].

2.10 Smarte indikatorer

Konseptet smarte bygninger ble introdusert av direktivet Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), og senere introduserte direktivet også indikatoren Smart Readiness Indicator (SRI).

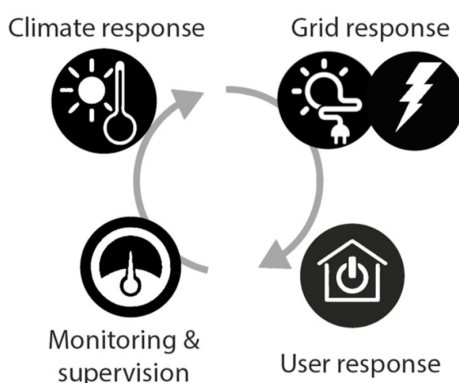
Smarte bygninger

Det finnes mange definisjoner av smarte bygninger, men definisjonene har det til felles at smarte bygninger har som mål om å fremme energifleksibilitet, fornybar energiproduksjon og brukerin-teraksjon i bygninger. Rapporten "Smart buildings features and key performance indicators: A review" [40] definerer smarte bygninger som:

Et nesten nullenergibygg (nZEB - nearly Zero Energy Building) som er i stand til å ad-ministrere mengden av fornybare energikilder i bygningen og det smarte nettet, gjøn-nom avanserte reguleringsystemer, smarte målere, energilagring og fleksibilitet på be-hovssiden. Den reagerer også på brukernes behov, og er i stand til å diagnostisere feil i bygningsdriften.

Videre blir et smart nett definert som en avansert infrastruktur for det elektriske kraftnettet, som forbedrer effektiviteten, påliteligheten og sikkerheten gjennom automatisert regulering og målings-teknologier med integrering av fornybare energikilder og lagring. I tillegg definerer rapporten en smart måler som en måler med toveis kommunikasjon, som gjør det mulig for sluttbrukere å måle og styre energiforbruket og levere data til kraftnettet for bedre overvåking og fakturering [40].

Fire grunnleggende funksjoner til smarte bygninger er Climate Response, Grid Response, User Response og overvåking og tilsyn, og disse funksjonene arbeider synergistisk. En smart bygning responderer på de eksterne forholdene Climate Response og Grid Response, og det interne forholdet User Response, som gir overvåking og tilsyn gjennom et sentraldriftskontrollanlegg [40]. Figur 4 viser de grunnleggende funksjonene for smarte bygninger.



Figur 4 Grunnleggende funksjoner for smarte bygninger [40]

Climate Response er bygningens evne til å respondere på eksterne klimaforhold, både når det gjelder reelt og prognostisert klimaforhold. En smart bygning skal minimere energibehovet, og reguleringsystemer innhenter reell og prognostisert værdedata. Grid Response er bygningens re-spons på signaler og informasjon fra nettet. En smart bygning skal redusere overbelastning i nettet, og forbruke energi ved maksimal tilgjengelighet når prisen er lav. Ved bruk av avansert

måleinfrastruktur og datautveksling oppnås et samspill mellom brukere og nettet. Dette oppnås gjennom Demand Side Management (DSM). User Response er bygningens evne til å muliggjøre samhandling mellom brukere og implementerte teknologier. Brukeren samhandler med sentraldriftskontrollanlegg for å automatisk lage optimale tidsplaner for belastning, ulike prioriteringer og spesifisere komforten. Sentraldriftskontrollanlegg gjør det mulig for brukere å samhandle med de automatiserte energisystemene, og gjør at energiforbrukeren har en aktiv rolle. I tillegg oppnås samhandling gjennom Demand Response, som knytter prisvariasjonene til brukerens prioriteringer. Overvåking og tilsyn gir muligheten til overvåking av de tekniske systemene og brukeradferden, og synergerer med de tre andre faktorene for å optimalisere driften. Overvåking og tilsyn kan være avgjørende for å kunne minimere differansen mellom beregnet og målt energibruk [40].

Smarte indikatorer

På bakgrunn av at smarte bygninger vil spille en avgjørende rolle i fremtidens energisystemer, introduserte EPBD i 2018 indikatoren Smart Readiness Indicator i bygninger. Denne indikatoren måler bygningens kapasitet til å tilpasse driften til nettets og brukerens behov [40]. Det er tre grunnleggende funksjoner for SRI i en bygning. For det første skal bygningen ha beredskap for tilpasning som respons på brukernes behov, og mulighet for brukere til å ta direkte kontroll over energiforbruk. For det andre skal bygningen ha beredskap for tilpasning som respons på situasjonen i energinettet. For det tredje skal bygningen ha beredskap for tilrettelegging av vedlikehold og effektiv drift av bygningen på en automatisert og regulert måte [41].

Smart Readiness Indicator er et verktøy for å kunne uttrykke en unik verdi for bygningers beredskap til smartheit. Denne verdien er uttrykt i prosent, og uttrykker hvor nær, eller langt unna, bygningen er fra maksimal smart beredskap. Jo høyere prosentandelen er, jo smartere er bygningen. Prosentandelen kan også konverteres til en annen enhet, som for eksempel en alfabetisk verdi. En foreslått metode for SRI bygger på vurderingen av tekniske tjenester i en bygning, og disse tjenestene er delt inn i ni domener: oppvarming, kjøling, varmt tappevann, regulert ventilasjon, belysning, dynamisk bygningskropp, elektrisitet, lading av elektriske biler og overvåking og regulering. Videre kan en slik tjeneste gi flere påvirkninger på bygningen, brukerne og energinettet. Den foreslåtte metoden for SRI evaluerer syv kriterier for påvirkninger: energieffektivitet, vedlikehold og feilprediksjon, komfort, bekvemmelighet, helse og velvære, informasjon til brukere og energifleksibilitet og lagring. Disse kriteriene kan fordeles på de tre grunnleggende funksjonene for SRI i en bygning. På bakgrunn av en poengsum for hver påvirkning per teknisk domene, kan total verdi for Smart Readiness Indicator bestemmes [41].

Begrensningen i denne SRI-metoden er at den er kvalitativ og kun vurderer tjenestene og teknologiene uten å evaluere ytelsen av dem. Imidlertid er det viktig å kvantifisere ytelsen på bygningen for å vurdere potensielle besparelser og validere forbedringer. Av den grunn brukes Key Performance Indicators (KPIs) for å sikre energisparende mål. Med andre ord kvantifiseres de fire grunnleggende funksjonene til smarte bygninger ved hjelp av KPIs. Smart Readiness Indicator er

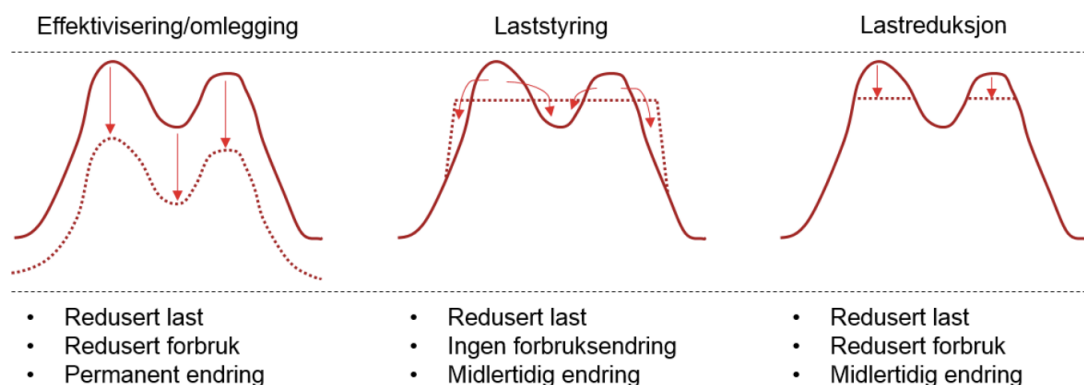
et eksempel på Key Performance Indicator, men det eksisterer flere KPIs for å kunne kvantifisere ytelsen og suksessen med å nå mål i smarte bygninger. Dermed er KPIs grunnleggende for å oppnå energieffektivitet. Tabell 3 viser totalt 36 ulike KPIs, hvor KPIs med liknende mål og funksjoner er gruppert sammen [40].

Tabell 3 *Key Performance Indicators (KPIs) [40]*

Gruppe	Key Performance Indicator
1 Overall Building Energy Performance	Primary Energy Global Energy Performance Indicator Energy Demand and Consumption Energy Savings
2 DSM Assessment	Demand Response Peak Load Reduction Load Shifting Flexibility Factor
3 RES Assessment	Degree of Energetic Self-Supply by Renewable Energy Sources (RES) Increased RES and Distributed Energy Sources (DER) hosting capacity Generation Load Cover Factor RES Self-consumption (Supply Cover Factor) Maximum Hourly Surplus Maximum Hourly Deficit
4 RES Mismatch	Annual Mismatch Ratio Load Matching Index Mismatch Compensation Factor
5 Grid Interaction	Grid Interaction Index No Grid Interaction Probability Absolute Grid Support Coefficient Relative Grid Support Coefficient
6 Storage Performance	Storage Capacity Storage Efficiency Depth of Discharge
7 Building Operational Evaluation	Smart Readiness Indicator (SRI) Building Operational Performance KPI EU Energy Label Smart Ready Built Environment Indicator
8 Technical Losses/Failures	Reduced Energy Curtailment of RES And DER Reduction of technical network losses Increased Power Quality and Quality of Supply Increased reliability
9 Users Involvement	Consumer Engagement System Average Interruption Duration Index (SAIDI) System Average Interruption Frequency Index (SAIFI)

Det bør velges minst en KPI fra hver gruppe for å evaluere ytelsen til den smarte bygningen, men det er utfordrende å velge en representativ indikator for hver gruppe [40]. Som en forenkling, vil det i denne oppgaven bare studeres gruppe 2 om Demand Side Management. Disse indikatorene fokuserer på måling av effekttoppen og evnen til lastforskyvning. Tabell 3 viser at denne gruppen inneholder Demand Response, Load Shifting og Peak Load Reduction, og disse deler felles mål om å måle potensialet for reduksjon av effekttopper. Indikatoren Demand Response har blitt testet i flest studier. Videre viser tabell 3 at gruppen også inneholder Flexibility Factor, og denne måler fleksibiliteten til en bygning i forhold til lave og høye elektrisitetsperioder og varmeeffekt. Denne indikatoren har imidlertid blitt testet i få studier [40]. Av den grunn vil det fokuseres på de tre indikatorene Demand Response, Peak Load Reduction og Load Shifting i denne oppgaven.

Demand Response er beskrevet i delkapittel 2.8, mens Peak Load Reduction og Load Shifting er ikke beskrevet tidligere. Figur 5 viser ulike måter å redusere effekttopper på.



Figur 5 Ulike måter for effektreduksjon [42]

Peak Load Reduction tilsvarer lastreduksjon i figur 5, mens Load Shifting tilsvarer laststyring. Heltrukket linje viser en effektkurve over et døgn med en effekttopp om morgenen og en effekttopp om ettermiddagen. Pilene viser hvordan effekttoppene reduseres, og stiplet linje viser hvordan effektkurven endres etter tiltak. Laststyring gir ingen reduksjon i energiforbruket, men forbruket jevnes ut over døgnet [42]. Dette kan oppnås ved kostnader for effekttopper og/eller lagringsenheter som forskyver driften. Da forskyves lasten til en annen periode med mindre belastning [40]. Lastreduksjon gir reduksjon i energiforbruket, og har fokus på å redusere forbruket i perioder med høy belastning slik som på morgenen og på ettermiddagen. Dette kan for eksempel oppnås ved å benytte en alternativ energikilde i perioder med høy effekt [42]. Både laststyring og lastreduksjon er en midlertidig endring, og det samme er prisbasert Demand Response.

2.11 Kostnader

Kostnader er sentralt for prisbasert Demand Response, som ble beskrevet i delkapittel 2.8. Av den grunn er elektrisitetstariff og fjernvarmetariff essensielt for effektreduksjon. Energikostnader er kostnader for å fremskaffe energi, mens effektkostnader er kostnader knyttet til kapasiteten for systemet. Forskjellen på en pris og en tariff er at pris er i kroner per enhet, mens en tariff er en modell for å beregne den totale kostnaden [15].

2.11.1 Elektrisitetstariff

Total kostnad for elektrisitet består av en nettleie og en strøm kostnad. Nettleien består av et årlig fastledd, et energiledd og kan bestå av et effektledd, til den lokale nettleverandøren [43]. Fastleddet er uavhengig av hvor mye elektrisitet som brukes [15]. Når det gjelder energileddet for nettleien, består det både av en energipris og en forbruksavgift. Energiprisen er prisen per kilowatttime som brukes, mens forbruksavgiften betales videre fra nettleverandøren til staten. Større næringskunder

kan også ha et effektledd, og baserer seg på maksimalt effektuttak [44]. Strømkostnaden består av et energiledd, i tillegg til et påslag og eventuelt et månedlig fastledd, til valgt strømleverandør. Energileddet kan være basert på spotpris fra den nordiske kraftbørsen Nord Pool. Påslaget er et pristillegg til strømleverandør, og kan betraktes som et energiledd [43].

Effektleddet tar utgangspunkt i den høyeste effekten som er målt over en time i den aktuelle måneden. Tabell 4 viser effektpris for både elektrisitet og fjernvarme for vinter fra 2019.

Tabell 4 Effektpris for elektrisitet og fjernvarme for vinter (nov-feb) [44] [45]

Nivå	Effektpris
0-200 kW	60 kr/kW/mnd
200-500 kW	53 kr/kW/mnd
500-800 kW	47 kr/kW/mnd
> 800 kW	40 kr/kW/mnd

Fra tabell 4 blir det observert at for de første 200 kW blir effektprisen 60 kr/kW/mnd. Dersom effektforbruket er større enn 200 kW, adderes de første 200 kW med det ekstra effektforbruket mellom 200 kW og 500 kW som har en effektpris på 53 kr/kW/mnd, og slik fortsetter det. Tabell 5 viser tilsvarende effektpris for elektrisitet og fjernvarme for sommer fra 2019.

Tabell 5 Effektpris for elektrisitet og fjernvarme for sommer (mar-okt) [44] [45]

Nivå	Effektpris
0-200 kW	45 kr/kW/mnd
200-500 kW	40 kr/kW/mnd
500-800 kW	35 kr/kW/mnd
> 800 kW	30 kr/kW/mnd

2.11.2 Fjernvarmetariff

Total kostnad for fjernvarme har ingen fastbeløp, og kunder har ulike fjernvarmetariffer [46]. Privatkunder har kun et energiledd, borettslag har et energiledd og et volumledd, mens næringskunder har både et energiledd, et volumledd og et effektledd [45]. Næringskunder er dermed den eneste kunden som får kostnadsbesparelser ved å redusere effekttopper. Energileddet bruker månedsmiddel for spotpris fra Nord Pool. Dette er gjennomsnittsprisen for en måned, som betyr at prisen ikke påvirkes av døgnvariasjonene slik elektrisitetstariffen gjør. Kunder blir dermed ikke belastet for høye timepriser i timer når forbruket er høyt [46]. I tillegg kommer statlige påslag og avgifter tilsvarende elektrisitetstariffen.

Fra november til og med februar kan fjernvarmetariffen bestå av et volumledd. Volumleddet har et teknisk krav til hvor lav returtemperaturen i fjernvarmenettet bør være. Høy returtemperatur betyr at det sirkulerer mye vann som ikke gjør nytte i fjernvarmenettet. Av den grunn bruker et godt regulert og effektivt anlegg lite vann og har stor differanse mellom turtemperaturen og returtemperaturen. Et middels godt anlegg har en temperaturdifferanse på 45°C, og det er denne

differansen som blir kalt for det tekniske kravet. Dersom det tekniske kravet er oppfylt, er prisen for volumleddet lik null. Da trekkes det fra 6 øre/kWh på fjernvarmeprisen for å kompensere for volumleddet, samtidig som det legges til 6 øre/kWh for volumleddet. Ved høyere differanse vil volumleddet reduseres, og tilsvarende motsatt [21].

2.12 ET-kurve og enkel lineær regresjonsmodell

Energi-Temperatur-kurve (ET-kurve), også kalt for bygningens energisignatur, viser spesifikt energibruk i en bygning som funksjon av utetemperatur. Kurven er et verktøy for energioppfølging, da den gir informasjon om hvor energieffektiv bygningen er. Punkter for energibruk mot utetemperatur vil danne et lineært mønster, og ET-kurven konstrueres som en lineær regresjon av energibruk mot utetemperatur. Energibruket vil flate ut om våren, og danner dermed et knekkpunkt som vanligvis skjer når utetemperaturen er mellom 12°C og 15°C avhengig av bygningens bruksmønster og alder. Dette knekkpunktet blir kalt for balansetemperatur eller Change Point Temperature (CPT) på engelsk, og har den fysiske betydningen av starten og slutten på oppvarmingssesongen. Dersom bygningen har kjøleanlegg, vil energibruket øke igjen om sommeren, og da får kurven to knekkpunkter. Det er viktig å bemerke at energibruk ikke bare avhenger av utetemperatur, og det kan være andre faktorer som påvirker energibruket [47].

Dermed kan ET-kurven benyttes til å avdekke unormalt energibruk for punkter som i større grad avviker fra ET-kurven, og dette kan føre til kostnadsbesparelser. I energioppfølging skal energibruken ligge innenfor en bestemt kontrollgrense sammenliknet med ET-kurven. Dersom energibruket er innenfor intervallet for kontrollgrensen, betegnes energibruket som normalt. Avvikene kan for eksempel skyldes avvik fra normale bruksmønstre [47].

I en enkel lineær regresjonsmodell er utgangspunktet for å finne en lineær sammenheng mellom x og y , observasjonsparene (x_i, y_i) for $i = 1, 2, \dots, n$. Modellen bestemmer hvilken lineær linje som passer best med de observerte parene, og er gitt i likning 5 [48].

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_i + \epsilon_i, \quad (5)$$

hvor

y_i er responsvariabelen.

β_0 er konstantleddet for regresjonen.

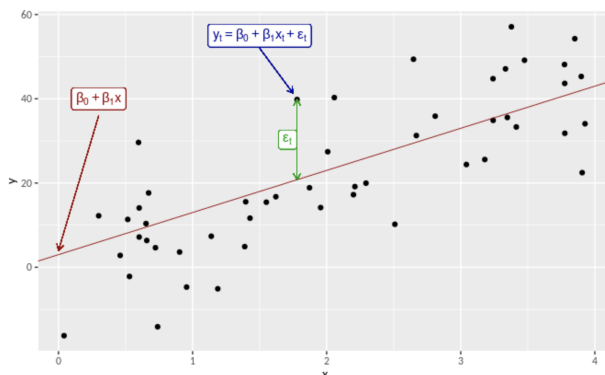
β_1 er stigningstallet for regresjonen.

x_i er regresjonsvariabelen.

ϵ_i er avviket fra modellen.

Leddene $(\beta_0 + \beta_1 x_i)$ er den systematiske delen av modellen, mens ϵ_i fanger opp andre faktorer enn x som påvirker y [49]. Et eksempel på observasjonspare med den tilhørende enkle lineære regre-

sjonsmodellen er vist i figur 6, hvor indeksen i fra likning 5 er byttet ut med indeksen t.



Figur 6 Eksempel på enkel lineær regresjonsmodell [49]

Figur 6 viser at observasjonparene ikke ligger på den lineære linjen, men er spredt rundt den. Videre kan regresjonskoeffisientene β_0 og β_1 estimeres ut fra minste kvadraters metode. Likning 6 viser den estimerte regresjonslinjen for de observerte parene [48].

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x, \quad (6)$$

hvor

\hat{y} estimert regresjonslinje.

$\hat{\beta}_0$ er estimert regresjonskoeffisient fra minste kvadraters metode.

$\hat{\beta}_1$ er estimert regresjonskoeffisient fra minste kvadraters metode.

x er regresjonsvariabel.

Likning 7 viser standard feilverdi for estimert regresjonslinje \hat{y} [48, 50].

$$SE_{\hat{y}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\nu}}, \quad (7)$$

hvor

$SE_{\hat{y}}$ er standard feilverdi for estimert regresjonslinje \hat{y}

n er antall observasjonspare

y_i er observert responsvariabel.

\hat{y} er estimert regresjonsvariabel

$\nu = n - 2$ er antall frihetsgrader

Likning 8 og likning 9 viser henholdsvis konfidensintervall og prediksjonsintervall [48, 50].

$$\text{Konfidensintervall}_i = \hat{y}_i \pm SE_{\hat{y}} \cdot t\left(1 - \frac{\alpha}{2}, \nu\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (8)$$

$$\text{Prediksjonsintervall}_i = \hat{y}_i \pm SE_{\hat{y}} \cdot t\left(1 - \frac{\alpha}{2}, \nu\right) \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (9)$$

hvor

\hat{y} er estimert regresjonslinje

$SE_{\hat{y}}$ er standard feilverdi for estimert regresjonslinje

$t\left(1 - \frac{\alpha}{2}, \nu\right)$ er kvantil (t-fordeling), som avhenger av sannsynlighet α og frihetsgrader ν

n er antall observasjoner \hat{y}

\hat{x} er gjennomsnittet av observerte regresjonsvariabler.

x_i er observert regresjonsvariabel.

2.13 Sentraldriftskontrollanlegg og IDA ICE

I delkapittel 2.10 om smarte indikatorer blir begrepet sentraldriftskontrollanlegg (SD-anlegg) nevnt. Bygningsautomatisering omfatter systemer for regulering, styring og overvåkning av tekniske installasjoner i en bygning. Sentral driftskontroll er sentralisert bygningsautomatisering basert på digital teknikk og digitalt utstyr. Av den grunn benyttes sentraldriftskontrollanlegg for regulering, styring og overvåkning av en bygning, med mål om å optimalisere driften av anlegget, og regulere parametere for inneklime [15].

IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) er et dynamisk multi-sone verktøy for simulering av bygninger, som sørger for lavest mulig energibruk og best mulig inneklime i bygningen [51].

3 Metode

Metoden for oppgaven presenteres i dette kapittelet.

3.1 Litteratur

Metoden inkluderer et litteraturstudie som har fokus på energi i bygninger, energiforsyninger, oppvarming via tilluft, inneklima, krav i forskrifter, SFP, Demand Response, brukeradferd, smarte indikatorer, kostnader for termisk og elektrisk energi og Energi-Temperatur-kurver.

3.2 Datainnsamling

I denne oppgaven studeres en referansebygning, hvor bedriften GK Inneklima har prosjektert og levert ventilasjon og byggautomatisering, og levert en reversibel varmpumpe til bygningen. Dermed brukes systemer og dokumenter fra GK for datainnsamling for referansebygningen. Datainnsamlingen inkluderer målinger fra året 2019, og type målinger er gitt i tabell 6.

Tabell 6 Målinger fra referansebygning

Type datainnsamling	Parameter for måling	Enhet/intervall
Energi	Varmepumpe	[kWh]
	Fjernvarme	[kWh]
	Varmt tappevann	[kWh]
Effekt	Varmepumpe	[kW]
	Fjernvarme	[kW]
	Varmt tappevann	[kW]
	Ventilasjonsaggregat	[kWh/h]
Interne laster	Tilstedeværelse/fravær i hvert rom	$\in [0, 1]$
	Belysning på/av i hvert rom	$\in [0, 1]$
	Samlet effekt teknisk utstyr og belysning	[kW]
Temperatur	Utetemperatur	[°C]
	Tilluftstemperatur	[°C]
	Innetemperatur i representative rom	[°C]
Luftmengde	Tilluftsmengde fra aggregatene	[m ³ /h]

Datainnsamlingen inkluderer både data fra SD-anlegget, Lindinvent, dokumentasjon for prosjektering, systemskjema og tekniske underlag for bygningen gitt av GK.

3.3 Simuleringer i IDA ICE

Datainnsamlingen brukes som input for en modell av bygningen i IDA ICE. Simuleringer av bygningen gjøres for 2019, hvor målet er å kalibrere modellen slik at simulert og reell varighetskurve for romoppvarming i størst mulig grad sammenfaller. Denne modellen blir kalt for den kalibrerte modellen. Datainnsamlingen brukes også til å sammenlikne målte og simulerte parametere som innetemperatur, luftmengde og spesifikk vifteeffekt. Videre er det utviklet ulike scenarioer for effektreduksjon av ventilasjonsvarme som simuleres ved å endre ulike parametere i forhold til den

kalibrerte modellen. Scenarioene fokuserer både på en bestemt kald dag og hele året. Den kalde dagen er tirsdag 5. februar 2019, og blir referert til som den kalde dagen videre i oppgaven. Resultatene fra IDA ICE gir energibruk og inneklima i bygningen. Ventilasjonsvarme og pumper og vifter er energipostene som det legges vekt på når det gjelder energibruk. Innetemperatur, luftmengde og CO₂-nivå er parametere som det legges vekt på når det gjelder inneklima.

3.4 Beregninger

Resultater fra målinger og simuleringer i IDA ICE brukes til ulike beregninger. De mest sentrale beregningene inkluderer energi- og effektreduksjon for ventilasjonsvarme og pumper og vifter fra kalibrert modell til scenarioene, og kostnader for termisk og elektrisk energi. I tillegg beregnes spesifikk vifteeffekt for målingene og simuleringene.

3.5 Antakelser

Oppgaven består av flere antakelser som både inkluderer målinger, simuleringer og beregninger. For målingene er det gjort antakelser der det er manglende og misvisende data. Når det gjelder simuleringene er det antatt at simulert varighetskurve for romoppvarming samsvarer med målt varighetskurve for romoppvarming. En annen sentral antakelse er at fjernvarme dekker både grunnlast og topplast for romoppvarming, i tillegg til oppvarming av varmt tappevann. Dette er ikke tilfelle for referansebygningen, hvor varmpumpe dekker grunnlast for romoppvarming. I tillegg antas det at det er nok tilgjengelig varme slik at settpunktet for tilluftstemperaturen oppnås i simuleringene. Dette er i stor grad også tilfelle i simuleringene. Til slutt antas det at CO₂-nivået i simuleringene i stor grad er under maksimum settpunkt for CO₂-nivå, slik at det er enklere å analysere luftmengdene som reguleres etter innetemperatur og CO₂-nivå i kalibrert modell og flere av scenarioene. Dette er i stor grad også tilfelle i simuleringene. Avtrekkstemperatur i aggregatene blir kalt for returtemperatur i denne oppgaven.

For beregningene er det antatt enkle modeller for kostnader av termisk og elektrisk energi, hvor energipostene er fordelt mellom dem. I beregningene vil styring av ventilasjon både påvirke termisk og elektrisk energi. Dette skyldes at ventilasjonsvarmen er termisk energi fra fjernvarmen, mens energiposten pumper og vifter er elektrisk energi fra strømmettet. Når det gjelder energiposten pumper og vifter, utgjør energibruk til pumper en ubetydelig andel av energibudsjettet i simuleringene. Av den grunn er energiposten pumper og energiposten vifter samlet i en energipost som blir kalt for pumper og vifter. Dette betyr at energiposten pumper og vifter i hovedsak består av energibruk til vifter, og det er vifter som er sentralt ved styring av ventilasjon.

3.6 Forbedret modell

Den kalibrerte modellen er til slutt forbedret ved å implementere varmpumpen i modellen, og forbedre reguleringen av tilluftstemperaturen.

4 Referansebygning

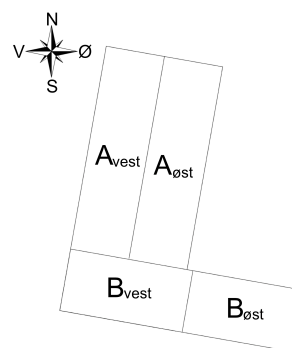
Som referansebygning i denne oppgaven er Vestre Rosten 69 (VR69) valgt.

4.1 Bygning og uteklima

Vestre Rosten 69 er en kontorbygning i Trondheim. Bygningen er vist i figur 7, hvor figur 7a viser bygningen og figur 7b viser orientering på bygningen.



(a) Bygning fra nordøst [52]



(b) Orientering på bygning

Figur 7 Vestre Rosten 69 (referansebygning)

Figur 7a viser at bygningen består av seks etasjer. Nederste kjelleretasje består av en underliggende parkeringsplass. Neste etasje består både av en kjelleretasje, som er en underliggende parkeringsplass, og en sokkeletasje som hovedsakelig består av kantine. Første til fjerde etasje består av cellekontor, kontorlandskap og møterom. I tillegg består bygningen av fellesareal, toaletter, dusj, korridor, kjøkken, trapp, heis, tekniske rom og andre forefallende rom. Figur 7b viser at bygningen er delt inn i fire bygningsdeler; A_{vest} , $A_{øst}$, B_{vest} og $B_{øst}$.

I Trondheim er dimensjonerende utetemperatur -19°C . Tabell 7 viser U-verdier for bygningen.

Tabell 7 U-verdier for referansebygningen

Varmetapspost	U-verdi [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
Yttervegg	0,18
Vindu	0,80
Dør/port	1,20
Yttertak	0,13
Gulv på grunn	0,15
Flate mot sone	0,15

Tabell 7 viser at U-verdiene er under eller lik maksimumkravet gitt i tabell 1.

4.2 Energiforsyning

Energiforsyningssystemene som leverer oppvarming og kjøling til bygningen er varmepumpe og fjernvarme. Det er også enkelte andre installasjoner. Systemskjemaet er gitt i vedlegg A.

4.2.1 Varmepumpe

Bygningen har en reversibel luft-til-vann varmepumpe. Ved vinterdrift dekker varmepumpen grunnlasten for romoppvarming via ventilasjon, og ved sommerdrift dekker varmepumpen romkjøling via ventilasjon. Tabell 8 viser informasjon om varmepumpen.

Tabell 8 Informasjon om varmepumpen

Parameter	Dimensjonering	Kommentar
Varmekilde/-sluk	Luft	Uteluft
Arbeidsmedium	R410A	HFK (Hydrofluorkarboner)
Varme-/kjølebehov	Vann	Til varme-/kjølebatteri
Kompressortype	Scroll	4 stykker
Varmekapasitet (vinterdrift)	281 kW	Ved +7°C utetemperatur
Varmekapasitet (vinterdrift)	188 kW	Ved -10°C utetemperatur
Tilførselstemperatur (vinterdrift)	45°C	Maksimalt settpunkt
Volum til akkumuleringstanker	2 x 1000 L	Utløp av kondensatoren
Kapasitet til varmeveksler (1)	278 kW	Til romoppvarming/-kjøling
Temperaturgrense drift	-10°C	Utetemperatur

4.2.2 Fjernvarme

For bygningen dekker fjernvarmen topplasten for romoppvarming via ventilasjon ved vinterdrift, og fjernvarmen dekker oppvarming av varmt tappevann hele året. Tabell 9 viser informasjon om fjernvarmen.

Tabell 9 Informasjon om fjernvarmen

Parameter	Dimensjonering	Kommentar
Fjernvarmeselskap	Statkraft Varme	Trondheim
Kapasitet til varmeveksler (2)	725 kW	Til romoppvarming
Kapasitet til varmeveksler (3)	250 kW	Til oppvarming av tappevann
Total kapasitet	925 kW	Til oppvarming av rom og tappevann
Tilførselstemperatur	≈100°C	Primærside
Settpunkt for varmtvann	70°C	Hensyn til legionella

Ved vinterdrift dekker fjernvarmen romoppvarming via ventilasjon dersom varmepumpen er ute av drift på grunn av feil eller servicearbeid. Varmepumpen er uansett ute av drift dersom utetemperaturen er under -10°C fra tabell 8. Fjernvarmen dekker også romoppvarming dersom varmepumpen ikke klarer å opprettholde turtemperaturen på varmestokken mot kalkulert settpunkt.

Andre installasjoner

Andre installasjoner inkluderer aerotempere, luftporter, viftekonvektor og sprinkleranlegg. Ved vinterdrift skal aerotempere opprettholde innnetemperaturen i parkeringene over 5°C, og har en total effekt på 150 kW. Årsaken er at kaldere parkering gir lavere innnetemperatur i vedsideliggende rom i etasjen over. På taket av bygningen er det også installert aerotempere med en total effekt på 5,7 kW. Tre luftporter har en total effekt på 30 kW, og en viftekonvektor har en effekt på 4 kW.

4.3 Energidistribusjon

Termisk energi fra varmpumpe og fjernvarme, og elektrisk energi fra strømmettet, distribueres til rommene i bygningen. Romoppvarming og romkjøling er via ventilasjonsluft.

4.3.1 Ventilasjonssystem

Bygningen har behovsstyring med oppvarming og kjøling via sentraliserte ventilasjonsanlegg, som betyr at varm eller kald luft distribueres til rommene via tilluft fra ventilasjonssystemet. Som tilførselsmetode benyttes omrøringsventilasjon. Systemet har seks ventilasjonsaggregat med roterende varmegjenvinnere, som distribuerer luft til og fra rom med ulik nominell luftmengde, spesifikk vifteeffekt (SFP) og avtrekkstemperatur. Tabell 10 viser informasjon om ventilasjonssystemet.

Tabell 10 Informasjon om ventilasjonssystemet

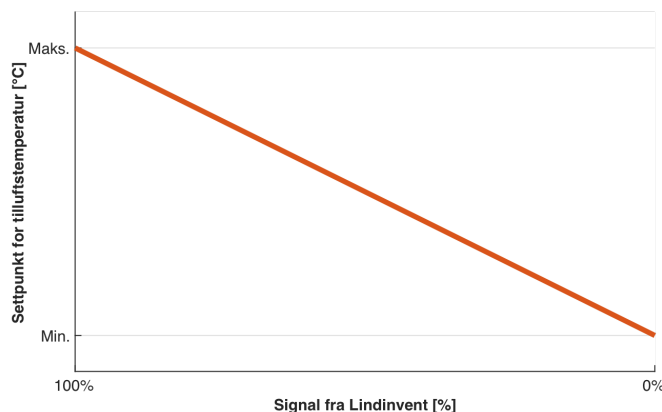
Aggregat	Del	Luftmengde [m ³ /h]	SFP [kW/(m ³ /s)]	Avtrekkstemp. [°C]
AHU1	A _{vest}	16 000	1,57	22
AHU2	A _{øst}	16 000	1,57	22
AHU3	B _{vest}	16 000	1,57	22
AHU4	B _{øst}	16 000	1,57	22
AHU5	A _{sokkel}	12 000	1,57	22
AHU6	A _{sokkel}	6 400	1,50	22

Tabell 10 viser at aggregat AHU1 og AHU2 distribuerer luft til bygningsdel A, aggregat AHU3 og AHU4 distribuerer luft til bygningsdel B og aggregat AHU5 og AHU6 distribuerer luft til sokkel-etasjen. Nominell luftmengde er avhengig av behov i de ulike bygningsdelene. Aggregatene har ikke resirkulering av inneluft.

Tilluftstemperatur

Et ventilasjonsaggregat distribuerer samme tilluftstemperatur til rommene tilkoblet aggregatet, hvor luftmengden tilpasses hvert rom avhengig av varme- eller kjølebehov. Behovet beregnes som et 0-100% signal av romkontrollsystemet Lindinvent, som beskrives i delkapittel 4.4. Ifølge en mailkorrespondanse og møte med GK [53], styres åpningen på tilluftsventilen individuelt i hvert rom. Det samlede behovet for tilluftsventilene tilkoblet samme aggregat bestemmer tilluftstemperaturen. Dersom det er forskjellige behov i rom tilkoblet samme aggregat, vil tilluftstemperaturen va-

riere betydelig over kort tid. For et rom med kjølebehov vil ventilen stenge til minimum så lenge kanaltemperaturen er høyere enn innnetemperaturen. Deretter åpnes ventilen når kanaltemperaturen er lavere enn innnetemperaturen. For et rom med varmebehov skjer det motsatte. Dersom kanaltemperaturen er høyere enn innnetemperaturen åpnes ventilen. Etter hvert vil alle rom nærme seg ønsket innnetemperatur og reguleringen dempes. Med andre ord er settpunktet for tilluftstemperaturen romkompensert, hvor tilluftstemperatur kompenseres i forhold til innnetemperatur. Figur 8 viser settpunktet for tilluftstemperatur som funksjon av signalet fra Lindinvent.



Figur 8 Settpunkt for tilluftstemperatur (romkompensert)

Figur 8 viser at settpunktet for tilluftstemperaturen øker med høyere signal fra Lindinvent, og tilsvarende motsatt. Med andre ord gir Lindinvent signal om høyere eller lavere tilluftstemperatur. Dersom signalet er 0%, vil settpunktet for tilluftstemperaturen tilsvare minimum settpunkt for tilluftstemperatur. Dersom det blir varmebehov og signalet øker fra 0% til 100%, vil settpunktet for tilluftstemperaturen tilsvare maksimum settpunkt for tilluftstemperatur. Tabell 11 viser minimum og maksimum settpunkt for tilluftstemperaturen fra de ulike aggregatene, som tilsvare minimum og maksimum settpunkt i figur 8, samt hvilke soner aggregatene distribuerer luft til.

Tabell 11 Settpunkt for tilluftstemperatur

Aggregat	Sone	Min. settpunkt [°C]	Maks. settpunkt [°C]
AHU1	Kontor/øvrige rom	17	28
	Møterom	17	24
AHU2	Kontor/øvrige rom	17	24
	Møterom	17	24
AHU3	Kontor/øvrige rom	17	28
	Møterom	16	24
AHU4	Kontor/øvrige rom	17	28
	Møterom	16	24
AHU5	Møterom og Kantine	18	28
AHU6	Kjøkken	15	25

Tabell 11 viser at aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 distribuerer luft til kontor/øvrige rom og møterom, og aggregat AHU5 og AHU6 hovedsakelig distribuerer luft til kantine og kjøkken. Flere aggregater har to ulike soner. Dette skyldes større ulikheter mellom interne laster i de to sonene, og det kan både være varme- og kjølebehov på samme tid i hver av disse sonene. Av den grunn blir det enklere å regulere tilluftstemperaturen med to separate soner med ulike interne laster. Tabell 11 viser også at settpunktene på tilluftstemperaturen varierer avhengig av sone.

Drift av ventilasjonsaggregat

Bygningen har fire forskjellige driftmodus for aggregatene. Tabell 12 viser den statiske driftstiden for aggregatene i arbeidsdager, og modusen kalles for "Normal drift UR". Utenfor driftstiden er aggregatene avslått i denne modusen.

Tabell 12 Driftstid i arbeidsdager for ventilasjonsaggregatene

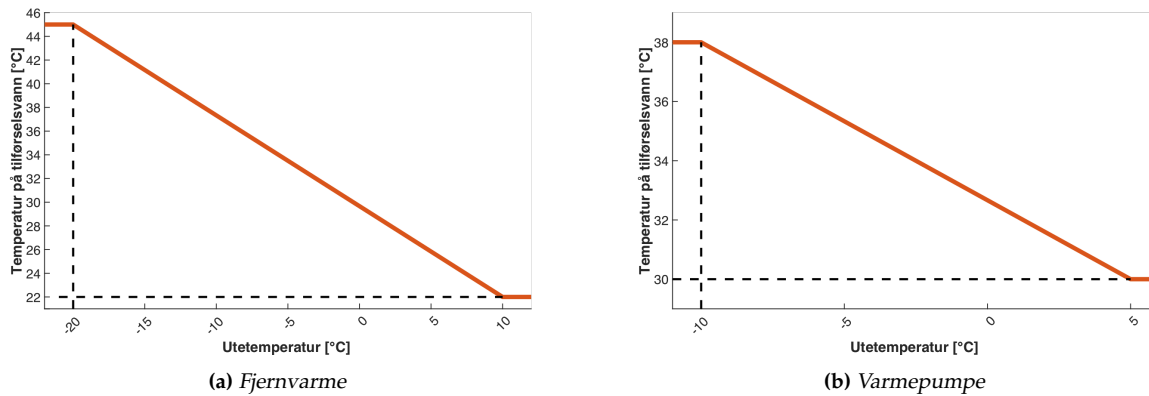
Aggregat	Driftstid i arbeidsdager
AHU1	04.30-16.00
AHU2	04.30-16.00*
AHU3	05.00-15.00
AHU4	05.00-15.00
AHU5	05.00-15.00*
AHU6	06.00-17.00

* På mandager er driftstid for AHU2 03.00-00.00 og for AHU5 05.00-00.00.

For de tre andre driftmodusene er det kriterier for at aggregatene skal starte opp dersom "Normal drift UR" ikke brukes. Disse modusene kalles for "Normal drift", "Oppvarmingsmodus" og "Frikjølingsmodus". "Normal drift" innebærer at aggregatene starter opp dersom tilstedeværelse er høyere enn en grenseverdi. Dersom en sensor i en sone måler at antall personer overskrider fire, fire, fire eller null i henholdsvis AHU1, AHU2, AHU3 eller AHU4, blir det oppstart av gjeldende aggregat uavhengig av om det er utenfor normal driftstid. "Oppvarmingsmodus" innebærer at aggregatene starter opp dersom utetemperaturen er under 5°C ved vinterdrift, og "Frikjølingsmodus" innebærer at aggregatene starter opp dersom utetemperaturen er over 15°C ved sommerdrift.

Vanntemperatur til varmeanlegg

Settpunktet for vanntemperaturen til varmeanlegget er utekompensert, hvor vanntemperatur kompenseres i forhold til utetemperatur. Figur 9 viser vanntemperatur som funksjon av utetemperatur ved vinterdrift, hvor figur 9a viser for fjernvarmen og figur 9b viser for varmepumpen.



Figur 9 Settpunkt for vanntemperatur ved vinterdrift (utekompensert)

Fra figur 9 blir det observert at vanntemperatur reduseres ved økende utetemperatur. Figur 9b viser at varmepumpen er slått av ved utetemperatur lavere enn -10°C , som stemmer med tabell 8. Da fungerer fjernvarmen som topplast for romoppvarming. Fra tabell 8 ser man at maksimum settpunkt for vanntemperatur fra varmepumpen 45°C , og dette er forskjellig fra 38°C i figur 9b. Årsaken er at varmepumpen ikke klarer å levere så høy vanntemperatur ved lav utetemperatur siden ytelsen til varmepumpen avtar med synkende utetemperatur.

Vanntemperatur til kjøleanlegg

For sommerdrift fungerer varmepumpen som kjølemaskin. Settpunktet for vanntemperaturen er mellom 9°C til 14°C , og avhenger av kjølebehovet. Dersom kjølebehovet er 0%, produserer maskinen 14°C . Dersom kjølebehovet er 100%, produserer maskinen 9°C .

4.4 Romkontrollsystem

Romkontrollsystemet som benyttes for bygningen er Lindinvent, som benyttes for behovsstyrt ventilasjon og styring for belysning. Lindinvent har utviklet tilluftsventiler i taket, hvor hver ventil har en bevegelsessensor som gir signal dersom lyset skal slås av og lufttilførselen senkes til minimum. Luftmengden tilpasses antall personer, og ventilene styrer også innetemperaturen for optimalisering av ventilasjonseffektiviteten [54]. Ventilene kan f.eks. gi signal om høyere eller lavere tilluftstemperatur, som beskrevet i underdelkapittel 4.3.1. Brukergrensesnittet til romkontrollsystemet viser rommene i bygningen med tilhørende tilluftsventil og sensor. Innetemperatur, luftmengde, tilstedeværelse og belysning er eksempler på målte parametere. Systemet viser også settpunkter for ulike parametere.

Settpunkt for innetemperatur

Settpunkt for innetemperatur oppgis for hvert rom, og er 23°C ved vinterdrift og 22°C ved sommerdrift. Økonomimodus er definert som når et rom er ledig, og da tillates avvik i settpunktet for

innetemperaturen. Avviket er avhengig av plassering og bruk av rommet, og kan endres for hvert rom. Avviket er grovt satt til 0°C for tekniske rom, $0,5^{\circ}\text{C}$ for ytre kontor og 1°C for indre kontor i denne oppgaven. Ytre kontor er rom med overflater mot utsiden, mens indre kontor er rom med vedsideliggende rom.

Settpunkt for luftmengde

Settpunkt for minimum og maksimum settpunkt for luftmengde oppgis også for hvert rom, og avhenger av forurensninger og emisjoner som ble beskrevet i delkapittel 2.5. Settpunktet for luftmengde settes for hvert rom.

Tilstedeværelse og belysning

Systemet måler tilstedeværelse og belysning i hvert rom ved bruk av binære sensorer, hvor signalet 1 betyr tilstedeværelse/lys på og signalet 0 betyr fravær/lys av. Av den grunn gir ikke sensorene opplysninger om antall personer eller effektbruket til belysning. De binære sensorene benyttes til å beregne samtidighet i delkapittel 5.2.

4.5 IDA ICE modell

Fra en tidligere studie er det utviklet en IDA ICE modell av bygningen. Denne modellen ble kalibrert ved å bruke grenseverdier fra ASHRAE for gjennomsnittlig avvik og gjennomsnittlig varians mellom simulerte og målte timesverdier for romoppvarming. Den kalibrerte modellen nådde grenseverdiene, og ble dermed vurdert som tilstrekkelig for analyse av romoppvarming. Denne modellen blir kalt for *Kalibrert* i denne oppgaven. I denne oppgaven er bare sammenlikning av simulert og målt varighetskurve for romoppvarming presentert og analysert.

Oppbygning av modell

Oppbygningen av den kalibrerte modellen er forenklet ved å dele inn i bygningsdelene A_{vest} , $A_{øst}$, B_{vest} og $B_{øst}$, samt at det benyttes multiplikasjon av flere nesten identiske soner. Tabell 13 viser oppbygningen av den kalibrerte modellen. I vedlegg C viser figur 104 bygningen i IDA ICE.

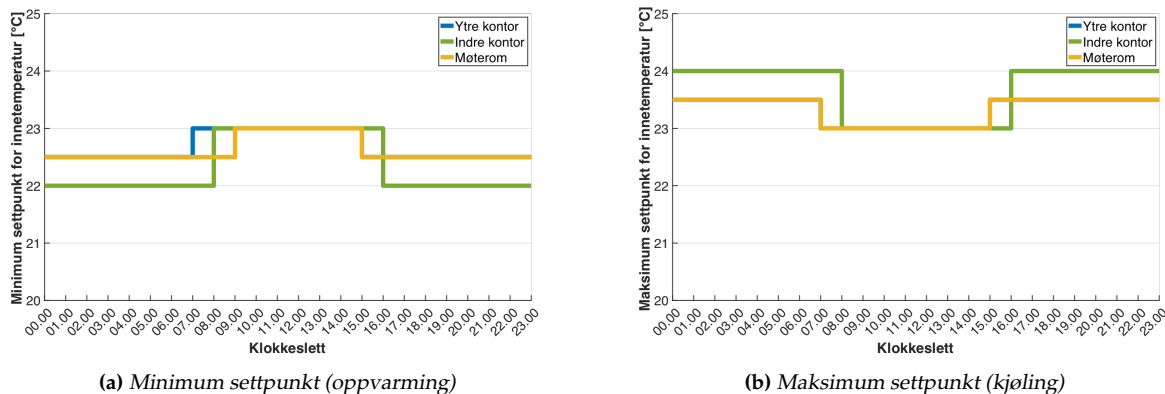
Tabell 13 Oppbygning av kalibrert modell

Type sone	Antall soner	Totalt areal [m ²]
Indre kontor	81	1013
Ytre kontor	291	3780
Møterom	17	1221
Korridor	14	2022
Toalett/diverse	19	264
Kantine	1	371
Parkeringsplass	2	6123
Totalt	425	14794

Tabell 13 viser at det er 425 soner totalt, og at totalt areal er 14794 m².

Settpunkt for innetemperatur

Settpunkt for minimum og maksimum innetemperatur er forenklet ved å dele inn i tre romtyper; ytre kontor, indre kontor og møterom. Ytre kontor har overflater mot utsiden, indre kontor har vedsideliggende rom og møterom har høyere luftmengder. Tabell 13 viser at bygningen består av korridor og toalett/diverse, og disse sonene er definert som ytre eller indre kontor. Når det gjelder kantine og parkering fra tabell 13 har disse egne settpunkter for ulike parametere. Figur 10 viser minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur for de tre romtypene ved vinterdrift i henholdsvis figur 10a og figur 10b.



Figur 10 Settpunkt for innetemperatur ved vinterdrift (Kalibrert modell)

I figur 10a er settpunkt for innetemperatur hevet i tidsrommet 07.00-15.00, 08.00-16.00 og 09.00-15.00 for henholdsvis ytre kontor, indre kontor og møterom. Utenfor disse tidsrommene er settpunkt for innetemperatur lik 22,5°C, 22°C og 22,5°C for henholdsvis ytre kontor, indre kontor og møterom. I figur 10b har ytre kontor og møterom samme settpunkt for maksimum innetemperatur med senket innetemperatur i tidsrommet 07.00-15.00, og indre kontor har senket innetemperatur i tidsrommet 08.00-16.00. Utenfor disse tidsrommene er settpunkt for innetemperatur lik 23,5°C, 24°C og 23,5°C for henholdsvis ytre kontor, indre kontor og møterom. Når det gjelder lørdag og søndag tilsvare minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur det samme settpunktet som det er på natten. Ved sommerdrift er settpunktene for innetemperaturen for vinterdrift snudd på hodet. Vinterdrift og sommerdrift blir definert i tabell 15.

Settpunkt for luftmengde

For minimum og maksimum settpunkt for luftmengde er det gjort en grov estimering. På tilsvarende måte som for settpunkt for innetemperatur, er det delt inn i de samme romtypene, hvor møterom har høyere maksimum settpunkt for luftmengde enn de to andre romtypene. Minimum settpunkt for luftmengde er lik for romtypene. Tabell 14 viser settpunktet for minimum og maksimum luftmengde for romtypene.

Tabell 14 Settpunkt for luftmengde for kalibrert modell

Romtype	Min. luftmengde [L/(s·m ²)]	Maks. luftmengde [L/(s·m ²)]
Indre kontor	0,7	5,0
Ytre kontor	0,7	5,0
Møterom	0,7	6,0

Input-verdier

Tabell 15 viser de mest sentrale input-verdiene i den kalibrerte modellen. I kolonnen input-verdi kan det bli referert til figurer som ikke er presentert enda. Dette er fordi at tabell 15 skal gi en oversikt, og består blant annet av målinger som presenteres i kapittel 5.

Tabell 15 Input-verdier for kalibrert modell

Berørt element	Parameter	Input-verdi
Bygning og uteklima	U-verdier	TEK10 (Tabell 1)
	Kuldebro	0,05 W/m ² K
	Lekkasjetall	0,15 h ⁻¹
	Trykkoeffisienter	Default
	Utetemperatur	Målt (se figur 15a)
Energiforsyning	Romoppvarming og tappevann	Fjernvarme
	Aerotempere (parkering)	150 kW
	Romkjøling	Fjernkjøling
Energidistribusjon (ventilasjon)	Settpunkt for tilluftstemperatur	Målt (se figur 15b)
	Type ventilasjon (for de fleste rom)	VAV
	Regulering (for de fleste rom)	Temperatur og CO ₂ -nivå
	Vanntemperatur til varmeanlegg	Figur 9
	Antall ventilasjonsaggregater	6
	Aggregat statisk drift	Tabell 12
	Aggregat oppstart	Utetemperatur < 5°C
	Aggregat oppstart	Utetemperatur > 20 °C
	Aggregat oppstart	Tilstedeværelse
Varmegjenvinner effektivitet	80%	
Romkontrollsystem	Settpunkt for innetemperatur	Figur 10
	Settpunkt for luftmengde	Tabell 14
	Settpunkt for CO ₂ -nivå	[700, 1100] ppm
Drift	Vinterdrift	15. september - 15. mai
	Sommerdrift	15. mai - 15. september
Tidsplaner	Personer	Estimert (se figur 101)
	Belysning	Estimert (se figur 102)
	Teknisk utstyr	Estimert (se figur 103)
	Tappevann	Estimert (se avsnitt under)
	Åpne innvendige dører	07.00-17.00
	Åpne utvendige dører	Følger personer-tidsplanen

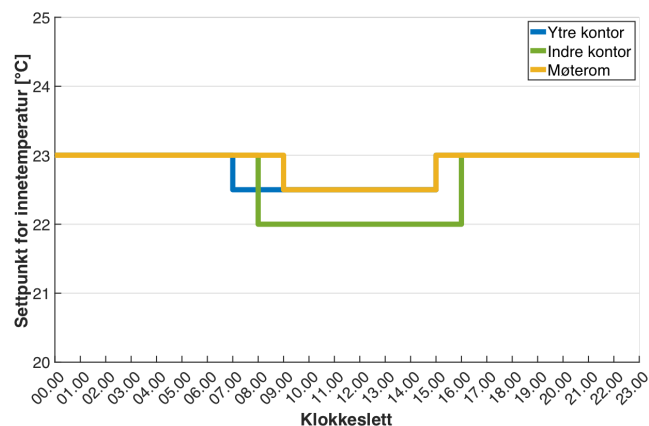
Tabell 15 viser at fjernvarme er den eneste energiforsyningen til romoppvarming, og dette betyr at varmpumpen ikke er inkludert i modellen. Settpunkt for tilluftstemperatur er lik for de fire bygningsdelene. Aggregatene følger den statiske tidsplanen, men det vil bli oppstart av aggregatene dersom innetemperaturen er mindre enn 5°C, dersom innetemperaturen er større enn 20°C og/eller dersom det er tilstedeværelse i et rom tilkoblet aggregatet. Det er antatt passende antall personer i hvert rom, og at forbruket av varmt tappevann er lavt i kontorbygningen.

4.6 Scenarier for reduksjon av effekttopper for kald dag

Reduksjon av effekttopper er tiltak som reduserer belastningen i nettet ved å påvirke lasten, og i denne oppgaven studeres indikatorene Load Shifting og Peak Load Reduction fra delkapittel 2.10. Det er utviklet tre scenarier for reduksjon av effekttopper for den kalde dagen, og scenarioene fokuserer på styring av ventilasjon. Dette gjøres ved å endre ulike parametere i den kalibrerte modellen for de ulike scenarioene. Ved styring av ventilasjon er temperatur, luftmengde og drift aktuelle parametere. Scenarioene består av å analysere den kalde dagen for å se hva som skjer med ventilasjonsvarme, pumper og vifter og inneklime ved reduksjon av effekttopper for ventilasjonsvarme. Det vil også bli sett på kostnadsbesparelser for de ulike scenarioene.

Scenario 1

Flere kontorbygninger reduserer settpunktet for innnetemperaturen på natten. Ved maksimal oppvarming på starten av arbeidsdagen, vil dette føre til en typisk effekttopp. For de kaldeste dagene kan denne effekttoppen reduseres ved å øke settpunktet for innnetemperaturen på natten. På bakgrunn av dette er scenario 1 utviklet for å redusere effekttoppen for ventilasjonsvarme. Figur 11 viser minimum settpunkt for innnetemperaturen for scenario 1 for de tre romtypene.

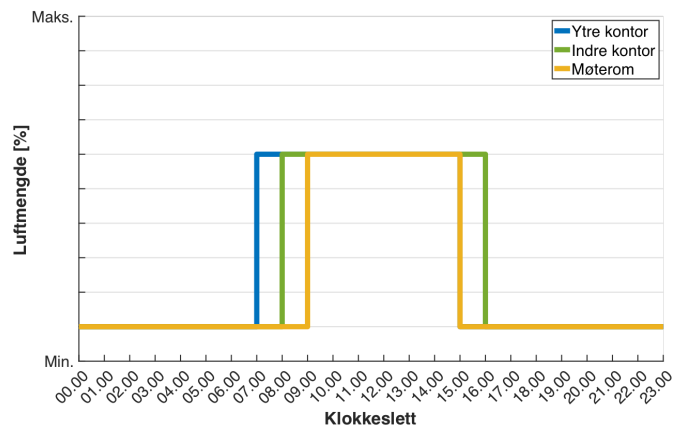


Figur 11 Minimum settpunkt for innnetemperatur (Scenario 1)

Figur 11 viser at settpunktet for innnetemperaturen er senket på dagen og hevet om natten, hvor settpunktet er endret ved å snu settpunktet fra kalibrert modell i figur 10. Det er senket settpunkt for innnetemperatur i tidsrommet 07.00-15.00, 08.00-16.00 og 09.00-15.00 for henholdsvis ytre kontor, indre kontor og møterom. Utenfor disse tidsrommene er settpunkt for innnetemperatur lik 23°C for alle romtypene. I tillegg inkluderer scenario 1 å stabilisere utetemperatur til $-10,5^{\circ}\text{C}$, som er gjennomsnittlig utetemperatur den kalde dagen. Videre er tilluftstemperaturen stabilisert til $24,4^{\circ}\text{C}$, som er gjennomsnittlig tilluftstemperatur den kalde dagen. Dermed blir det lettere å se hvordan en endring i settpunkt for innnetemperatur påvirker effekttoppen for ventilasjonsvarmen.

Scenario 2

Scenario 2 innebærer å senke maksimum settpunkt for luftmengde på dagen og heve minimum settpunkt for luftmengde på natten for å redusere effekttoppen for ventilasjonsvarme. Med andre ord er det ikke maksimum luftmengde på dagen og minimum luftmengde på natten. Figur 12 viser settpunktet for luftmengdene for scenario 2 for de tre romtypene.

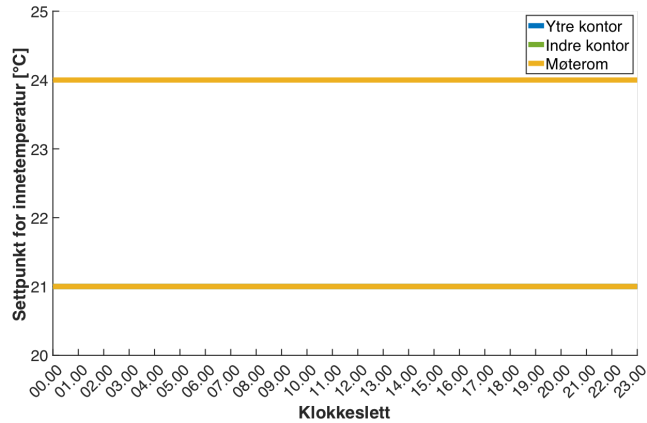


Figur 12 Settpunkt for luftmengde (Scenario 2)

Figur 12 viser at settpunktet for luftmengdene er senket fra maksimum på dagen og hevet fra minimum på natten. Dermed er settpunktene for luftmengde endret fra kalibrert modell i tabell 14. Det er senket settpunkt for luftmengde i tidsrommet 07.00-15.00, 08.00-16.00 og 09.00-15.00 for henholdsvis ytre kontor, indre kontor og møterom. Utenfor disse tidsrommene er settpunkt for luftmengde økt fra minimum for alle romtypene.

Scenario 3

Scenario 3 innebærer å redusere minimum settpunkt for innetemperaturen til 21°C og øke maksimum settpunkt for innetemperaturen til 24°C for alle romtypene. Dermed kan det studeres hvordan en endring i settpunktet for innetemperaturen påvirker effektreduksjon av ventilasjonsvarme. Figur 13 viser settpunktet for minimum og maksimum innetemperatur for de tre romtypene.

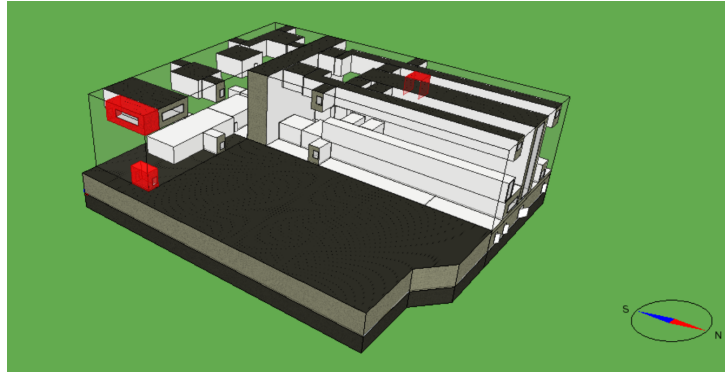


Figur 13 Minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur (Scenario 3)

Figur 13 viser at minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur er konstant for romtypene.

Inneklima for utsatte rom

Energi- og effektreduksjon kan ikke gå på bekostning av inneklima. Det er valgt å studere inneklimaet for tre spesifiserte utsatte rom. Figur 14 viser et spesifisert rom innenfor hver av romtypene; ytre kontor, indre kontor og møterom. De spesifiserte rommene er markert i rødt i figur 14.



Figur 14 Spesifisert ytre kontor, indre kontor og møterom (markert i rødt)

Spesifisert ytre kontor er et hjørnekontor og spesifisert møterom er et hjørne-møterom, og begge rommene er vendt mot nordøst i bygningsdel B. Spesifisert indre kontor er et kontor i bygningsdel A. Ytre kontor har to overflater som grenser mot utsiden, grenser mot kald parkering og har et vindu mot nord. Dermed kan personer oppleve lave innetemperaturer på kalde dager i dette rommet. Møterommet har også overflater som grenser mot utsiden og har et vindu mot vest, men møterommet vil til tider ha flere personer i rommet. Indre kontor har vedsideliggende rom, og personer kan oppleve høye innetemperaturer. Det indre kontoret blir betraktet som et indre kontor, men taket grenser egentlig mot utsiden. Innetemperatur og luftmengde er to av mange faktorer som beskriver luftkvaliteten, og det er disse faktorene det er fokus på i denne oppgaven.

4.7 Scenarier for reduksjon av effekttopper for året

Det er utviklet nye scenarier for effektreduksjon av ventilasjonsvarme for året, da scenarioene for en bestemt dag ikke nødvendigvis gir effektreduksjon for hele året på samme måte. Igjen er den kalibrerte modellen referansen for effektreduksjon, og ulike parametere endres i forhold til den kalibrerte modellen for de ulike scenarioene. På bakgrunn av at tilluftstemperaturen ikke styres på en hensiktsmessig måte i den kalibrerte modellen, som vil bli diskutert i kapittel 6, er scenarioene enkle for hele året. Det er likevel viktig å se om referansebygningen har potensial for effektreduksjon av ventilasjonsvarme, og av den grunn er det fordelaktig å la kalibrert modell være referanse for effektreduksjon. Dette skyldes at kalibrert modell er kalibrert ved å sammenlikne simulert og reell romoppvarming. Scenarioene består av å analysere hele året for å se hva som skjer med ventilasjonsvarme, pumper og vifter og inn klima ved reduksjon av effekttopper for ventilasjonsvarme. Det vil også bli sett på kostnadsbesparelser for de ulike scenarioene.

Scenario 1 - Forskjøvet profil for tilluftstemperatur

Scenario 1 er basert på å forskyve daglig profil av tilluftstemperaturen i kalibrert modell for vintermånedene januar, februar, mars, november og desember. Profilen er gjennomsnittet av tilluftstemperatur for hver time i en bestemt måned, og det skilles mellom arbeidsdag og helg. Det er valgt å ha gjennomsnittet av temperaturen, slik at ikke eventuell effektreduksjon av ventilasjonsvarme skyldes redusert tilluftstemperatur, men bedre styring. Profil av tilluftstemperaturen vil analyseres i underdelkapittel 5.10.5, og dette scenarioet vil i større grad bli presentert i delkapittel 5.11. Dette skyldes at scenarioet er utviklet for å se hvilken forskjøvet profil av tilluftstemperaturen som gir størst effektreduksjon av ventilasjonsvarmen. Scenario 1 er med andre ord basert på resultater.

Scenario 2 - Endret tilluftstemperatur ved lav utetemperatur

Generelt øker energibruk for ventilasjonsvarmen ved lavere utetemperatur. Effekttoppen for ventilasjonsvarmen øker kraftig ved en kraftig økning i settpunktet for tilluftstemperaturen. Dersom settpunktet for innnetemperaturen er nådd, vil effekten for ventilasjonsvarmen reduseres selv om tilluftstemperaturen er høy. Dersom settpunktet for innnetemperaturen ikke er nådd, vil effekten for ventilasjonsvarmen øke igjen. Resultater fra underdelkapittel 5.10.5 viser at den kalibrerte modellen har en større økning i tilluftstemperaturen på morgenen.

På bakgrunn av dette er scenario 2 utviklet ved å la tilluftstemperaturen ha redusert økning i settpunktet. Scenario 2 er basert på en analyse i underdelkapittel 5.10.5 av når på dagen effekttoppen for ventilasjonsvarme inntreffer og når på dagen høyeste tilluftstemperatur inntreffer. Det viser seg at effekttoppen for ventilasjonsvarmen har en tidsforsinkelse i forhold til høyeste tilluftstemperatur. Av den grunn reduseres tilluftstemperaturen i perioden mellom høyeste tilluftstemperatur til effekttoppen for ventilasjonsvarmen i scenario 2. For å kompensere for lavere tilluftstemperatur i denne perioden, er tilluftstemperaturen økt på starten og slutten av dagen med tilsvarende antall

grader celsius som er redusert i beskrevet periode. Scenario 2 studerer kun de kaldeste dagene i løpet av året, og baserer seg på å finne et mønster for tilluftstemperaturen som passer for hver av vinter-månedene januar, februar, mars, november og desember. Dermed er scenario 2 et prøv-og-feil scenario, men det ønskes å legge vekt på ulempen med større økninger i tilluftstemperaturen. I vedlegg H viser tabell 35 hvordan tilluftstemperaturen er økt og redusert i forhold til den kalibrerte modellen, og vedlegget gir også de kaldeste dagene i vinter-månedene.

Scenario 3 - Minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur lik 21°C og 24°C

Scenario 3 er å ha konstant minimum settpunkt for innetemperatur lik 21°C, og konstant maksimum settpunkt for innetemperatur lik 24°C. Dermed er scenario 3 for hele året det samme som scenario 3 for den kalde dagen. Scenario 3 er utviklet for å studere hvordan settpunkt for innetemperaturen påvirker ventilasjonsvarmen. I scenarioet er minimum settpunkt for innetemperatur lavere enn kalibrert modell, og maksimum settpunkt for innetemperatur er høyere.

Scenario 4 - Redusert maksimum settpunkt for luftmengde

Scenario 4 er å redusere maksimum settpunkt for luftmengden. Dette scenarioet er utviklet på bakgrunn av at den reelle bygningen har lavere luftmengder enn den kalibrerte modellen, og dette presenteres i underdelkapittel 5.10.6. I den kalibrerte modellen er minimum og maksimum settpunkt for luftmengde gitt i tabell 14. I scenario 4 reduseres maksimum settpunkt for ytre kontor til 3 L/(s·m²), indre kontor til 2,8 L/(s·m²) og møterom til 3,2 L/(s·m²). Som en forenkling har scenario 4 redusert maksimum settpunkt for luftmengde til 3 L/(s·m²).

Scenario 5 - Return air temperature control

På bakgrunn av at den kalibrerte modellen ikke har en hensiktsmessig måte å styre tilluftstemperaturen på, er scenario 5 utviklet. Dette scenarioet regulerer tilluftstemperaturen mellom minimum og maksimum settpunkt for tilluftstemperaturen for å oppnå et settpunkt for returtemperaturen i ventilasjonsaggregatene. Minimum og maksimum settpunkt for tilluftstemperaturen for de ulike aggregatene som brukes i dette scenarioet er settpunktene fra tabell 11. Settpunktet for returtemperaturen er satt til 22°C for varmebatteriet og 23°C for kjølebatteriet.

Scenario 5 er delt inn i tre delscenarier; scenario 5.1, scenario 5.2 og scenario 5.3. Scenario 5.1 inkluderer kun endringen i hvordan tilluftstemperaturen reguleres, sammenliknet med den kalibrerte modellen. Scenario 5.2 har både endringen i hvordan tilluftstemperaturen reguleres, i tillegg til at minimum og maksimum settpunkt for innetemperaturen er endret til henholdsvis 21°C og 24°C. Scenario 5.3 har både endringen i hvordan tilluftstemperaturen reguleres, i tillegg til at VAV temperatur- og CO₂-reguleringen i den kalibrerte modellen er endret til VAV CO₂-regulering.

5 Resultater

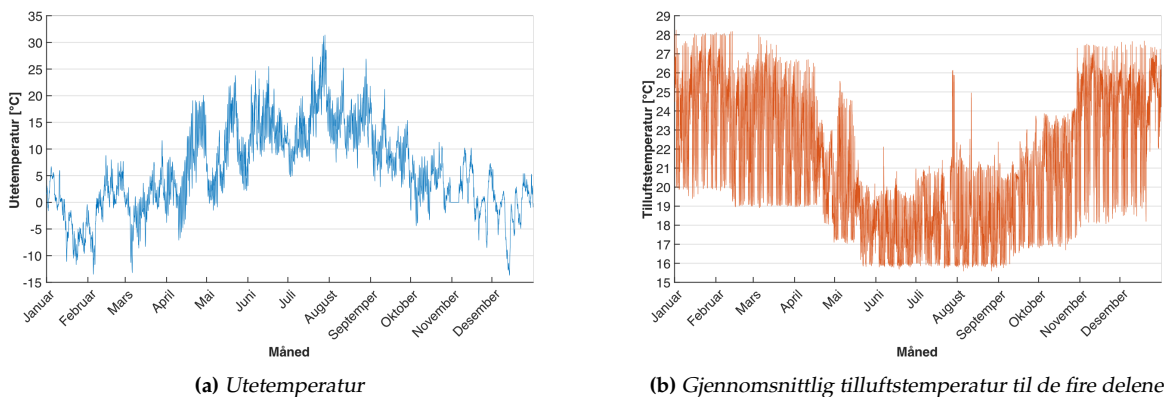
I dette kapitlet vil resultater for referansebygningen fra kapittel 4 presenteres og analyseres. Resultatene består både av målinger fra referansebygningen og simuleringer av en modell av referansebygningen i IDA ICE. Kapitlet er delt inn i tre deler: analyse av målte og simulerte resultater, analyse av kald dag og årlig analyse.

Del I Analyse av målte og simulerte resultater

I første del av resultatkapitlet vil målinger av utetemperatur, tilluftstemperatur og interne laster presenteres, da disse målingene brukes som input-verdier i kalibrert modell. Videre vil målinger for energi- og effektbruk for varmepumpe, fjernvarme og varmt tappevann presenteres og analyseres, slik at energi- og effektbruk for romoppvarming kan bli funnet. Dette skyldes at den kalibrerte modellen er kalibrert ved å sammenlikne målt og simulert romoppvarming. Til slutt vil målinger av innetemperatur, luftmengde og spesifikk vifteeffekt presenteres og analyseres.

5.1 Målinger av utetemperatur og tilluftstemperatur

Målt utetemperatur og målt tilluftstemperatur brukes som input-verdier i kalibrert modell fra tabell 15. Figur 15 viser disse temperaturene, hvor figur 15a viser utetemperaturen i Trondheim i 2019 og figur 15b viser målt gjennomsnittlig tilluftstemperatur fra ventilasjonsaggregatene til de fire delene i bygningen i 2019.



Figur 15 Målinger av utetemperatur og tilluftstemperatur for 2019

Figur 15 viser at det ved lav utetemperatur er høy tilluftstemperatur, og dette skyldes at ventilasjonsvarmen er temperaturavhengig. En analyse av tilluftstemperaturen er gjort i delkapittel 5.10.

5.2 Målinger for interne laster

Målinger for interne laster brukes også som input-verdier i kalibrert modell fra tabell 15. Interne laster er personer, belysning og teknisk utstyr.

Personer og belysning

Som beskrevet i delkapittel 4.4, måles tilstedeværelse og belysning binært i hvert rom. Samtidigheten for hver av bygningsdelene A_{vest} , $A_{øst}$, B_{vest} og $B_{øst}$ beregnes ved å ta gjennomsnittet av rommene i en bestemt bygningsdel for hver time. En samtidighet for tilstedeværelse på 100% i en bygningsdel, betyr at det er personer i alle rom i denne delen. En samtidighet for belysning på 100% i en bygningsdel, betyr at det er lys på i alle rom i denne delen.

Teknisk utstyr

For teknisk utstyr finnes det bare målinger for total effekt for teknisk utstyr og belysning. Av den grunn er det nødvendig å beregne samtidigheten til teknisk utstyr, hvor samtidigheten er avhengig av den totale effekten for teknisk utstyr og belysning, samt samtidigheten for belysning. Likning 10 viser effekten for teknisk utstyr, og likning 11 viser den spesifikke effekten for teknisk utstyr.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{tekniskutstyr} &= \dot{Q}_{tekniskutstyr,belysning} - \dot{Q}_{belysning} \\ &= \dot{Q}_{tekniskutstyr,belysning} - \dot{q}_{belysning} \cdot A_{belysning} \cdot s_{belysning} [W],\end{aligned}\quad (10)$$

$$\dot{q}_{tekniskutstyr} = \frac{\dot{Q}_{tekniskutstyr,belysning} - \dot{q}_{belysning} \cdot A_{belysning} \cdot s_{belysning}}{A_{tekniskutstyr}} [W/m^2], \quad (11)$$

hvor

$\dot{Q}_{tekniskutstyr}$ er effekt for teknisk utstyr [W]

$\dot{Q}_{tekniskutstyr,belysning}$ er samlet målt effekt for teknisk utstyr og belysning [W]

$\dot{Q}_{belysning}$ er effekt for belysning [W]

$\dot{q}_{belysning}$ er spesifikk effekt for belysning [W/m^2]. Det er antatt at denne er $5 W/m^2$.

$A_{belysning}$ er totalt gulvareal for belysning [m^2]

$s_{belysning}$ er samtidighet for belysning [-]

$\dot{q}_{tekniskutstyr}$ er spesifikk effekt for teknisk utstyr [W/m^2]

$A_{tekniskutstyr}$ er totalt gulvareal for teknisk utstyr [m^2]

Likning 12 viser samtidighet for teknisk utstyr.

$$s_{tekniskutstyr} = \frac{\dot{q}_{tekniskutstyr}}{\dot{q}_{tekniskutstyr,maks}} [-], \quad (12)$$

hvor

$s_{\text{tekniskutstyr}}$ er samtidighet for teknisk utstyr [-]

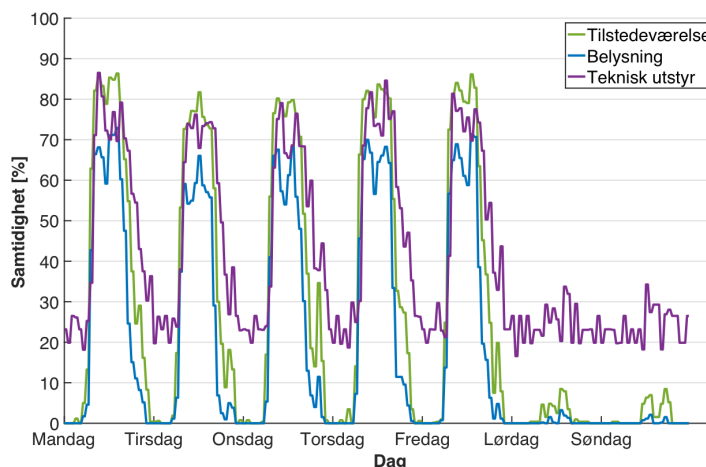
$\dot{q}_{\text{tekniskutstyr}}$ er beregnet spesifikk effekt for teknisk utstyr [W/m^2]

$\dot{q}_{\text{tekniskutstyr,maxs}}$ er maksimal beregnet spesifikk effekt for teknisk utstyr [W/m^2]

Samtidigheten for teknisk utstyr i bygningsdelene A_{vest} , $A_{\text{øst}}$, B_{vest} og $B_{\text{øst}}$ beregnes for hver time ved å bruke likning 10, likning 11 og likning 12. En samtidighet for teknisk utstyr på 100% i en bygningsdel, betyr at teknisk utstyr er på i alle rom i denne delen.

Interne laster

Figur 16 viser et eksempel på gjennomsnittlig samtidighet for tilstedeværelse, belysning og teknisk utstyr for bygningsdel A_{vest} for uke 6 i 2019.



Figur 16 Gjennomsnittlig samtidighet for interne laster for del A_{vest} (04.02.19-10.02.19)

Figur 16 viser at samtidigheten for tilstedeværelse, belysning og teknisk utstyr er størst i arbeidsdager, samt at teknisk utstyr er i standby i helgene. Tabell 16 viser maksimal gjennomsnittlig samtidighet for interne laster for 2019.

Tabell 16 Maksimal gjennomsnittlig samtidighet for interne laster for 2019

Del	Tilstedeværelse [%]	Belysning [%]	Teknisk utstyr [%]
A_{vest}	79	90	100
$A_{\text{øst}}$	77	90	100
B_{vest}	61	79	100
$B_{\text{øst}}$	77	90	100

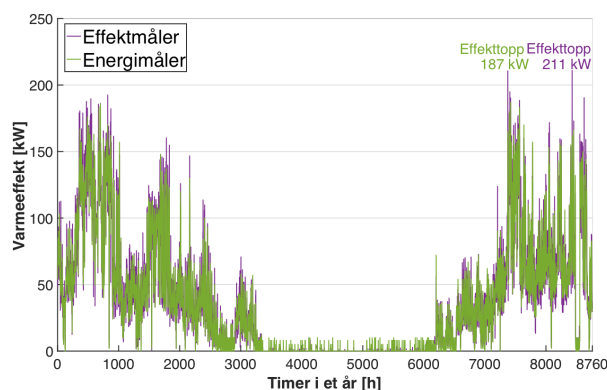
Tabell 16 viser at det ikke er personer i alle rom i en bygningsdel i løpet av året, som også er naturlig. Det samme gjelder for belysning. For teknisk utstyr er det timer i året hvor alt teknisk utstyr er på i hver av bygningsdelene. Vedlegg B gir tidsplaner for personer, belysning og teknisk utstyr i løpet av året, som brukes som input i den kalibrerte modellen.

5.3 Målinger for varmepumpe, fjernvarme og varmt tappevann

Målinger for varmepumpe, fjernvarme og varmt tappevann inkluderer energi- og effektbruk for referansebygningen for 2019, hvor energimålingene er gjort om til enheten kW ved å subtrahere energiverdien for gjeldende time med energiverdien fra forrige time.

Varmepumpe

Figur 17 viser timesvise energi- og effektmålinger for varmepumpen i 2019.

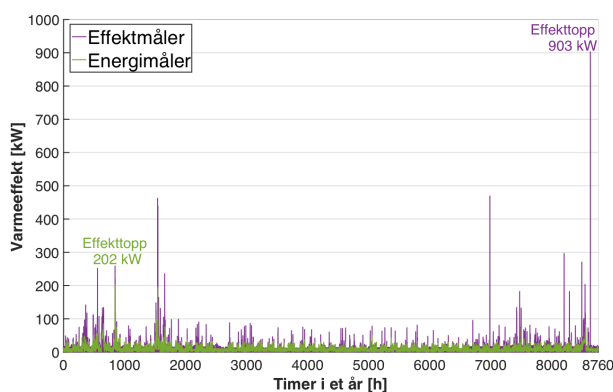


Figur 17 Målinger av varmepumpe for 2019

Figur 17 inkluderer bare varmeeffekten for varmepumpen, og ikke kjøleeffekten. Av den grunn er det lite forbruk om sommeren. Det er størst forbruk om vinteren, som også er naturlig. Kurvene for de ulike målerne sammenfaller i stor grad, som betyr at energi- og effektmåleren måler relativt likt energibruk i løpet av året. For energimåleren er effekttoppen 187 kW, og for effektmåleren er effekttoppen 211 kW. Hvorfor målingene avviker er ikke betraktet i oppgaven.

Fjernvarme

Figur 18 viser timesvise energi- og effektmålinger for fjernvarme i 2019.



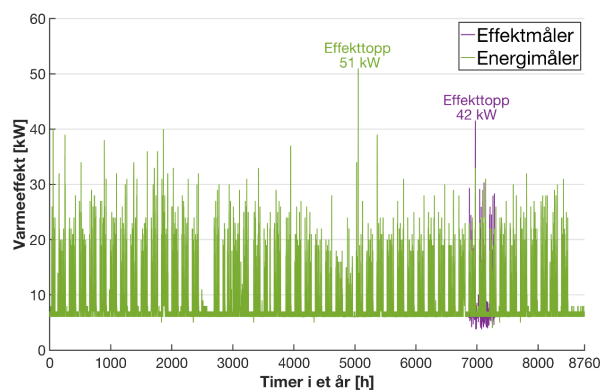
Figur 18 Målinger av fjernvarme for 2019

Figur 18 viser at forbruket av fjernvarme er relativt konstant i store deler av året med større forbruk i enkelte timer, og dette gjelder for begge målerne. Årsaken er at fjernvarmen dekker oppvarming av varmt tappevann, som er relativt konstant store deler av året, og topplasten for romoppvarming som har større forbruk i enkelte timer om vinteren ved behov. Energimåleren viser en effekttopp på 202 kW, mens effektmåleren viser en betydelig effekttopp på 903 kW. Avviket mellom målerne betraktes ikke i denne oppgaven, men effekttoppene vil likevel bli betraktet.

Den høye effekttoppen for effektmåleren kan skyldes hvordan dataoverføringen skjer fra måler til SD-anlegg. Ifølge GK [55] blir data overført jevnlige fra målerne til SD-anlegget, men det er uvisst hvor hyppig overføringen skjer. Målingene kan være basert på hendelse, og det kan f.eks. være at den høye effekttoppen kun hadde en varighet på 15 minutter i løpet av den gjeldende timen. Effektleddet i fjernvarmetariffer avregnes etter den høyeste timesverdien for effekt. Av den grunn blir spørsmålet hvilken effektverdi som skal benyttes dersom effekttoppen kun hadde en varighet på 15 minutter. Ifølge Statkraft Varme [23] benyttes gjennomsnittlig effekt i den gjeldende timen for beregning av effektleddet. Dermed må det tas hensyn til hvor hyppig dataoverføringen skjer ved beregning av effektleddet i fjernvarmetariffen, slik at effekttoppen tilsvarer gjennomsnittlig effekt i løpet av en time.

Varmt tappevann

Figur 19 viser energi- og effektmålinger for varmt tappevann i 2019.

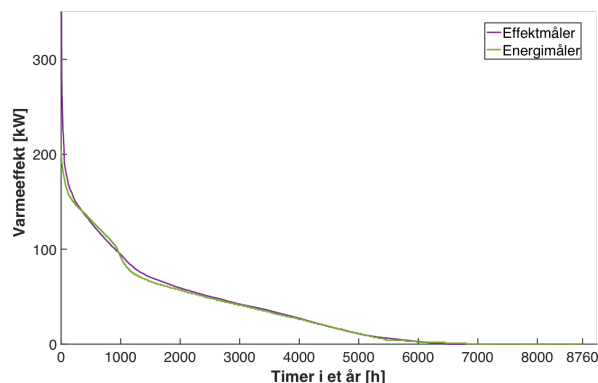


Figur 19 Målinger av varmt tappevann for 2019

Figur 19 viser at effektmålingene for varmt tappevann mangler store deler av året. For energimåleren kan det tidligere beskrevne konstante forbruket av varmt tappevann i løpet av året observeres, men det er likevel tre perioder med betydelig mindre forbruk av varmt tappevann. Dette er perioder rundt 2500 timer, 4800 timer og 8600 timer, som tilsvarer påskeferie, sommerferie og juleferie.

Varighetskurve for romoppvarming

Figur 20 viser målt varighetskurve for romoppvarming for 2019. Med andre ord viser figur 20 forbruket dekket av varmepumpen og fjernvarmen, hvor varmt tappevann ikke er inkludert. Det er gjort antakelser om manglende verdier, korrigert misvisende verdier og fjernet negative verdier for varmepumpen som tilsvarer kjøleeffekt.

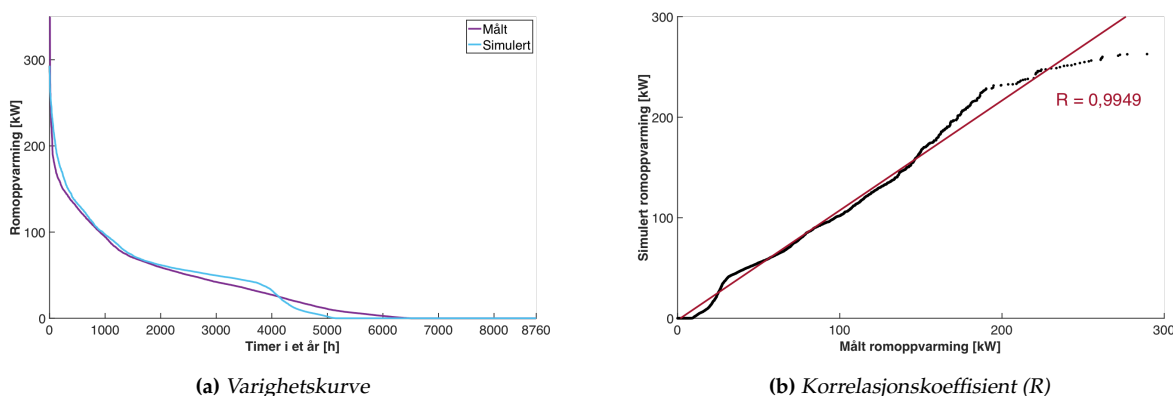


Figur 20 Målinger av romoppvarming for 2019

Figur 20 viser at energi- og effektmåleren gir relativt likt energiforbruk, men effekttoppen er betydelig ulik. Avviket mellom målerne vil ikke analyseres.

5.4 Sammenlikning av målt og simulert romoppvarming

Som beskrevet i delkapittel 4.5, oppnår den kalibrerte modellen grenseverdier fra ASHRAE for gjennomsnittlig avvik og gjennomsnittlig varians mellom simulerte og målte timesverdier for romoppvarming. I denne oppgaven sammenliknes bare simulert og målt varighetskurve for romoppvarming. Dersom kalibrert modell skal benyttes for analyse av romoppvarming, er det nødvendig at disse kurvene samsvarer i stor grad. Figur 21 viser sammenlikning av målt og simulert romoppvarming, hvor figur 21a viser varighetskurve og figur 21b viser korrelasjonskoeffisienten. Simulert romoppvarming er fra kalibrert modell, og målt romoppvarming er fra effektmåleren.



Figur 21 Sammenlikning av målt og simulert romoppvarming

Figur 21a viser at målt og simulert varighetskurve for romoppvarming sammenfaller i stor grad. Årsaken til at varighetskurven for simulert romoppvarming har en brattere kurve rundt 4000h skyldes ventilasjonsvarmen, og vil analyseres i delkapittel 5.10 om årlig analyse av den kalibrerte modellen. Romoppvarmingen består både av ventilasjonsvarmen og aerotemperne i parkering-skjelleren i den kalibrerte modellen. I første omgang skal bare målt og simulert romoppvarming sammenliknes, uten å gå i detalj på den kalibrerte modellen. Figur 21b viser at det er en positiv korrelasjon på 0,9949 mellom målt og simulert romoppvarming. Dermed er det en sterk sammenheng mellom målt og simulert romoppvarming, da en korrelasjon på 1 gir sterkest sammenheng.

Tabell 17 viser energibruk og effekttopp for målt og simulert romoppvarming fra figur 21a.

Tabell 17 Sammenlikning av målt og simulert (kalibrert) romoppvarming

	Energibruk	Effekttopp
Målt	320 MWh	350 kW
Kalibrert	331 MWh	293 kW
Avvik	+3,4%	-16,3%

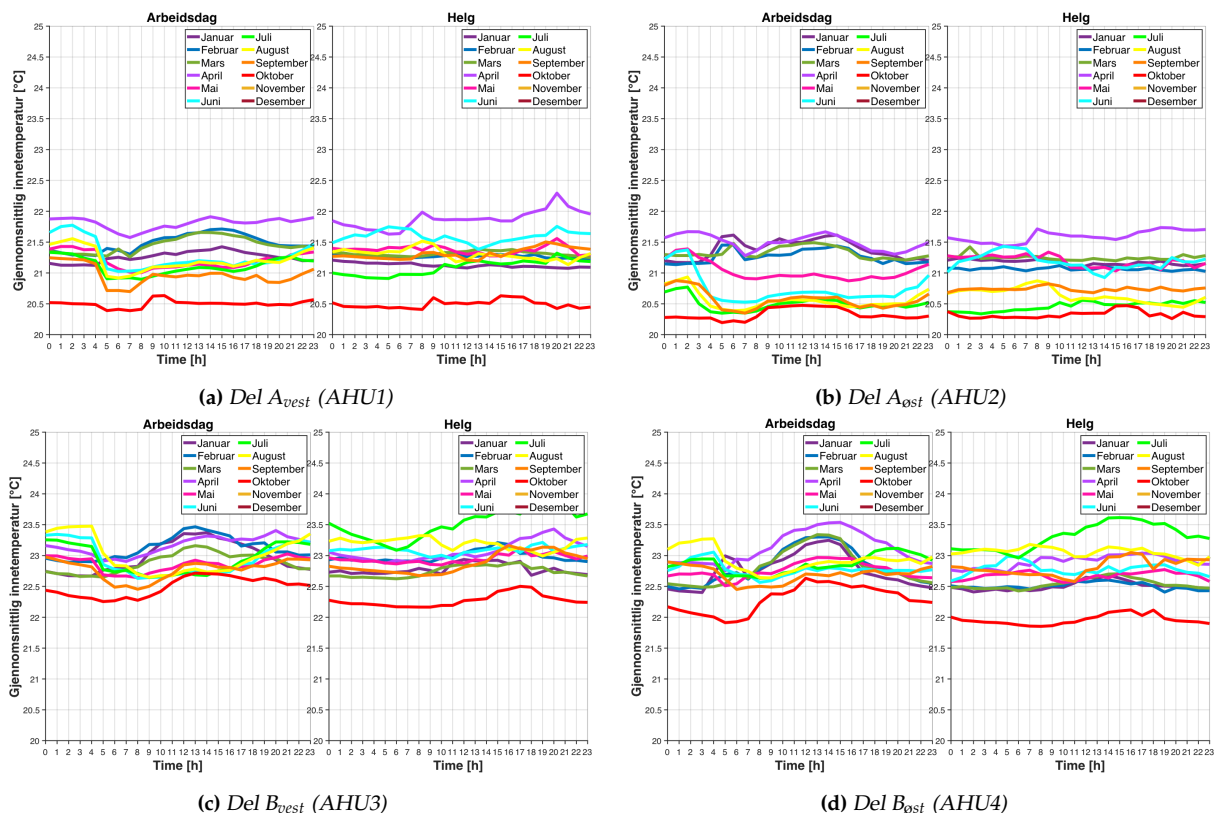
Fra tabell 17 blir det observert at energibruk for romoppvarming for kalibrert modell avviker med +3,4% sammenliknet med målt energibruk. Av den grunn er det godt samsvar mellom simulert og målt energibruk til romoppvarming. Videre viser tabell 17 at effekttoppen for romoppvarming for kalibrert modell avviker med -16,3% sammenliknet med målt effekttopp. Av den grunn er det mindre samsvar mellom simulert og målt effekttopp for romoppvarming. Dette kan også bli sett i figur 21b, hvor de høyeste verdiene har en mindre lineær sammenheng. I delkapittel 5.3 ble det observert ulikheter mellom effekttoppene for de ulike målerne, og dette betyr at målt effekttopp varierer. Likevel blir det betraktet at simulert og målt romoppvarming samsvarer i stor grad. Dermed benyttes kalibrert modell videre i oppgaven for analyse av romoppvarming, eller mer spesifisert ventilasjonsvarme.

5.5 Målinger av innetemperatur og luftmengde

I første del av resultatkapittelet er fokuset å sammenlikne simulert og målt romoppvarming, slik at den kalibrerte modellen kan brukes videre til analyse av romoppvarming. Likevel vil målinger av innetemperatur, luftmengde og spesifikk vifteeffekt presenteres i denne delen, slik at simuleringer av innetemperatur, luftmengde og spesifikk vifteeffekt kan sammenliknes med målingene senere i underdelkapittel 5.10 ved årlig analyse av den kalibrerte modellen.

Figur 22 viser profil av målt gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom, hvor figur 22a og figur 22b viser for del A mens figur 22c og figur 22d viser for del B. Bak figur 22 ligger det både antakelser og beregninger for profilene av innetemperaturen. Det er antatt passende verdier for innetemperaturen dersom enkelte målinger mangler, og det skilles da i hovedsak mellom arbeidsdag og helg da innetemperaturen varierer avhengig av type dag. For månedene november og desem-

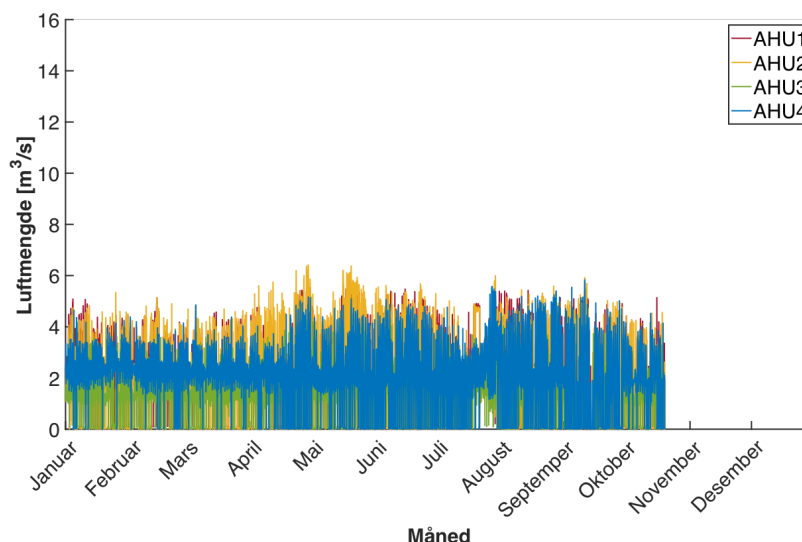
ber mangler alle målingene for 2019, og disse månedene er ikke inkludert. For oktober mangler det målinger på slutten av måneden, og det er antatt passende verdier for innnetemperaturen. Beregning av gjennomsnittlig målt innnetemperatur av hvert rom i hver sone er basert på den første målingen i hver time. Som regel er det registrert fire målinger per time. En forenkling ved beregningen er å anta like rom med lik innnetemperatur slik det er gjort i den kalibrerte modellen. Rom som ikke har målinger av innnetemperatur, er ikke tatt med i beregningen.



Figur 22 Profil av gjennomsnittlig målt innnetemperatur av hvert rom i hver sone (året 2019)

Generelt viser figur 22 at bygningsdel A har lavere innnetemperaturer enn bygningsdel B, og innnetemperaturene ligger mellom 20°C til 24°C. I bygningsdel B er det installert elektriske radiatorer i senere tid, da det tidligere ble opplevd kaldere inn klima i denne delen. Dette skyldes at det er flere overflater mot utsiden og mot nord for denne delen. Målte innnetemperaturer i figur 22 vil sammenliknes med innnetemperaturene i kalibrert modell i underdelkapittel 5.10.6.

Figur 23 viser målt luftmengde fra ventilasjonsaggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for 2019, hvor luftmengdene er plottet oppå hverandre i figuren.



Figur 23 Målt luftmengde fra aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 (året 2019)

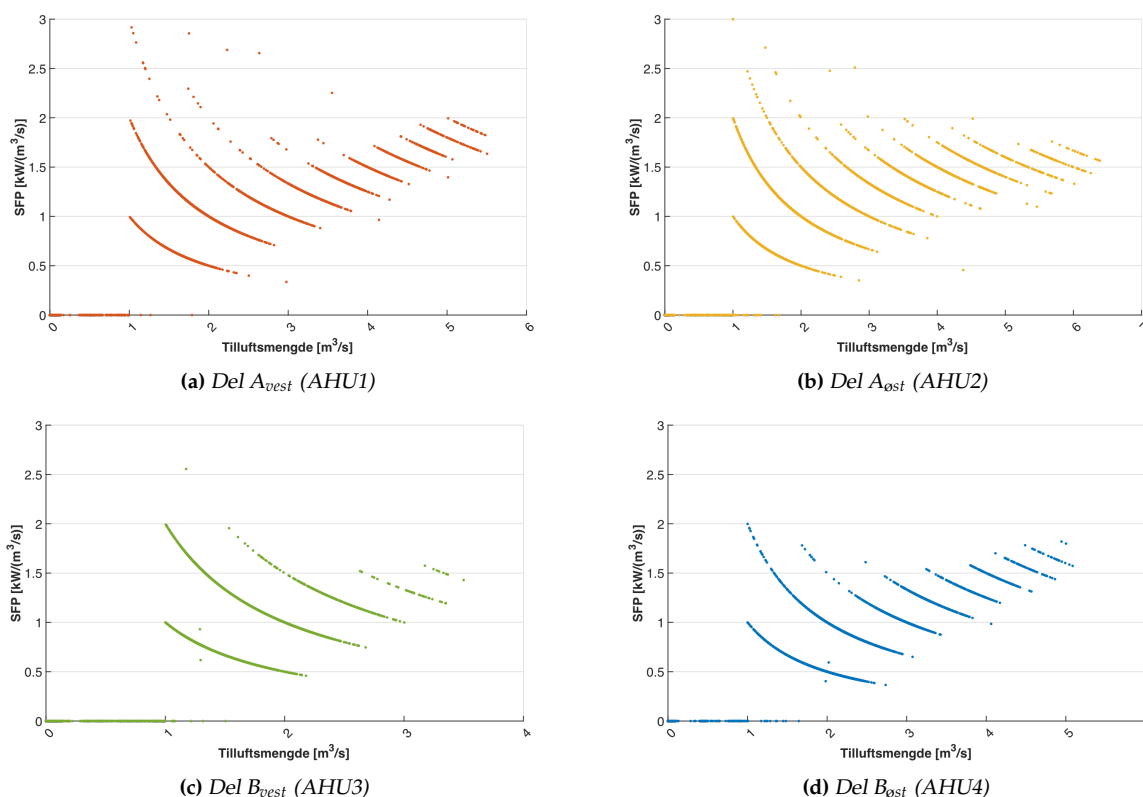
Fra figur 23 observeres det at målingene for november, desember og delvis oktober mangler. Figur 23 viser at det tilføres lave luftmengder gjennom året, og at maksimal luftmengde fra et ventilasjonsaggregat ligger på omtrent $6 \text{ m}^3/\text{s}$. Dette tilsvarer $21600 \text{ m}^3/\text{h}$. Ved å sammenlikne denne verdien med nominell luftmengde i tabell 10, er luftmengdemålingen betydelig høyere. Dermed er det uoverensstemmelse mellom målte luftmengder og nominelle luftmengder for aggregatene. Nominelle luftmengder er ikke nødvendigvis maksimale luftmengder, og det er ulike faktorer som kan påvirke. Motorer med større kapasitet enn nødvendig og eksterntrykkfall lavere enn opplyst ved aggregatbestilling. Det kan også være avvik i målingene. Avvik i målingene vil ikke bli analysert i denne oppgaven. I tillegg viser figur 23 at aggregatene gir ulik luftmengde avhengig av dimensjonerende belastning for hvert aggregat og tilstedeværelse i sonene. Målte luftmengder i figur 23 vil sammenliknes med luftmengdene i kalibrert modell i underdelkapittel 5.10.6.

5.6 Målinger av spesifikk vifteeffekt

Ved bruk av likning 1 er spesifikk vifteeffekt (SFP) beregnet for hvert av aggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for den reelle bygningen. Det er brukt timesverdier for elektrisk effekt til aggregatene for å beregne SFP. Av den grunn er det gjort en forenkling, da det i utgangspunktet kun skal benyttes summen av alle vifteeffekter for å beregne SFP. I tillegg er målt effekt til aggregatene egentlig en energimåler som måler energi per time (kWh/h), slik at effekten (kW) blir beregnet fra energimåleren. Videre er det brukt timesverdier for brutto tilluftsmengde fra de fire aggregatene fra figur 23 for å beregne SFP. Av den grunn er det gjort enda en forenkling, da det i utgangspunktet skal benyttes netto luftmengde til rommene for beregning av SFP. Dette skyldes

at det er lekkasjer i kanalsystemet, og netto luftmengde vil være mindre.

Figur 24 viser resulterende målt spesifikk vifteeffekt (SFP) mot tilluftsmengde for aggregatene, hvor figur 24a, figur 24b, figur 24c og figur 24d henholdsvis viser for aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4. Figur 24 er forenklet ved å sette SFP lik null ved lavere luftmengde enn $1 \text{ m}^3/\text{s}$, da luftmengdene som regel er over $1 \text{ m}^3/\text{s}$ i driftstid. Dette kan være vanskeligere å se i figur 23, da luftmengdene er plottet oppå hverandre for de ulike aggregatene. I tillegg er figur 24 konstruert ved å bruke timesverdier fra og med 1. januar til og med 24. juli, da det mangler målinger for de resterende timene i året for elektrisk effekt til aggregatene.

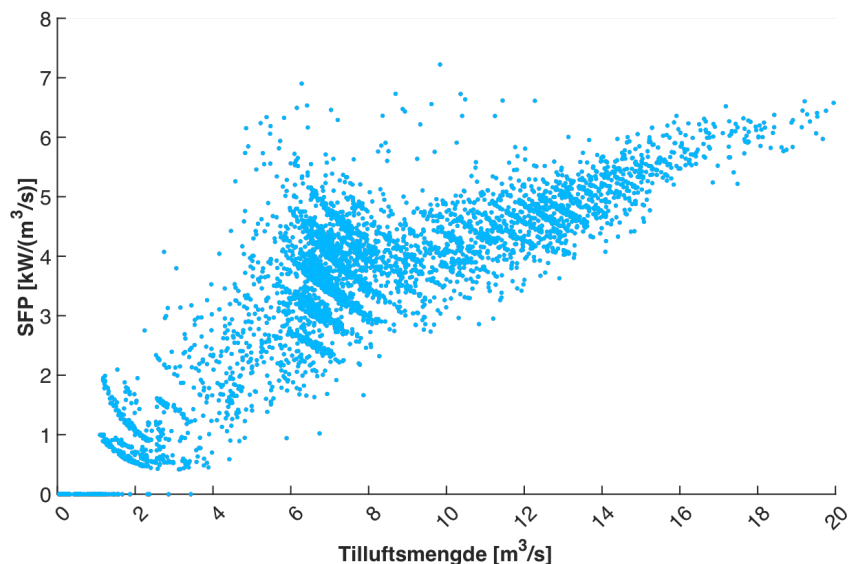


Figur 24 Målt spesifikk vifteeffekt mot tilluftsmengde for hvert av aggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 (året 2019)

Fra figur 24 kan det observeres at SFP er omtrent lik $1,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ ved høyere tilluftsmengde for alle aggregatene, hvor aggregat AHU1 har noe høyere verdi mens aggregat AHU3 har noe lavere verdi. Av den grunn er det godt samsvar mellom målt SFP og verdien for SFP på $1,57 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ fra teknisk underlag for den reelle bygningen gitt i tabell 10. I tillegg er SFP rundt kravet på $1,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ i driftstid fra tabell 1. Kravet for SFP gjelder i driftstid, som vil si at verdier utenfor driftstid kan bli sett bort ifra. Dermed har referansebygningen et energieffektivt ventilasjonssystem når det kommer til spesifikk vifteeffekt.

Ved bruk av likning 1 er også total SFP beregnet for aggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4.

Det er brukt summen av timesverdier for elektrisk effekt til aggregatene og summen av timesverdier for brutto tilluftsmengde fra de fire aggregatene for å beregne total SFP. Figur 25 viser resulterende målt total spesifikk vifteeffekt (SFP) mot tilluftsmengde for de fire aggregatene. Det er viktig å bemerke at de ulike aggregatene har ulik drift, som beskrevet i underdelkapittel 4.3.1 om referansebygningen.



Figur 25 Målt total spesifikk vifteeffekt mot tilluftsmengde for aggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 (året 2019)

Figur 25 viser at målt total SFP er omtrent lik 6 kW/(m³/s) ved høyere tilluftsmengde. Målt total SFP mot tilluftsmengde i figur 25 vil sammenliknes med total SFP mot tilluftsmengde i kalibrert modell i underdelkapittel 5.10.7.

Del II Analyse av kald dag

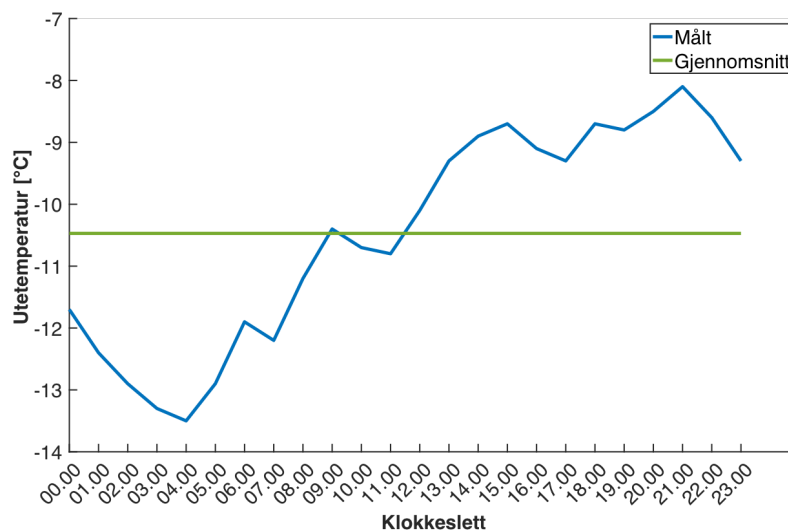
I andre del av resultatkapittelet analyseres energibruk og inneklime for den kalde dagen for den kalibrerte modellen. Deretter sammenlignes resultatene med de ulike scenarioene for effektreduksjon av ventilasjonsvarme, hvor også kostnadsbesparelser for de ulike scenarioene presenteres. Tidsperioden for simuleringene er for hele året, slik at påvirkningen fra dagene før inkluderes for den kalde dagen. Det er viktig å være klar over at den kalde dagen vil påvirke dagene etter. Av den grunn er analysen av den kalde dagen forenklet.

5.7 Kalibrert modell (for kald dag)

Simuleringen i IDA ICE for kalibrert modell gir timesverdier for effekt, slik at daglig energibruk per energipost kan bli funnet. De aktuelle energipostene for referansebygningen er romkjøling, romoppvarming, teknisk utstyr, pumper og vifter, belysning og varmt tappevann. Energiposten romoppvarming inkluderer både effekten til varmebatteriene i ventilasjonsaggregatene og den vannbaserte effekten til aerotemperne i parkeringene.

5.7.1 Daglig energibruk og effekttopp for kalibrert modell

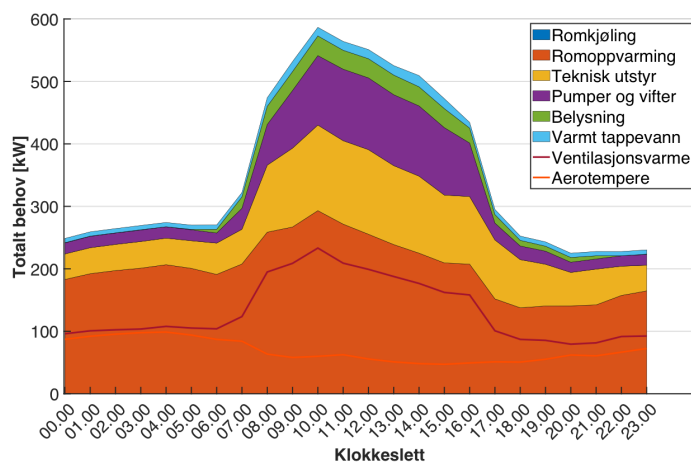
Tirsdag den 5. februar var en av de kaldeste dagene i Trondheim i 2019, og er valgt for å studere daglig energibruk. Dette skyldes at effektbruket for romoppvarming var størst denne dagen, med en effekttopp på 293 kW fra tabell 17. Av disse utgjør 233 kW effekttoppen for ventilasjonsvarmen, mens resterende 60 kW er for aerotemperne i parkeringene. Figur 26 viser målt utetemperatur for den kalde dagen, samt gjennomsnittet av utetemperaturen.



Figur 26 Utetemperatur for kald dag i Trondheim (05.02.2019)

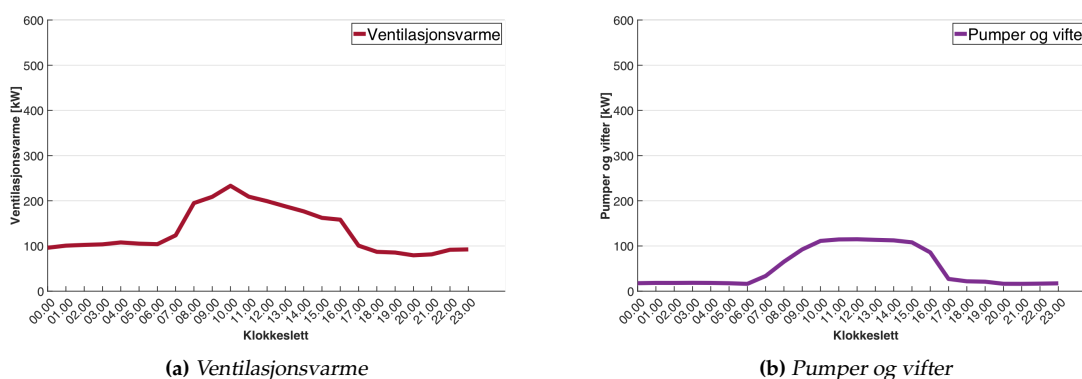
Figur 26 viser lave verdier for utetemperaturen, og gjennomsnittet for utetemperaturen er $-10,5^{\circ}\text{C}$.

Figur 27 viser daglig energibruk for kalibrert modell for den kalde dagen.



Figur 27 Daglig energibruk for kalibrert modell (05.02.2019)

Figur 27 viser at det ikke er behov for energiposten romkjøling, som også er naturlig for en kald dag. Det er likevel viktig å være klar over at en bygning kan ha varme- og kjølebehov på samme tid. Energipostene teknisk utstyr, belysning og varmt tappevann er størst ved arbeidstid, og teknisk utstyr står på om natten. Som tidligere skrevet består romoppvarmingen både av ventilasjonsvarmen og aerotemperne. Aerotemperne skal opprettholde innetemperaturen i parkeringsskjelleren over 5°C ved vinterdrift. Ved styring av ventilasjon for en kald dag er det hensiktsmessig å studere energiposten ventilasjonsvarme. Energiposten pumper og vifter vil påvirkes ved styring av ventilasjon. Energibruk for disse to energipostene er gitt i figur 28 for den kalde dagen, hvor figur 28a viser for ventilasjonsvarmen og figur 28b viser for pumper og vifter.

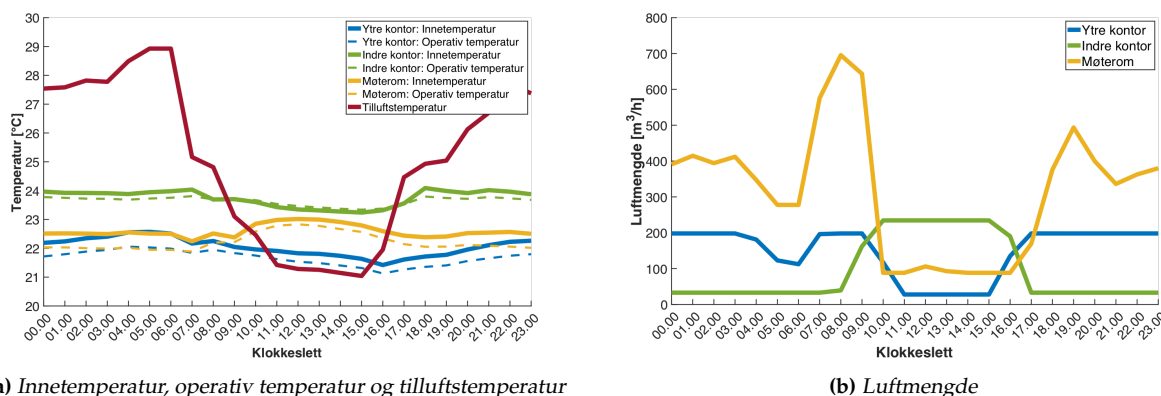


Figur 28 Ventilasjonsvarme og pumper og vifter for kalibrert modell (05.02.2019)

Figur 27 og figur 28a viser at ventilasjonsvarmen har en effekttopp på 233 kW klokken 10.00. Dette stemmer med tabell 17 på 293 kW, hvor resterende romoppvarming på 60 kW skyldes aerotemperne. Arealet under kurven gir energibruket, som er på 3192 kWh for ventilasjonsvarmen. For pumper og vifter er effekttoppen 115 kW og energibruket er 1213 kWh fra figur 27 og figur 28b.

5.7.2 Daglig inneklime for kalibrert modell

I dette underdelkapittelet presenteres og analyseres daglig inneklime for kalibrert modell, hvor daglig inneklime inkluderer innetemperatur og luftmengde. Figur 29 viser ulike temperaturer og luftmengde for de tre spesifiserte rommene, valgt i delkapittel 4.6, på den kalde dagen for kalibrert modell. Figur 29a viser både innetemperatur, operativ temperatur og tilluftstemperatur, mens figur 29b viser luftmengde til de ulike rommene. Rommene er tilkoblet ulike aggregater, men settpunktet for tilluftstemperaturen er lik for aggregatene. Som beskrevet i delkapittel 3.5, er det antatt at det er nok tilgjengelig varme slik at settpunktet for tilluftstemperaturen oppnås.



(a) Innetemperatur, operativ temperatur og tilluftstemperatur

(b) Luftmengde

Figur 29 Innetemperatur, operativ temperatur, tilluftstemperatur og luftmengde for spesifiserte rom for kalibrert modell (05.02.19)

For å kunne analysere figur 29 er det nødvendig å forstå reguleringen av luftmengden i den kalibrerte modellen. I delkapittel 2.5 ble det beskrevet om behov for luftmengde basert på personbelastning og emisjoner. Klimatisering ved temperatur betyr at innetemperatur også påvirkes av ventilasjonssystemet, og dette kan gjøres ved at tilluftstemperaturen er høyere enn innetemperaturen eller at tilluftstemperaturen er lavere enn innetemperaturen. I den kalibrerte modellen brukes VAV temperatur- og CO₂-regulering. Figur 105 i vedlegg C viser hvordan denne reguleringen fungerer. VAV temperatur- og CO₂-regulering regulerer luftmengden mellom minimum og maksimum settpunkt for luftmengden fra tabell 14, for å opprettholde settpunktene for:

- Maksimum CO₂-nivå i rom.
- Minimum innetemperatur (romoppvarming), hvis tilluftstemperaturen er høyere enn innetemperaturen.
- Maksimum innetemperatur (romkjøling), hvis tilluftstemperaturen er lavere enn innetemperaturen.

Det mest ekstreme regulerings-signalet av innetemperatur og CO₂-nivå i rommet vil bli brukt til å regulere luftmengden mellom minimum og maksimum settpunkt for luftmengde. Dermed kan

dette alternativet både varme og kjøle med tilluften. Alternativet er avhengig av PI-regulatorer. I tillegg vil dette alternativet også tvinge luftmengden om nødvendig for å opprettholde maksimum settpunkt for CO₂-nivå. Minimum settpunkt for CO₂-nivå brukes ikke. I den kalibrerte modellen er CO₂-nivået som regel under maksimum settpunkt, og av den grunn reguleres luftmengdene i stor grad etter innetemperatur. Dersom tilluftstemperaturen er høyere enn innetemperaturen vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen prøve å oppnå settpunktet for innetemperaturen for oppvarming, og dersom tilluftstemperaturen er lavere enn innetemperaturen vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen prøve å oppnå settpunktet for innetemperaturen for kjøling. Avhengig av om innetemperaturen er over eller under settpunktet for innetemperaturen på grunn av varmebalansen, reguleres luftmengdene mellom minimum og maksimum settpunkt avhengig av tilluftstemperaturens hjelp til varme eller kulde. Varmebalanse for de spesifiserte rommene er gitt i vedlegg D.

Innetemperatur for kalibrert modell

Figur 29a viser at operativ temperatur er lavere enn innetemperatur for det ytre kontoret og møterommet. Lavere operativ temperatur betyr at personer kan oppleve at det er kaldere i rommet sammenliknet med innetemperaturen. Dette er en konsekvens av at overflater i rommet har blitt kaldere over tid. Dersom det ikke er tilstedeværelse over lengre tid eller et rom ikke skal brukes, slås ofte oppvarmingen av i et rom. Likevel kan det å regelmessig varme opp et rom kreve høyere effekt, samt ta lenger tid, enn å la oppvarmingen stå på konstant. For det indre kontoret er operativ temperatur høyere enn innetemperatur på dagen, og personer kan oppleve at det er varmere i rommet. Det er viktig å være klar over denne forskjellen mellom innetemperatur og operativ temperatur, slik at termisk dynamikk i bygningen blir tatt hensyn til. Da kan det være hensiktsmessig å slå på oppvarming tidligere. Videre i oppgaven studeres kun innetemperaturen. Analysen av innetemperaturen vil være forenklet ved at det skilles mellom dag og natt.

Ytre kontor

På dagen er tilluftstemperaturen lavere enn innetemperaturen fra figur 29a, og da brukes settpunktet for kjøling lik 23°C fra figur 10b. Av den grunn benyttes den kaldere tilluften i minst mulig grad siden innetemperaturen allerede er lavere settpunktet for innetemperaturen. Dermed er innetemperaturen for lav for det ytre kontoret. Dette er naturlig da det ytre kontoret har flere overflater mot utsiden. God temperaturdistribusjon mellom ulike rom er viktig for å få et godt inneklima ved oppvarming via tilluft. Av den grunn vil åpne dører gi utjevning av innetemperaturen. Dersom det ikke er personer til stede i et rom, forsvinner en viktig varmekilde. Ved å la dørene stå åpne blir dermed temperaturfordelingen bedre i rom uten varmekilder. I tillegg brukes multiplikasjon av mange nesten identiske soner. Dette betyr at den kalibrerte modellen ikke har alle vedsidliggende rom modellert, og dette påvirker varmeoverføringen. På natten er tilluftstemperaturen høyere enn innetemperaturen, og da brukes settpunktet for oppvarming lik 22,5°C fra figur 10a. Av den grunn benyttes den varmere tilluften i størst mulig grad siden innetemperaturen som regel er lavere enn settpunktet for innetemperaturen på natten. Eventuelle interne laster og solinnstråling

gir varmetilskudd på dagen.

Indre kontor

På dagen er tilluftstemperaturen lavere enn innetemperaturen fra figur 29a, og da brukes settpunktet for kjøling lik 23°C fra figur 10b. Av den grunn benyttes den kaldere tilluften i størst mulig grad siden innetemperaturen er høyere settpunktet for innetemperaturen. Dermed er innetemperaturen for høy for det indre kontoret. Dette er naturlig da det indre kontoret har vedsideliggende rom. På natten er tilluftstemperaturen høyere enn innetemperaturen, og da brukes settpunktet for oppvarming lik 22°C fra figur 10a. Av den grunn benyttes den varmere tilluften i minst mulig grad siden innetemperaturen allerede er høyere enn settpunktet for innetemperaturen på natten. Eventuelle interne laster og solinnstråling gir varmetilskudd på dagen.

Møterom

På dagen er tilluftstemperaturen lavere enn innetemperaturen fra figur 29a, og da brukes settpunktet for kjøling lik 23°C fra figur 10b. Av den grunn benyttes den kaldere tilluften i minst mulig grad siden innetemperaturen er lavere eller tilsvarer settpunktet for innetemperaturen. Dermed er innetemperaturen for lav eller oppnådd for møterommet. Dette er naturlig da møterommet har flere overflater mot utsiden, men i enkelte perioder er varmetilskuddet fra personer høyere for møterommet. På natten er tilluftstemperaturen høyere enn innetemperaturen, og da brukes settpunktet for oppvarming lik $22,5^{\circ}\text{C}$ fra figur 10a. Av den grunn benyttes den varmere tilluften i størst mulig grad når innetemperaturen er lavere enn settpunktet for innetemperaturen, og i minst mulig grad når innetemperaturen er høyere enn settpunktet for innetemperaturen på natten. Eventuelle interne laster og solinnstråling gir varmetilskudd på dagen.

Luftmengde for kalibrert modell

Analysen av luftmengde vil også være forenklet ved at det skilles mellom dag og natt.

Ytre kontor

På dagen vil VAV temperatur- og CO_2 -reguleringen stenge til minimum settpunkt for luftmengde fra figur 29b, siden innetemperaturen allerede er lavere enn settpunktet for innetemperaturen og det ønskes dermed minimalt med kaldere tilluft. På natten vil VAV temperatur- og CO_2 -reguleringen åpne til maksimum settpunkt for luftmengde, siden innetemperaturen er lavere enn settpunktet og det ønskes dermed maksimalt med varmere tilluft. Rundt klokken 04.00 oppnår innetemperaturen settpunktet, og av den grunn vil luftmengden reduseres. Likevel faller innetemperaturen under settpunktet igjen rundt klokken 06.00, og av den grunn vil luftmengden økes til maksimum igjen.

Indre kontor

På dagen vil VAV temperatur- og CO_2 -reguleringen åpne til maksimum settpunkt for luftmengde fra figur 29b, siden innetemperaturen er høyere enn settpunktet for innetemperaturen og det

ønskes dermed maksimalt med kaldere tilluft. På natten vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen stenge til minimum settpunkt for luftmengde, siden innetemperaturen allerede er høyere enn settpunktet og det ønskes dermed minimalt med varmere tilluft.

Møterom

På dagen vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen stenge til minimum settpunkt for luftmengde fra figur 29b, siden innetemperaturen som regel er lavere enn settpunktet for innetemperaturen og det ønskes dermed minimalt med kaldere tilluft. Innetemperaturen er høyere enn settpunktet omtrent klokken 12.00. Dermed åpnes VAV temperatur- og CO₂-reguleringen for kaldere tilluft i en kort periode, før innetemperaturen blir for lav igjen.

På natten vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen i større grad åpne til maksimum settpunkt for luftmengde, siden innetemperaturen som regel er lavere enn settpunktet og det ønskes varmere tilluft. Avhengig av om innetemperaturen er over eller under settpunktet for innetemperaturen vil luftmengden variere mellom minimum og maksimum settpunkt. Dersom innetemperaturen er lavere enn settpunktet, vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen åpnes for luftmengde, da det ønskes å varme opp den for kalde inneluften med varmere tilluft. Dersom innetemperaturen er høyere enn settpunktet, vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen lukkes for mindre luftmengde, da det ikke ønskes å varme opp den for høye inneluften.

5.8 Scenarier for reduksjon av effekttopper for kald dag

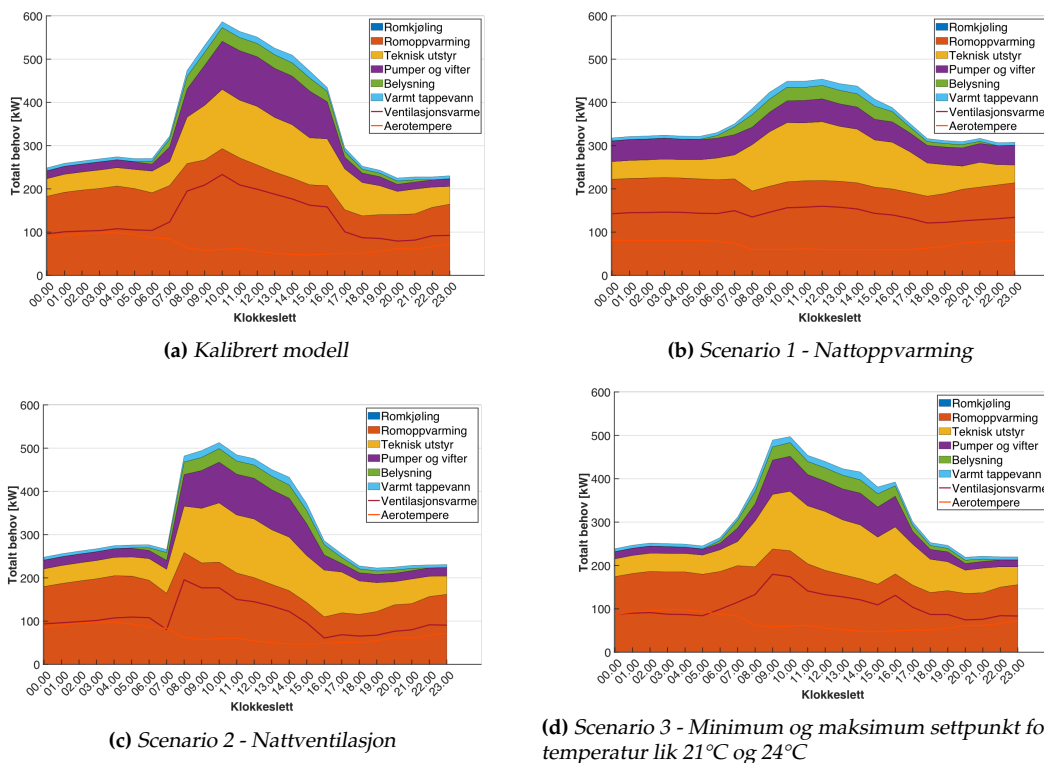
Det er hensiktsmessig å studere effekttopper for ventilasjonsvarme når bygningen har oppvarming via tilluft. I dette delkapittelet vil energibruk for ventilasjonsvarme og pumper og vifter presenteres og analyseres for scenarioene for den kalde dagen. I tillegg vil det studeres daglig inneklima. Tabell 18 viser en oppsummering av scenarioene for reduksjon av effekttopper for den kalde dagen, utviklet i delkapittel 4.6, med forklaring og endring i forhold til kalibrert modell.

Tabell 18 Scenarier for reduksjon av effekttopper for kald dag

Scenario	Forklaring	Kalibrert modell	Endring
Scenario 1	Forvarming ved å "snu" minimum settpunkt for innetemperatur	Settpunkt: Figur 10a Utetemperatur: Figur 26 Tilluftstemperatur: Figur 29a	Settpunkt: Figur 11 Utetemperatur: -10,5°C Tilluftstemperatur: 24,4 °C
Scenario 2	Økt minimum luftmengde på natten, og redusert maksimum luftmengde på dagen	Settpunkt: Tabell 14	Settpunkt: Figur 12
Scenario 3	Minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur lik 21°C og 24°C	Settpunkt: Figur 10	Settpunkt: Figur 13

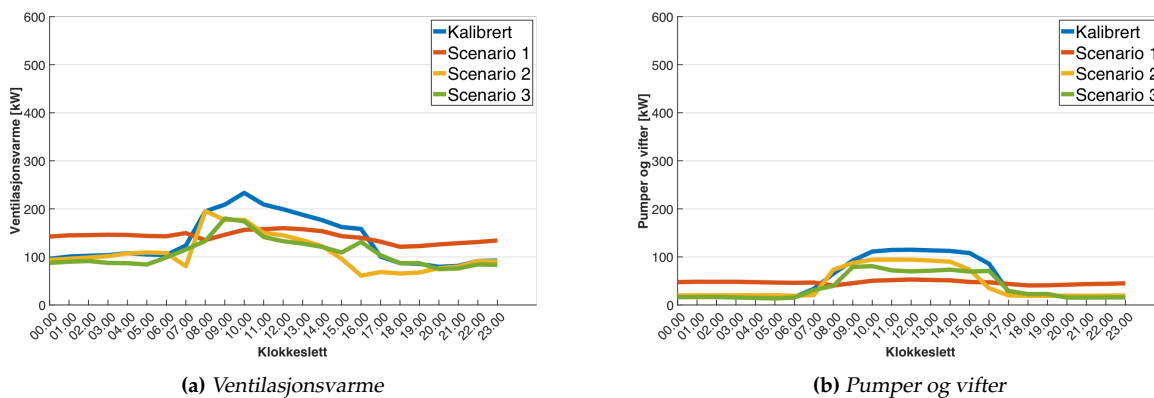
5.8.1 Daglig energibruk og effekttopp for scenarier

Figur 30 viser daglig energibruk for den kalde dagen, hvor figur 30a, figur 30b, figur 30c og figur 30d henholdsvis viser for kalibrert modell, scenario 1, scenario 2 og scenario 3.



Figur 30 Daglig energibruk for kalibrert modell og scenarioene (05.02.19)

Figur 31 viser energipostene ventilasjonsvarme og pumper og vifter for kalibrert modell og scenarioene for den kalde dagen. Ventilasjonsvarmen er gitt i figur 31a og tilsvarer den mørkerøde linjen i figur 30, mens pumper og vifter er gitt i figur 31b og tilsvarer det lille området i figur 30.



Figur 31 Ventilasjonsvarme og pumper og vifter for kalibrert modell og scenarioene (05.02.2019)

Tabell 19 viser en oppsummering av energibruk og effekttopp for ventilasjonsvarmen og pumper og vifter fra figur 31 for kalibrert modell og de ulike scenarioene. Tabell 19a viser energi og effekt for ventilasjonsvarmen, mens tabell 19b viser energi og effekt for pumper og vifter.

Tabell 19 *Daglig energibruk og effekttopp for kalibrert modell og scenarioene (05.02.19)*

Scenario	Energi [kWh]	Energiendring [%]	Effekt [kW]	Effektendring [%]
Kalibrert	3191	-	233	-
Scenario 1	3405	+7	160	-31
Scenario 2	2594	-19	196	-16
Scenario 3	2588	-19	180	-23

(a) *Ventilasjonsvarme*

Scenario	Energi [kWh]	Energiendring [%]	Effekt [kW]	Effektendring [%]
Kalibrert	1213	-	115	-
Scenario 1	1118	-8	53	-54
Scenario 2	1030	-15	94	-18
Scenario 3	902	-26	81	-30

(b) *Pumper og vifter*

Scenario 1 - Nattoppvarming

Den kalibrerte modellen viser en effekttopp for ventilasjonsvarmen på 233 kW, og scenario 1 viser en effekttopp for ventilasjonsvarmen på 160 kW fra tabell 19a. Dette tilsvarer en reduksjon på 31%. I tillegg er effekttoppen flyttet fra klokken 10.00 til klokken 12.00 fra figur 31a, og kurven for ventilasjonsvarmen er flatet mer ut. Dermed varmes bygningen mindre opp på dagen og mer om natten via tilluft. Interne laster og solinnstråling er med på å redusere nødvendig oppvarming på dagen. Energiforbruket for ventilasjonsvarmen er 3405 kWh for scenario 1, og har økt med 7% fra kalibrert modell som er på 3191 kWh. Dette er på grunn av at energiforbruket for ventilasjonsvarme er større om natten, selv om energiforbruket er redusert på dagen. Likevel er ikke dette en betydelig økning, og økningen blir dermed sett på som neglisjerbar da bedre temperaturstyring kunne gitt tilnærmet null endring i energiforbruket. Ved å forskyve ventilasjonslasten til et annet tidspunkt slik at effekttoppen reduseres, uten at det gir reduksjon i energiforbruket, blir kalt for Load Shifting fra delkapittel 2.10 om smarte indikatorer. Av den grunn er scenario 1 tilnærmet et eksempel på Load Shifting. For energiposten pumper og vifter er effekttoppen redusert med 54% og energiforbruk er redusert med 8% fra tabell 19b.

Scenario 2 - Nattventilasjon

For scenario 2 har ventilasjonsvarmen en effekttopp på 196 kW fra tabell 19a. Dette tilsvarer en reduksjon på 16% fra kalibrert modell. Effekttoppen er flyttet fra klokken 10.00 til klokken 08.00 for scenario 2 fra figur 31a, men effekttoppen er likevel redusert. Kurven for ventilasjonsvarmen viser at det er en kort "boost" om morgenen når det ankommer personer, og at den gradvis senkes i løpet av dagen før den starter å øke igjen på natten. Energiforbruket for ventilasjonsvarmen er 2594 kWh for scenario 2, og er redusert med 19% fra kalibrert modell. Dette skyldes at totale luftmengder er redusert i scenario 2. Ved å redusere energiforbruket for ventilasjonsvarmen blir også effekttoppen redusert, og dette blir kalt for Peak Load Reduction. Av den grunn er scenario 2 et eksempel på Peak Load Reduction, hvor det antas at effekttoppen kan forflyttes. For energiposten pumper og vifter er effekttoppen redusert med 18% og energiforbruk er redusert med 15% fra tabell 19b.

Scenario 3 - Minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur lik 21°C og 24°C

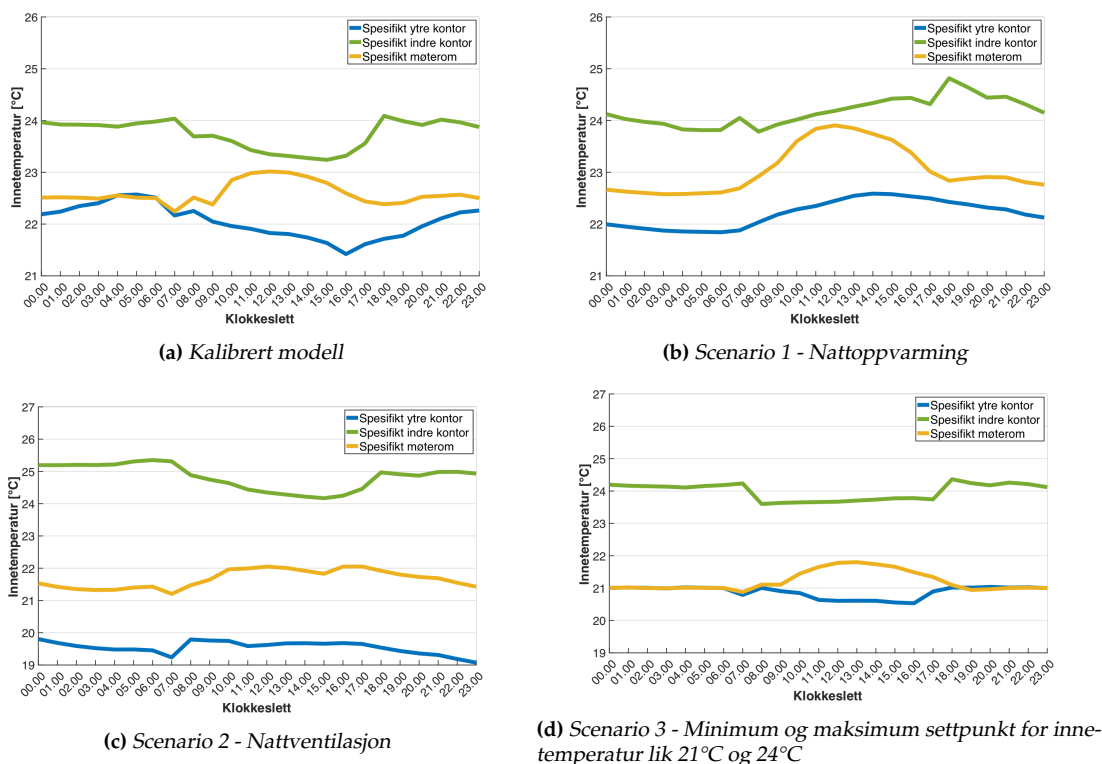
For scenario 3 har ventilasjonsvarmen en effekttopp på 180 kW fra tabell 19a. Dette tilsvarer en reduksjon på 23% fra kalibrert modell. Effekttoppen er flyttet fra klokken 10.00 til klokken 09.00 fra figur 31a, men effekttoppen er likevel redusert. Kurven for ventilasjonsvarmen har en relativt lik form som kalibrert modell, men total ventilasjonsvarme er redusert i scenario 3. Energibruket for ventilasjonsvarme er 2588 kWh for scenario 3, og er redusert med 19% fra kalibrert modell. Dette skyldes at minimum settpunkt for innetemperatur er redusert i scenario 3. Dermed er scenario 3 et eksempel på Peak Load Reduction, hvor det antas at effekttoppen kan forflyttes. For pumper og vifter er effekttoppen og energibruk henholdsvis redusert med 30% og 26% fra tabell 19b.

5.8.2 Daglig inneklima for scenarioer

I dette underdelkapittelet presenteres og analyseres daglig inneklima for scenarioene, hvor daglig inneklima inkluderer innetemperatur og luftmengde. I den kalibrerte modellen kan temperatur-distribusjonen være dårlig, og dette påvirker de ulike scenarioene som er utviklet ved å endre ulike parametere i den kalibrerte modellen.

Innetemperatur for scenarioer

Figur 32 viser innetemperaturen for de tre spesifiserte rommene, hvor figur 32a, figur 32b, figur 32c og figur 32d henholdsvis viser for kalibrert modell, scenario 1, scenario 2 og scenario 3.



Figur 32 Innetemperatur for spesifiserte rom for kalibrert modell og scenarioene (05.02.19)

Scenario 1 - Nattoppvarming

I den kalibrerte modellen varmes bygningen mer opp om natten og mindre om dagen via tilluft, men i scenario 1 er tilluftstemperaturen konstant. Dermed vil påvirkningen av interne laster og solinnstråling på innetemperaturen fremtre tydeligere i scenario 1. Dette blir observert i figur 32b ved at innetemperaturen er hevet på dagen for scenario 1. For scenario 1 er settpunktet for tilluftstemperaturen konstant lik 24,4°C. Denne temperaturen inkluderer ikke temperaturøkningen på 1°C i tilluftsviften. Dermed vil tilluftstemperaturen til rom omtrent være 25,4°C. Siden tilluftstemperaturen er høyere enn innetemperaturen fra figur 32b for alle rommene, benyttes settpunktet for oppvarming for alle rommene. I scenario 1 er settpunkt for oppvarming gitt i figur 11. For ytre kontor er settpunktet for oppvarming lik 22,5°C på dagen og 23°C på natten. Av den grunn benyttes den varmere tilluften i størst mulig grad stort sett hele dagen siden innetemperaturen i figur 32b som regel er lavere enn settpunktet for innetemperaturen både på dagen og natten. Innetemperaturen for ytre kontor er akseptabel.

For indre kontor er settpunktet for oppvarming lik 22°C på dagen og 23°C på natten. Av den grunn benyttes den varmere tilluften i minst mulig grad hele dagen siden innetemperaturen i figur 32b allerede er høyere enn settpunktet for innetemperaturen både på dagen og natten. Dermed er innetemperaturen for høy for det indre kontoret, men blir sett på som akseptabel.

For møterom er settpunktet for oppvarming lik 22,5°C på dagen og 23°C på natten. På dagen benyttes den varmere tilluften i minst mulig grad siden innetemperaturen i figur 32b allerede er høyere enn settpunktet for innetemperaturen. Dermed er innetemperaturen for høy på dagen for møterommet. På natten benyttes den varmere tilluften i størst mulig grad siden innetemperaturen i figur 32b er lavere enn settpunktet for innetemperaturen.

Scenario 2 - Nattventilasjon

For scenario 2 brukes ikke VAV temperatur- og CO₂-regulering, men konstante luftmengder hvor totale luftmengder er redusert. Tilluftstemperatur i figur 29a og luftmengder påvirker innetemperaturen i figur 32c. Lavere luftmengder gir dårligere omrøring av inneluften. Høy overtemperatur på tilluften, altså høyere tilluftstemperatur enn innetemperaturen, og lavere luftmengder kan gi kortslutning og av den grunn lav ventilasjonseffektivitet. Kortslutning betyr at deler av den friske luften går direkte i avtrekket. Høy overtemperatur og lavere luftmengder kan også gi strålingsvarme mot hodet og strålingsasymmetri dersom bygningskroppen er dårlig isolert. Det motsatte kan gi trekk. Innetemperatur er for lav for ytre kontor og for høy for indre kontor.

Scenario 3 - Minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur lik 21°C og 24°C

For ytre kontor er tilluftstemperaturen fra figur 29a som regel høyere enn innetemperaturen fra figur 32d på dagen, og da brukes settpunktet for oppvarming lik 21°C. Av den grunn benyttes den varmere tilluften i størst mulig grad siden innetemperaturen som regel er lavere enn settpunktet for innetemperaturen. På natten er tilluftstemperaturen høyere enn innetemperaturen, og da brukes settpunktet for oppvarming lik 21°C. Av den grunn benyttes den varmere tilluften i størst

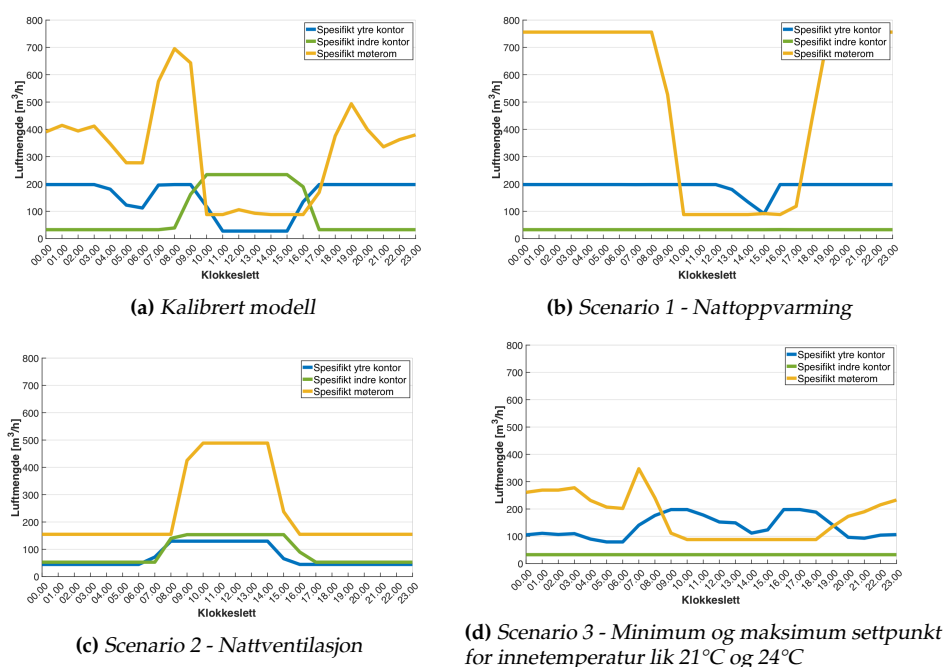
mulig grad når innnetemperaturen er lavere enn settpunktet for innnetemperaturen, og i minst mulig grad når innnetemperaturen er høyere enn settpunktet for innnetemperaturen. Ytre kontor oppnår i stor grad minimum settpunktet for innnetemperatur, og innnetemperaturen er dermed akseptabel.

For indre kontor er tilluftstemperaturen fra figur 29a lavere enn innnetemperaturen fra figur 32d på dagen, og da brukes settpunktet for kjøling lik 24°C. Av den grunn benyttes den kaldere tilluften i minst mulig grad siden innnetemperaturen allerede er lavere enn settpunktet for innnetemperaturen. På natten er tilluftstemperaturen høyere enn innnetemperaturen, og da brukes settpunktet for oppvarming lik 21°C. Av den grunn benyttes den varmere tilluften i minst mulig grad siden innnetemperaturen allerede er høyere enn settpunktet for innnetemperaturen. Indre kontor oppnår i stor grad maksimum settpunkt for innnetemperatur, og innnetemperaturen er dermed akseptabel.

For møterom er tilluftstemperaturen fra figur 29a lavere enn innnetemperaturen fra figur 32d på dagen, og da brukes settpunktet for kjøling lik 24°C. Av den grunn benyttes den kaldere tilluften i minst mulig grad siden innnetemperaturen allerede er lavere enn settpunktet for innnetemperaturen. På natten er tilluftstemperaturen høyere enn innnetemperaturen, og da brukes settpunktet for oppvarming lik 21°C. Av den grunn benyttes den varmere tilluften i størst mulig grad når innnetemperaturen er lavere enn settpunktet for innnetemperaturen, og i minst mulig grad når innnetemperaturen er høyere enn settpunktet for innnetemperaturen.

Luftmengde for scenarioer

Figur 33 viser luftmengden for de tre spesifiserte rommene, hvor figur 33a, figur 33b, figur 33c og figur 33d henholdsvis viser for kalibrert modell, scenario 1, scenario 2 og scenario 3.



Figur 33 Luftmengde for spesifiserte rom for kalibrert modell og scenarioene (05.02.19)

Scenario 1 - Nattoppvarming

For ytre kontor vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen åpne til maksimum settpunkt for luftmengde fra figur 33b omtrent hele dagen, siden innetemperaturen er lavere enn settpunktet for innetemperaturen omtrent hele dagen og det ønskes dermed maksimalt med varmere tilluft. Rundt klokken 13.00 oppnår innetemperaturen settpunktet, og av den grunn vil luftmengden reduseres. Likevel faller innetemperaturen under settpunktet igjen rundt klokken 15.00, og av den grunn vil luftmengden økes til maksimum igjen.

For indre kontor vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen stenge til minimum settpunkt for luftmengde fra figur 33b hele dagen, siden innetemperaturen er høyere enn settpunktet for innetemperaturen hele dagen og det ønskes dermed minimalt med varmere tilluft.

For møterom vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen stenge til minimum settpunkt for luftmengde fra figur 33b på dagen, siden innetemperaturen er høyere enn settpunktet for innetemperaturen på dagen og det ønskes dermed minimalt med varmere tilluft. På natten vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen åpne til maksimum settpunkt for luftmengde, siden innetemperaturen er lavere enn settpunktet for innetemperaturen på natten og det ønskes dermed maksimalt med varmere tilluft.

Scenario 2 - Nattventilasjon

Luftmengden er hevet fra minimum på natten, og senket fra maksimum på dagen. Dermed følger luftmengdene i større grad forløpet til forurensninger og emisjoner i bygningen, da det er personer i bygningen på dagen. Dette observeres i figur 33c. Med dette menes ikke at luftmengdene reguleres etter forurensning- eller personbelastning.

Scenario 3 - Minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur lik 21°C og 24°C

For ytre kontor vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen åpne til maksimum settpunkt for luftmengde fra figur 33d på dagen, siden innetemperaturen er lavere enn settpunktet for innetemperaturen på dagen og det ønskes dermed maksimalt med varmere tilluft. Årsaken til at luftmengdene reduseres noe på dagen, kan være at tilluftstemperaturen nærmer seg innetemperaturen, og av den grunn ønskes det ikke å kjøle ned. Siden innetemperaturen både er lavere og høyere enn settpunktet på natten, vil reguleringen både øke og redusere luftmengden for å opprettholde settpunktet for innetemperaturen ved hjelp av varmere tilluft.

For indre kontor vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen stenge til minimum settpunkt for luftmengde fra figur 33d på dagen, siden innetemperaturen er lavere enn settpunktet for innetemperaturen på dagen og det ønskes dermed minimalt med kaldere tilluft. På natten vil reguleringen stenge til minimum settpunkt for luftmengde, siden innetemperaturen er høyere enn settpunktet for innetemperaturen på natten og det ønskes dermed minimalt med varmere tilluft.

For møterom vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen stenge til minimum settpunkt for luft-

mengde fra figur 33d på dagen, siden innetemperaturen er lavere enn settpunktet for innetemperaturen på dagen og det ønskes dermed minimalt med kaldere tilluft. Siden innetemperaturen både er lavere og høyere enn settpunktet på natten, vil reguleringen både øke og redusere luftmengden for å opprettholde settpunktet for innetemperaturen ved hjelp av varmere tilluft.

5.9 Daglige kostnader for termisk og elektrisk energi

Daglige kostnader for termisk og elektrisk energi beregnes ut fra daglig energibruk. Styring av ventilasjon for en kald dag gjør at energipostene ventilasjonsvarme og pumper og vifter vil påvirke kostnadene. Fjernvarmen er den eneste energiforsyningen til ventilasjonsvarmen i kalibrert modell, og det blir ikke sett på kostnader for varmepumpen. Ventilasjonsvarmen er termisk energi mens pumper og vifter er elektrisk energi, og dermed vil både kostnader for fjernvarme og elektrisitet påvirkes ved styring av ventilasjon. Teknisk utstyr og belysning er elektrisk energi, og aerotempere og varmt tappevann benytter termisk energi.

5.9.1 Fjernvarmetariff og elektrisitetstariff

En enkel modell av kostnader for elektrisk og termisk energi er utviklet på bakgrunn av delkapittel 2.11. Likning 13 gir elektrisitetskostnad, hvor det antas at det ikke er et månedlig fastbeløp for strøm-kostnaden i tariffen.

$$\begin{aligned} \text{Elektrisitetskostnad} &= \text{nettleie} + \text{strømkostnad} \\ &= (\text{fastledd} + \text{energiledd} + \text{effektledd})_{\text{nettleie}} + (\text{energiledd} + \text{påslag})_{\text{strømkostnad}} \quad [\text{kr}] \end{aligned} \quad (13)$$

Likning 14 gir fjernvarmekostnad, hvor det antas at det ikke er et volumledd i tariffen.

$$\begin{aligned} \text{Fjernvarmekostnad} &= \text{nettleie} + \text{varmekostnad} \\ &= (\text{energiledd} + \text{effektledd})_{\text{nettleie}} + (\text{energiledd} + \text{påslag})_{\text{varmekostnad}} \quad [\text{kr}] \end{aligned} \quad (14)$$

For elektrisitet er verdier for nettleien hentet fra Trondheims nettleverandør Tensio. Strømlleverandøren til referansebygningen er Trøndelag Kraft hvor det brukes spotpris, og det er antatt et påslag på 3 øre/kWh. For fjernvarme er verdier hentet fra Trondheims eier av fjernvarmenettet Statkraft Varme. Tabell 20 viser verdiene for å beregne elektrisitets- og fjernvarmekostnad.

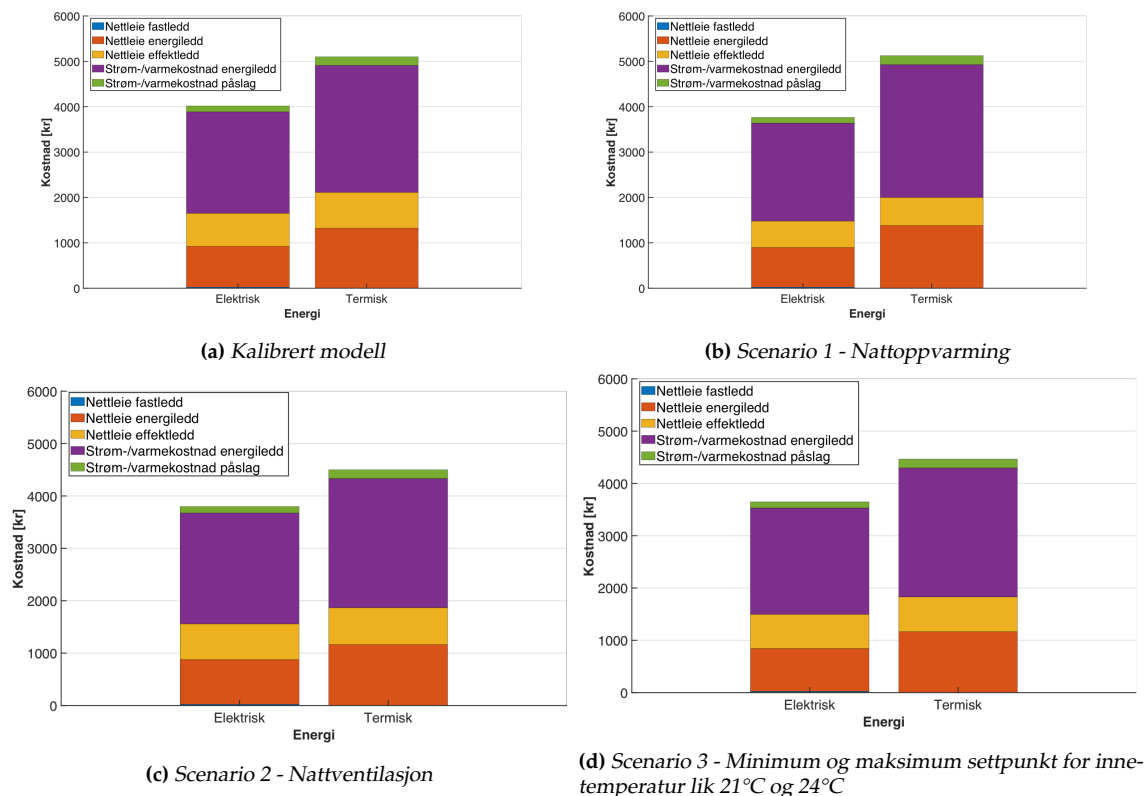
Tabell 20 Verdier for beregning av elektrisitets- og fjernvarmekostnad for kald dag [44, 45]

Type kostnad	Pris	Elektrisitet	Fjernvarme
Nettleie	Fastpris [kr/år]	8800	–
	Energipris [øre/kWh]	5,00	5,00
	Forbruksavgift [øre/kWh]	15,83	15,83
	Effektpris [kr/kW/måned]	Tabell 4	Tabell 4
Strøm-/varmekostnad	Energipris [øre/kWh]	Tabell 33	44,13
	Påslag [øre/kWh]	3,00	3,00

For elektrisitetskostnaden er fastprisen fra tabell 20 gjort om til kr ved å dele på 365 dager. Denne fastprisen er inklusiv lovbestemt påslag til Enovas energifond. Energiprisen for strømkostnaden for den kalde dagen i februar er gitt i tabell 33 i vedlegg E. For fjernvarmekostnaden brukes månedsmiddel for spotpris for energiprisen, som vil si at det brukes gjennomsnittet av spotprisen for februar 2019. Prisene i tabell 20 er ekskludert merverdiavgift, og av den grunn brukes det en merverdiavgift på 25% for alle prisene med unntak av fastprisen. Beregningen av kostnadene for kalibrert modell for kald dag er gitt i vedlegg E. Samme beregning gjelder for scenarioene.

Effektledet avregnes etter den høyeste timesverdien for effekt i den aktuelle måneden. Det er antatt at den høyeste timesverdien inntreffer den kalde dagen både for termisk og elektrisk energi. Den høyeste timesverdien for termisk energi er 307 kW for kalibrert modell, som inkluderer romoppvarming på 293 kW fra tabell 17 og effekten for varmt tappevann. Den høyeste timesverdien for elektrisk energi er 281 kW for kalibrert modell, som inkluderer pumper og vifter, samt teknisk utstyr og belysning. Dermed benyttes 60kr/kW/mnd og 53 kr/kW/mnd fra tabell 4. Disse verdiene er dividert med 28 dager for å studere den kalde dagen i februar. Samme fremgangsmåte gjelder for scenarioene.

Figur 34 viser kostnad for termisk og elektrisk energi for den kalde dagen, hvor figur 34a, figur 34b, figur 34c og figur 34d henholdsvis viser daglig kostnad for kalibrert modell, scenario 1, scenario 2 og scenario 3.



Figur 34 Daglig kostnad for elektrisk og termisk energi (05.02.19)

Tabell 21 viser daglig kostnad fra figur 34, inkludert kostnadsbesparelser fra kalibrert modell.

Tabell 21 Verdier for daglig kostnad uten og med effektledd (05.02.19)

Kostnad	Kalibrert		Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3	
	Elektrisitet	Fjernvarme	Elektrisitet	Fjernvarme	Elektrisitet	Fjernvarme	Elektrisitet	Fjernvarme
Nettleie fastledd [kr]	24	0	24	0	24	0	24	0
Nettleie energiledd [kr]	899	1322	874	1382	851	1163	818	1165
Nettleie effektledd [kr]	727	789	581	617	684	704	653	663
Strøm-/varmekostnad energiledd [kr]	2237	2800	2159	2928	2115	2465	2035	2468
Strøm-/varmekostnad påslag [kr]	129	190	126	199	123	168	118	168
Total kostnad uten effektledd [kr]	3289	4312	3183	4509	3113	3796	2995	3801
Total kostnad med effektledd [kr]	4016	5101	3764	5126	3797	4500	3648	4464
Kostnadsbesparelse med effektledd [kr]	–	–	252	–25	219	601	368	637

Scenario 1 - Nattoppvarming

Fra tabell 21 reduseres leddene i elektrisitetskostnaden fra kalibrert modell til scenario 1. Dette skyldes energibruk for pumper og vifter, siden energibruk for teknisk utstyr og belysning er konstant. Energifbruk for pumper og vifter er høyere på natten og lavere på dagen for scenario 1 sammenliknet med kalibrert modell fra figur 31b. Totalt er energibruk for pumper og vifter lavere for scenario 1 enn kalibrert modell fra tabell 19b, og dermed blir kostnadene mindre. Kostnadsbesparelsen for elektrisitet er 252 kr fra tabell 21. Leddene i fjernvarmekostnaden, med unntak av effektleddet, øker fra kalibrert modell til scenario 1 fra tabell 21. Dette skyldes energibruk for ventilasjonsvarme, siden energibruk for aerotempere og varmt tappevann er konstant. Energifbruk for ventilasjonsvarme er også høyere på natten og lavere på dagen for scenario 1 sammenliknet med kalibrert modell fra figur 31a. Totalt er energibruk for ventilasjonsvarme høyere for scenario 1 enn kalibrert modell, med en økning på 7% fra tabell 19a. Dermed er det en kostnadsøkning for fjernvarme på 25 kr fra tabell 21.

Imidlertid er det hensiktsmessig å studere effektleddet i fjernvarmekostnaden. Effektleddet for fjernvarmekostnaden reduseres fra kalibrert modell til scenario 1 fra tabell 21, i motsetning til de resterende leddene i fjernvarmekostnaden. Totalt effektledd for fjernvarme og elektrisitet reduseres med 318 kr fra kalibrert modell, som tilsvarer en reduksjon på 21%. Det ønskes høyere ventilasjonsvarme på natten og lavere på dagen for å unngå høye effekttopper. Ved å flytte lasten til natten og redusere lasten på dagen blir effekttoppene mindre, og effektleddet i kostnadene reduseres. Kostnadsbesparelsene for effekt blir høyere ved høyere priser for effektleddet dersom effekttoppen reduseres ved å flytte lasten.

Scenario 2 - Nattventilasjon

Fra tabell 21 reduseres alle leddene i både elektrisitet- og fjernvarmekostnaden for scenario 2. Dette skyldes redusert energibruk for ventilasjonsvarme og pumper og vifter fra tabell 19, siden energibruk for aerotempere, varmt tappevann, teknisk utstyr og belysning er konstant. Energifbruk for ventilasjonsvarme er redusert med 19% fra tabell 19a, og dette er naturlig når totale luftmengder er redusert. Da vil også energibruk pumper og vifter reduseres, og dermed blir kostnadene mindre. For elektrisitet er kostnadsbesparelsen 219 kr, og for fjernvarme er kostnadsbesparelsen 601 kr

fra tabell 21. Totalt effektledd for fjernvarme og elektrisitet reduseres med 128 kr, som tilsvarer en reduksjon på 8%. Det ønskes større luftmengder på natten og mindre luftmengder på dagen for å unngå høye effekttopper. Ved å flytte lasten til natten og redusere lasten på dagen blir effekttoppene mindre, og effektleddet i kostnadene reduseres.

Scenario 3 - Minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur lik 21°C og 24°C

Fra tabell 21 reduseres alle leddene i både elektrisitet- og fjernvarmekostnaden for scenario 3. Energibruk for ventilasjonsvarme er redusert med 19% fra tabell 19a, og dette er naturlig når settpunktet for minimum innetemperatur er redusert. Da vil også energibruk for pumper og vifter reduseres, og dermed blir kostnadene mindre. For elektrisitet er kostnadsbesparelsen 368 kr, og for fjernvarme er kostnadsbesparelsen 637 kr fra tabell 21. Totalt effektledd for fjernvarme og elektrisitet reduseres med 200 kr, som tilsvarer en reduksjon på 13%. Effektleddet i kostnaden reduseres ved å redusere effekttoppen, og dette gir kostnadsbesparelser.

Del III Årlig analyse

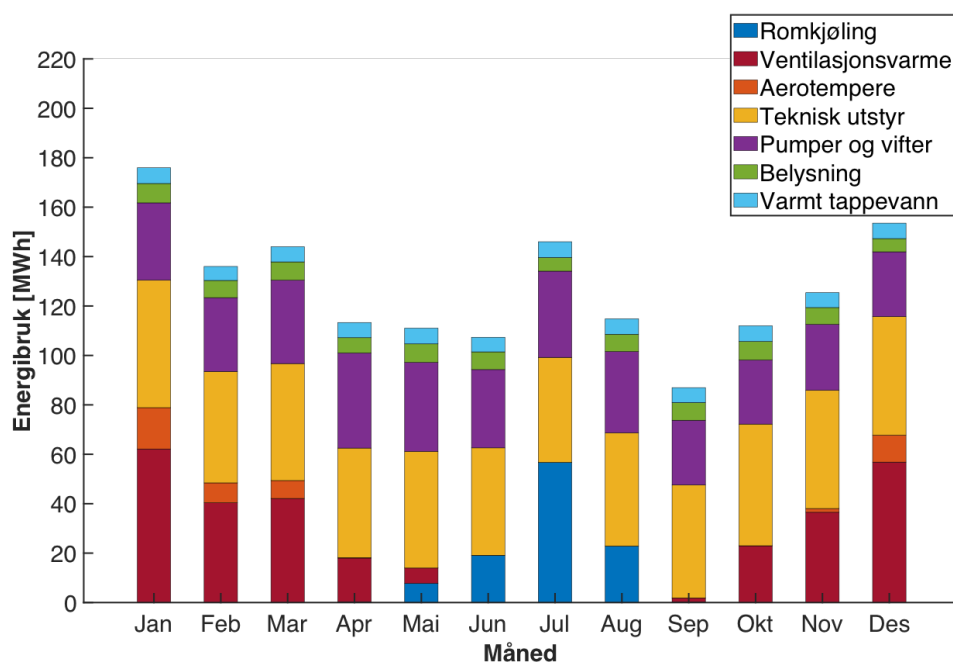
På bakgrunn av analyser av den kalde dagen i andre del av resultatkapittelet, vil det i tredje del av resultatkapittelet studeres hvilket potensial bygningen har for reduksjon av effekttopper for ventilasjonsvarmen i løpet av året. Fra andre del av resultatkapittelet ble det beskrevet at det ved styring av ventilasjon for en kald dag er hensiktsmessig å studere ventilasjonsvarmen og pumper og vifter. For en analyse av et år vil også ventilasjonskjøling være hensiktsmessig å studere, men det er ikke lagt vekt på ventilasjonskjøling i denne oppgaven.

5.10 Kalibrert modell (for året)

Den kalibrerte modellen er igjen utgangspunktet for å studere effektreduksjon for hele året, hvor ventilasjonsvarme, energibruk for pumper og vifter, inneklimate og kostnader for energi sammenlignes med de ulike scenarioene for å se om scenarioene oppnår reduksjon av effekttopper og dermed kostnadsbesparelser uten at det går på bekostning av inneklimate. For å studere om bygningen har potensial for effektreduksjon av ventilasjonsvarme benyttes profiler av ventilasjonsvarme, profiler av tilluftstemperatur og Energi-Temperatur-kurver, og for å studere om ventilasjonsanlegget er energieffektivt benyttes spesifikk vifteeffekt.

5.10.1 Månedlig og årlig energibruk for kalibrert modell

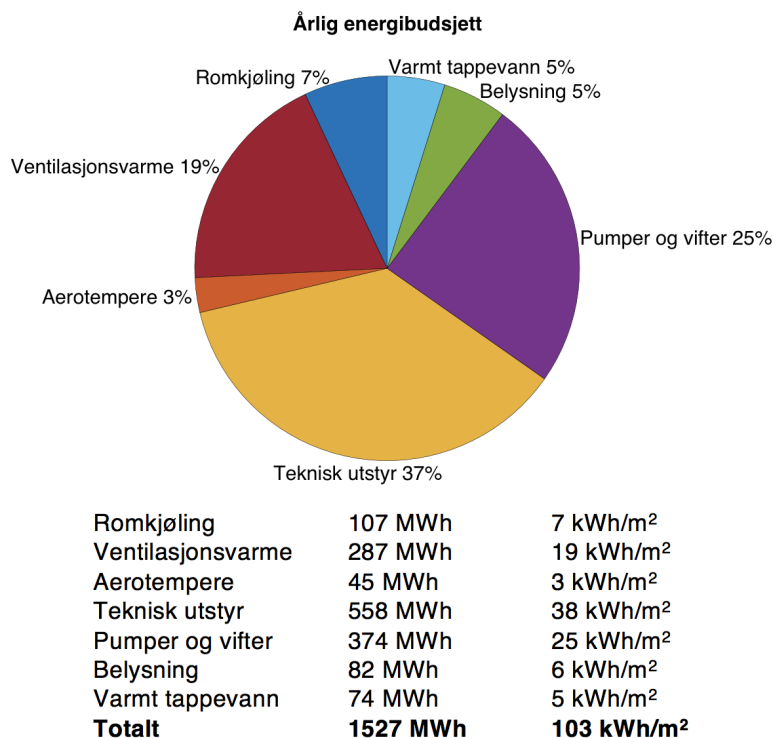
Simuleringen i IDA ICE for den kalibrerte modellen gir timesverdier for effektbruk, slik at månedlig og årlig energibruk per energipost kan beregnes. Figur 35 viser månedlig energibruk per energipost for den kalibrerte modellen.



Figur 35 Månedlig energibruk (Kalibrert modell)

Figur 35 viser at romkjølingen, ventilasjonsvarmen og aerotemperne varierer fra måned til måned, og dette skyldes at romkjøling og romoppvarming er temperaturavhengige. Styring av ventilasjon kan innebære endring i energipostene ventilasjonsvarme, ventilasjonskjøling og pumper og vifter. Teknisk utstyr, belysning og varmt tappevann er relativt konstante for de ulike månedene.

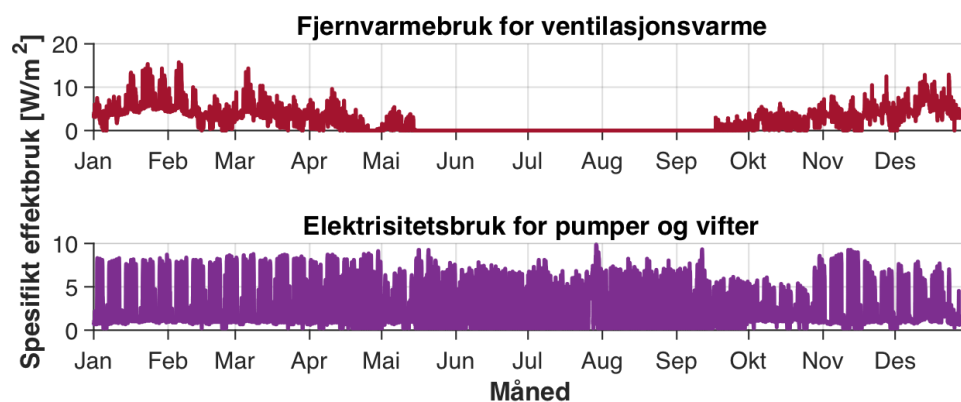
Figur 36 viser årlig energibruk per energipost for den kalibrerte modellen.



Figur 36 Årlig energibruk (Kalibrert modell)

Figur 36 viser at bygningen har et netto energibruk på 1527 MWh/år, som tilsvarer 103 kWh/(m²·år). Dette er innenfor kravet på 115 kWh/(m²·år) gitt i tabell 1, men siden oppvarmingen er via tilluft er det viktig at energibruket til romoppvarming er lavt. Romoppvarming inkluderer energipostene ventilasjonsvarme og aerotempere, som henholdsvis har et årlig spesifikt energibruk på 19 kWh/m² og 3 kWh/m² fra figur 36. Da blir totalt årlig spesifikt energibruk for romoppvarming 22 kWh/m². Dette er ikke innenfor kravet på 15 kWh/m² fra delkapittel 2.3 om oppvarming via tilluft, men det ble beskrevet at energibruket bør være rundt 15 kWh/m². I tillegg vil energiposten pumper og vifter studeres, da oppgaven baserer seg på styring av ventilasjon. Fra figur 36 er årlig spesifikt energibruk for pumper og vifter på 25 kWh/m². Energifbruket til vifter utgjør 99,8% av energiposten pumper og vifter, og det er vifter som er sentralt ved styring av ventilasjon. Som sammenlikningsgrunnlag for vifter vil spesifikk vifteeffekt benyttes i underdelkapittel 5.10.7.

Figur 37 viser årlig spesifikt fjernvarmebruk for ventilasjonsvarme og årlig spesifikt elektrisitetsbruk for pumper og vifter fra den kalibrerte modellen.

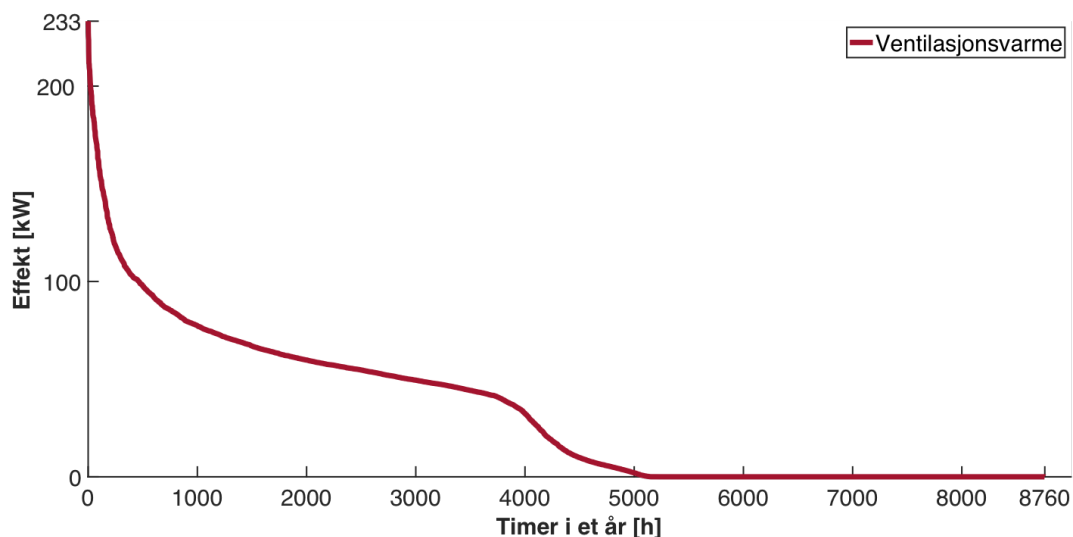


Figur 37 Årlig spesifikt effektbruk for ventilasjonsvarme og pumper og vifter (Kalibrert modell)

Fra figur 37 observeres det at den kalde dagen (5. februar) har den største effekttoppen for ventilasjonsvarme i 2019. Effekttoppen er på $15,7 \text{ W/m}^2$, som tilsvarer verdien på 233 kW fra tabell 19a. Videre viser figur 37 at ventilasjonsvarmen er størst ved vinter, og det er ingen ventilasjonsvarme om sommeren. Imidlertid er det bruk av elektrisitet for pumper og vifter om sommeren, og dette skyldes naturligvis ventilasjon. Når det gjelder den største effekttoppen for pumper og vifter, er denne på $9,9 \text{ W/m}^2$ den 29. juli. Dersom elektrisitetsbruk for pumper og vifter studeres ved bruk av ventilasjonsvarme, er den største effekttoppen på $9,3 \text{ W/m}^2$ den 11. november.

5.10.2 Varighetskurve for ventilasjonsvarme for kalibrert modell

Varighetskurven for ventilasjonsvarmen konstrueres ved å sortere verdiene for årlig spesifikk effektbruk for ventilasjonsvarmen fra figur 37 fra størst til minst i løpet av året. Figur 38 viser varighetskurven for ventilasjonsvarmen for kalibrert modell.

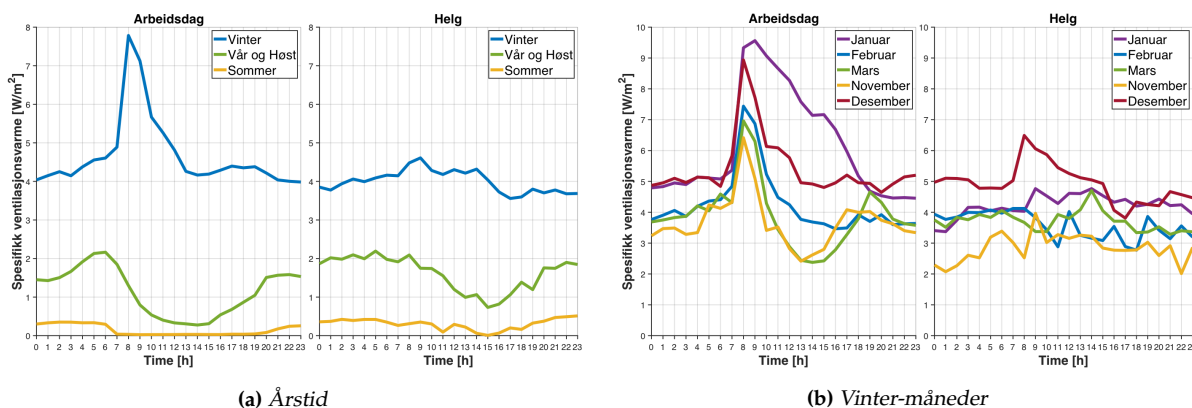


Figur 38 Varighetskurve for ventilasjonsvarme (Kalibrert modell)

Figur 38 viser den maksimale effekten for ventilasjonsvarmen på 233 kW. I delkapittel 5.4 ble det observert en brattere varighetskurve for romoppvarmingen rundt 4000h, og det ble beskrevet at dette skyldes ventilasjonsvarmen. Dette kommer nå frem i figur 38 som kun viser varighetskurven for ventilasjonsvarmen, og ikke total romoppvarming inkludert aerotemperne i parkeringen. Årsaken til at varighetskurven for ventilasjonsvarmen blir brattere rundt 4000h skyldes i hovedsak valgt maksimum settpunkt for innetemperatur og valgt minimum settpunkt for luftmengde i den kalibrerte modellen. Høyere maksimum settpunkt for innetemperatur og lavere minimum settpunkt for luftmengden vil gi flatere kurve, og mindre energibruk for ventilasjonsvarme. En sensitivitetsanalyse av innetemperatur og luftmengde er gjort i delkapittel 5.13, og årsaken til den bratte kurven for den kalibrerte modellen vil presenteres tydeligere.

5.10.3 Profiler for ventilasjonsvarme og pumper og vifter for kalibrert modell

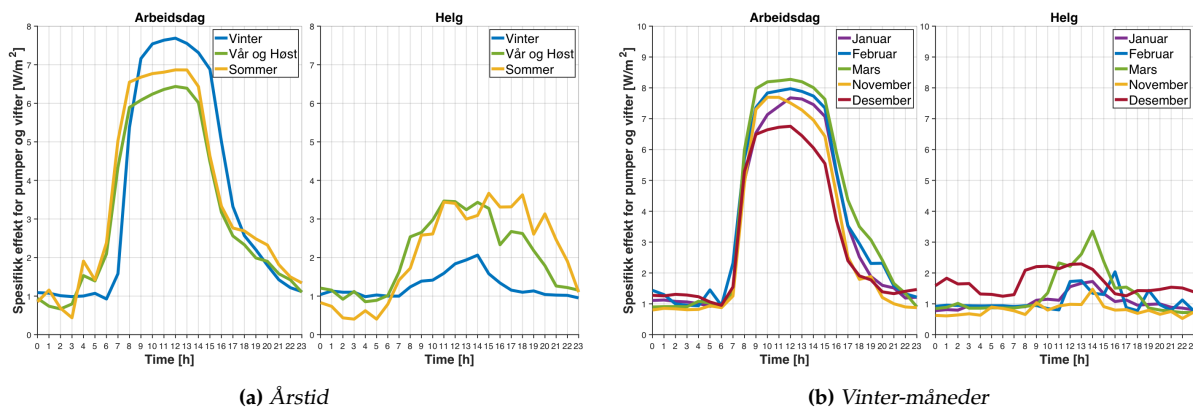
Verdiene fra figur 37 brukes videre for å konstruere profiler for ventilasjonsvarmen og pumper og vifter. Profilene er konstruert ved å fordele verdiene mellom kategoriene arbeidsdag/helg og vinter/vår/sommer/høst. Arbeidsdag inkluderer hele mandager, tirsdager, onsdager, torsdager og fredager når det ikke er ferie, mens helg inkluderer lørdager og søndager i tillegg til ferier. Feriene er påskeferie og juleferie. Måneden juli, som i stor grad gjenspeiler sommerferie, er ikke betraktet i denne kategoriseringen, og skyldes at det ønskes å studere kortere perioder for helgen. Vinter inkluderer januar, februar, mars, november og desember. Vår og høst inkluderer april, september og oktober, og sommer inkluderer mai, juni og august. På bakgrunn av denne kategoriseringen, blir ulike profiler konstruert ved å ta gjennomsnittet av effektbruk for hver time. Figur 39 viser daglig profil av spesifikk ventilasjonsvarme for arbeidsdag og helg, hvor figur 39a viser for de ulike årstidene og figur 39b viser for de ulike vinter-månedene.



Figur 39 Daglig profil av spesifikk ventilasjonsvarme (Kalibrert modell)

Figur 39 viser at det er en betydelig effekttopp rundt klokken 08.00 i arbeidsdager om vinteren, og denne bør dermed reduseres. På våren og høsten er det allerede redusert effekttopp, mens om sommeren er det lite behov for ventilasjonsvarme som også er naturlig. Tilsvarende er gjort for energiposten pumper og vifter.

Figur 40 viser daglig profil av spesifikk effekt for pumper og vifter for arbeidsdag og helg, hvor figur 40a viser for årstidene og figur 40b viser for vinter-månedene.



Figur 40 Daglig profil av spesifikk effekt for pumper og vifter (Kalibrert modell)

Igen blir det observert en betydelig effekttopp for arbeidsdager om vinteren i figur 40. På bakgrunn av figur 39, vil det studeres reduksjon av effekttopper av ventilasjonsvarme om vinteren videre i oppgaven. Oppsummert viser profiler av ventilasjonsvarmen at bygningen har potensial for effektreduksjon av ventilasjonsvarmen.

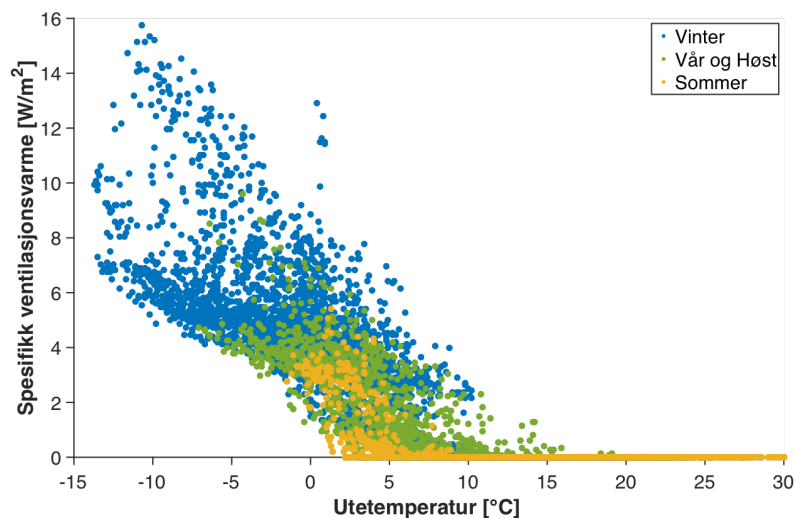
5.10.4 Energi-Temperatur-kurver for kalibrert modell

Energi-Temperatur-kurver (ET-kurver) for den kalibrerte modellen er konstruert ved å benytte verdier for ventilasjonsvarmen fra figur 37 og utetemperaturen for 2019. I tillegg sammenlignes disse simulerte kurvene med målte kurver, slik at årlige scenarioer for effektreduksjon er realistiske for bygningen. Store deler av målingene for ventilasjonsvarmen mangler, og av den grunn sammenliknes simulerte og målte kurver for romoppvarming som også inkluderer aerotemperaturen i kjelleren. Disse kurvene for romoppvarming er gitt i vedlegg G, men kommentarer blir gitt i dette underdelkapittelet der det er hensiktsmessig. Ved hjelp av ET-kurver kan det analyseres om bygningen har potensial for reduksjon av effekttopper for ventilasjonsvarme.

ET-kurvene er delt inn i ulike kategorier for å finne årsaker til energibruket til ventilasjonsvarmen. Kategorien vinter inkluderer januar, februar, mars, november og desember. Vår og høst inkluderer april, september og oktober, og denne gangen inkluderer sommer mai, juni, juli og august. Kategorien arbeidstid inkluderer hverdager fra klokken 06.00 til 16.00 når det ikke er ferier. Ikke-arbeidstid inkluderer resten av timene i året, i tillegg til påske-, sommer- og juleferien. I denne oppgaven fokuseres det mest på analyse av arbeidstiden.

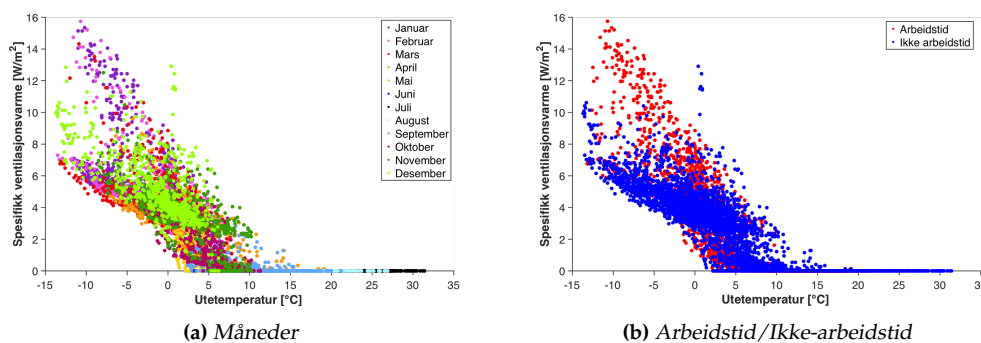
Ventilasjonsvarme mot utetemperatur

Figur 41 viser energibruket for ventilasjonsvarmen mot utetemperaturen, hvor det er delt inn i kategoriene vinter, vår/høst og sommer.



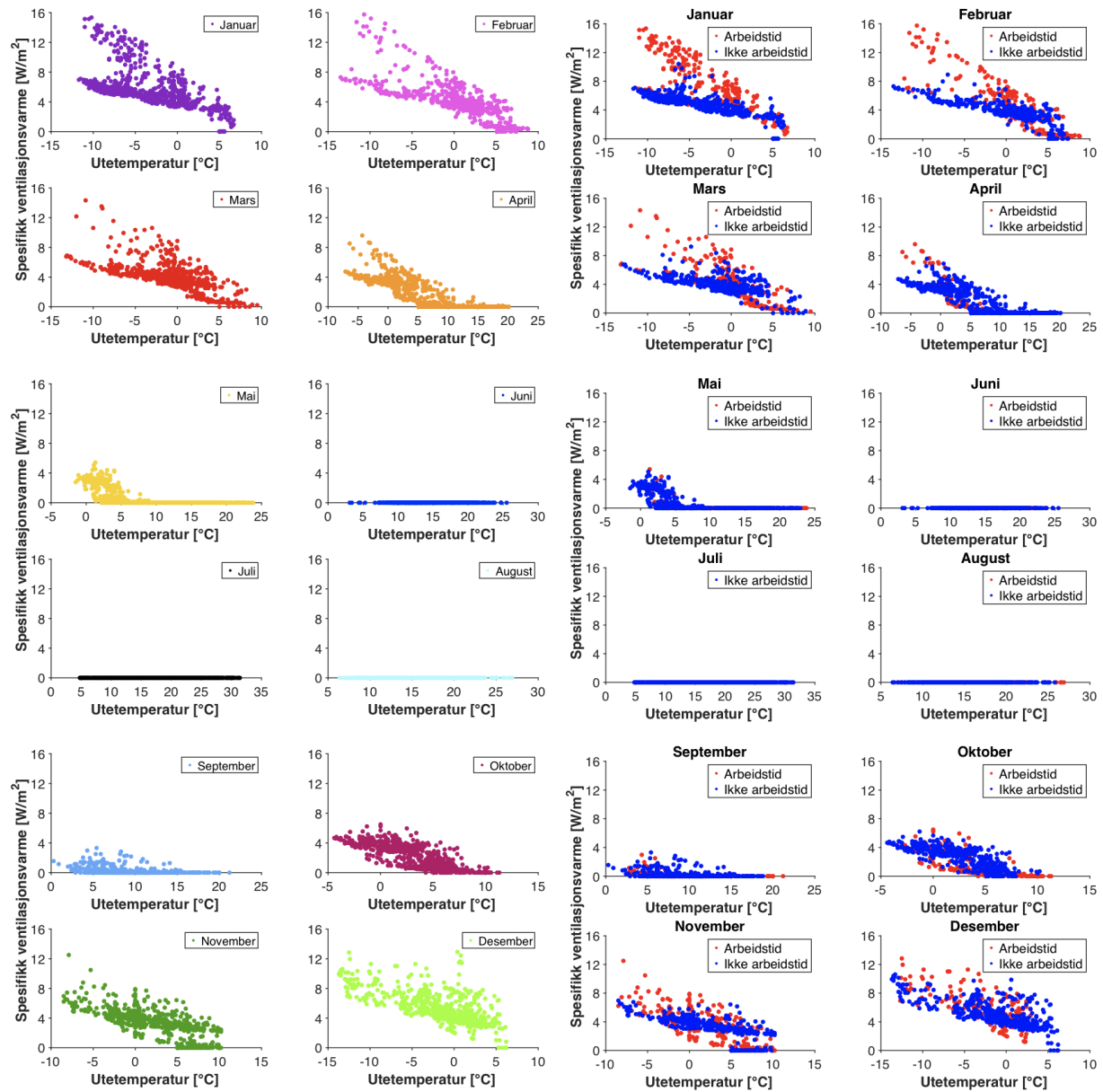
Figur 41 Simulert årlig ventilasjonsvarme mot utetemperatur (Årstider)

Figur 41 viser at det er større energibruk for ventilasjonsvarmen om vinteren, og figuren samsvarer dermed med figur 39 som viser daglig profil av ventilasjonsvarmen. I tillegg viser figur 41 klare trender for de ulike årstidene, som er naturlig. Figur 42 viser også energibruket for ventilasjonsvarmen mot utetemperaturen, men denne gangen er det delt inn i kategoriene måneder og arbeidstid/ikke-arbeidstid i henholdsvis figur 42a og figur 42b.



Figur 42 Simulert årlig ventilasjonsvarme mot utetemperatur (måneder og arbeidstid/ikke-arbeidstid)

Fra figur 42 er det også ulike trender i ventilasjonsvarmen avhengig av kategori. Figur 42a viser at ventilasjonsvarmen varierer avhengig av måneder, og det kan se ut som at punktene splittes i to for en og samme måned. Av den grunn er det delt inn i arbeidstid og ikke-arbeidstid i figur 42b for å studere denne splittingen. Figur 42b viser at det er en splittelse i ventilasjonsvarmen mellom arbeidstid og ikke-arbeidstid, hvor ventilasjonsvarmen er størst i arbeidstid. I figur 43 er punktene fra figur 42 fordelt mellom de ulike månedene, hvor figur 43a viser uten inndeling i arbeidstid/ikke-arbeidstid og figur 43b viser med inndeling i arbeidstid/ikke-arbeidstid.



(a) Uten inndeling i arbeidstid/ikke-arbeidstid

(b) Med inndeling i arbeidstid/ikke-arbeidstid

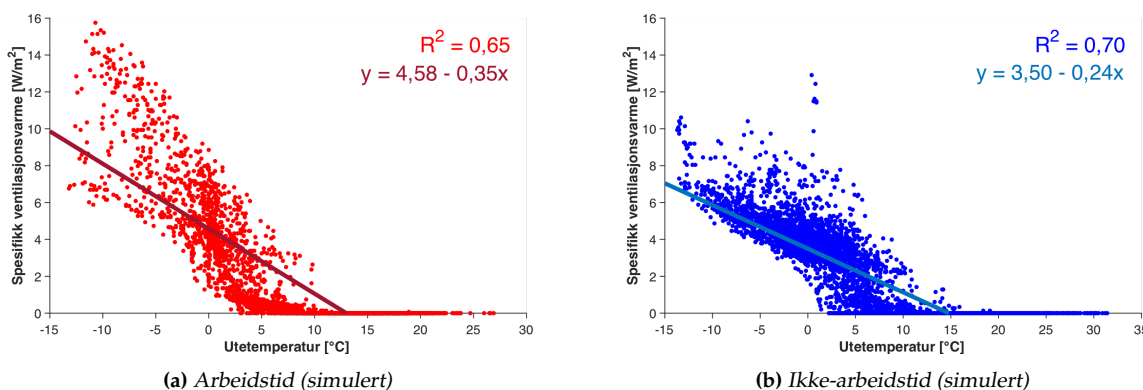
Figur 43 Simulert månedlig ventilasjonsvarme mot utetemperatur (med og uten inndeling i arbeidstid og ikke-arbeidstid)

Figur 43 viser at det er et klart skille mellom arbeidstid og ikke-arbeidstid for enkelte måneder. I tillegg viser figur 43 at ventilasjonsvarmen er størst for januar, februar, desember og delvis mars og november. Det er dermed i disse vinter-månedene at det er størst behov for effektreduksjon av ventilasjonsvarme.

Lineær regresjon og korrelasjonsanalyse

Frem til nå i dette underdelkapittelet har fokuset vært på å finne trender for ventilasjonsvarmen, hvor kategoriene årstid, måneder og arbeidstid/ikke-arbeidstid har blitt analysert. Årsaken til dette er at det nå skal analyseres sammenhengen mellom ventilasjonsvarmen og utetemperaturen, og da vil de ulike kategoriene kunne gi bedre sammenhenger mellom parene. Både figur 41, figur 42 og figur 43 viser at det er en lineær sammenheng mellom ventilasjonsvarmen og utetemperaturen. Av den grunn vil det studeres ET-kurver, som er lineære regresjoner av ventilasjonsvarmen og utetemperaturen. Dette gir igjen muligheten for en korrelasjonsanalyse, for å finne ut i hvor stor grad det er en lineær sammenheng mellom ventilasjonsvarmen og utetemperaturen. Dersom det er store avvik mellom ventilasjonsvarmen og ET-kurven, er det potensial for effektreduksjon av ventilasjonsvarmen dersom punktene i større grad ligger over ET-kurven.

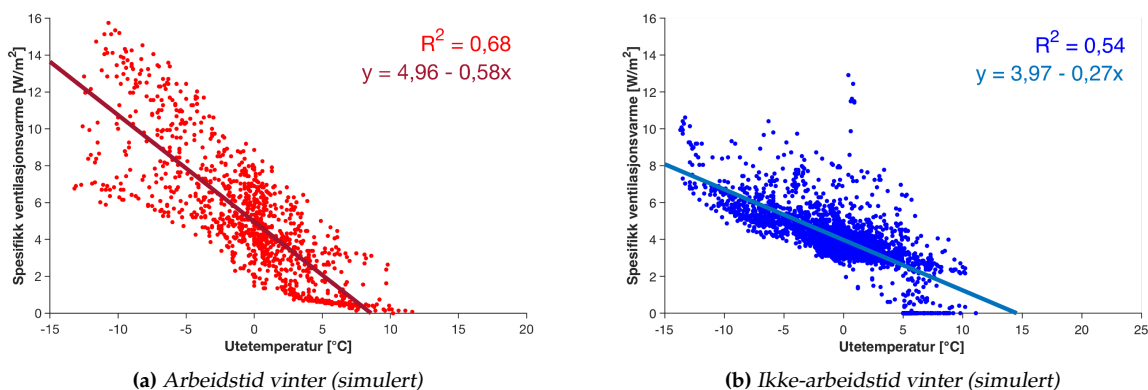
Figur 44 viser ventilasjonsvarmen mot utetemperaturen for hele året, hvor ET-kurve også er inntegnet. Verdiene for ventilasjonsvarmen er de samme som verdiene i figur 42b, bare nå er figurene separert i figur 44a for arbeidstid og figur 44b for ikke-arbeidstid.



Figur 44 Simulert ET-kurve for arbeidstid og ikke-arbeidstid (året 2019)

Figur 44 viser at det er en mindre lineær sammenheng mellom ventilasjonsvarmen og utetemperaturen for både arbeidstid og ikke-arbeidstid. Dette er på bakgrunn av R^2 -verdiene på 0,65 for arbeidstid og 0,70 for ikke-arbeidstid. For målt romoppvarming i vedlegg G er det en enda mindre lineær sammenheng, med R^2 -verdier på 0,64 for arbeidstid fra figur 121c og 0,60 for ikke-arbeidstid fra figur 121d. Dette skyldes at det brukes verdier for hele året. Av den grunn blir kurvene videre delt inn i vinter, vår/høst og sommer. Vinter inkluderer månedene januar, februar, mars, november og desember. Vår/høst inkluderer april, september og oktober, mens sommer inkluderer mai, juni, juli og august. En annen inndeling, som ikke brukes i denne oppgaven, er å separere ET-kurver ved balansetemperatur (CPT) for utetemperaturen beskrevet i delkapittel 2.12. Dermed kunne kurvene blitt delt inn i stykkevise lineære regresjoner for ventilasjonsvarmen ved bruk av CPT for en bestemt utetemperatur. Figur 44 viser i mindre grad at punktene flater ut ved en bestemt utetemperatur. For målt romoppvarming i figur 121c og figur 121d flater punktene ut rundt CPT lik 12°C.

Figur 45 viser ventilasjonsvarmen mot utetemperaturen og inntegnet ET-kurve for vinteren, hvor figur 45a viser for arbeidstid og figur 45b viser for ikke-arbeidstid.

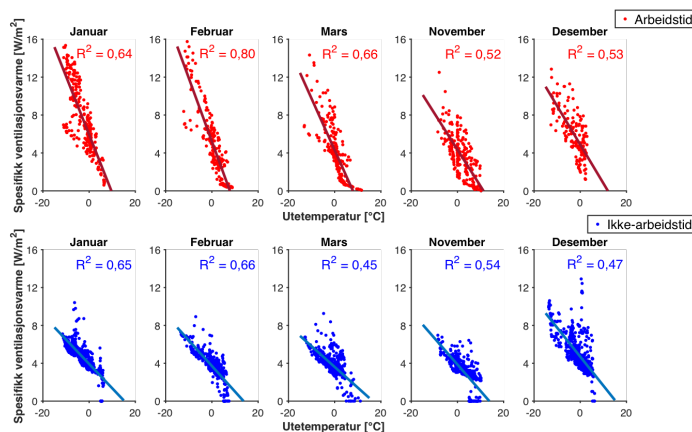


Figur 45 Simulert ET-kurve for arbeidstid og ikke-arbeidstid vinter (vinter 2019)

Figur 45 viser nå en større lineær sammenheng mellom ventilasjonsvarmen og utetemperaturen for arbeidstid, med en ny R^2 -verdi på 0,68. Denne kategoriseringen gir ikke en betydelig større R^2 -verdi, men avvikere om vår/høst og sommer er likevel fjernet. For simulert romoppvarming i vedlegg G er R^2 -verdien forbedret fra 0,65 i figur 121a til 0,79 i figur 122a, mens for målt romoppvarming er R^2 -verdiene nokså like uavhengig av kategoriseringen fra år til vinter. Ved å sammenlikne simulerte og målte verdier for romoppvarming i arbeidstid i henholdsvis figur 122a og figur 122c i vedlegg G, har målt ET-kurve mindre energibruk for romoppvarming. Årsaken kan være at det bygningsdel B i reell bygning er installert elektriske radiatorer som gjør at målingene av romoppvarmingen fra varmepumpe og fjernvarme blir mindre, da oppvarmingsbehovet kompenseres med elektrisk energi. I denne oppgaven inkluderer målinger av romoppvarming kun bruk av varmepumpe og fjernvarme, og ikke den elektriske oppvarmingen. I tillegg jobber IDA ICE optimalt ut fra gitte betingelser.

Figur 45 viser også den lineære funksjonen for ET-kurven. Jo høyere skjæringspunkt jo større behov for effektreduksjon, men dette gjelder bare dersom punktene for ventilasjonsvarmen i større grad ligger over ET-kurven. Figur 45a viser at ET-kurven for arbeidstid har et stigningstall på 0,58, mens figur 45b viser at ET-kurven for ikke-arbeidstid har et stigningstall på 0,27. Dermed er det størst behov for effektreduksjon av ventilasjonsvarme i arbeidstid i simuleringen.

Det er også gjort en dataanalyse av hver måned om vinteren. Figur 46 viser ET-kurve for de ulike vinter-månedene januar, februar, mars, november og desember for arbeidstid og ikke-arbeidstid.



Figur 46 Simulert månedlig ET-kurve for arbeidstid og ikke-arbeidstid

Generelt viser figur 46 at alle vinter-månedene har potensial for effektreduksjon i arbeidstid, og dette er på bakgrunn av at flere verdier for ventilasjonsvarmen i større grad ligger over ET-kurvene. I arbeidstid har februar størst R^2 -verdi, deretter følger mars, januar, desember og november.

Analyse av gjennomsnittlig temperaturforflytning (TMA)

Gjennomsnittlig temperaturforflytning, på engelsk kalt for Temperature Moving Average (TMA), tar hensyn til bygningens termiske treghet. Analysen av TMA har som mål om å finne ut hvordan forsinket utetemperatur påvirker bygningens energibruk. TMA bør justeres med hensyn til bygningfysikken. Avhengig av bygningskonstruksjoner, kan bygninger lagre varme og bruke den etterpå for å forbedre inn klimaet.

For å finne ut i hvilken grad en temperaturforsinkelse av utetemperaturen påvirker energibruken, er utetemperaturen forsinket med 0 til 48 timer. Tabell 22 viser korrelasjonen (R^2 -verdi) mellom ventilasjonsvarme og utetemperatur i arbeidstid i de ulike vinter-månedene, hvor utetemperaturen er forflyttet fra TMA lik null til seks timer. Tabell 22 viser ikke alle timene frem til time 48, da korrelasjonen ikke er maksimal i noen av disse tilfellene.

Tabell 22 Temperature Moving Average (TMA)

TMA	Korrelasjon mellom ventilasjonsvarme og utetemperatur [-]				
	Januar	Februar	Mars	November	Desember
0 h	0,6444	0,8034	0,6569	0,5157	0,5277
1 h	0,6582	0,8143	0,6941	0,5255	0,5230
2 h	0,6752	0,8088	0,7062	0,5323	0,5216
3 h	0,6960	0,8000	0,6856	0,5209	0,5146
4 h	0,7072	0,7824	0,6442	0,4998	0,4990
5 h	0,7021	0,7637	0,5903	0,4685	0,4757
6 h	0,6911	0,7434	0,5364	0,4373	0,4582

Optimal tidsforsinkelse er basert på å finne maksimal korrelasjon mellom ventilasjonsvarmen og utetemperaturen. Når TMA er lik null er verdiene i tabell 22 de samme verdiene som i figur 46. Da er det ingen forflytning på utetemperaturen. Tabell 22 viser at det er større korrelasjon når ute-

temperaturen forflyttes for alle månedene, foruten om desember. Større R^2 -verdi indikerer bedre korrelasjon mellom TMA og ventilasjonsvarmen. Dette er en god indikasjon på at bygningens termiske masse påvirker energibruket, fordi bedre korrelasjon oppnås når TMA endres. For januar er korrelasjonen mellom ventilasjonsvarmen og utetemperaturen størst når TMA er lik 4 timer, for februar er det maksimal korrelasjon når TMA er lik 1 time og for mars og november er det maksimal korrelasjon når TMA er lik 2 timer.

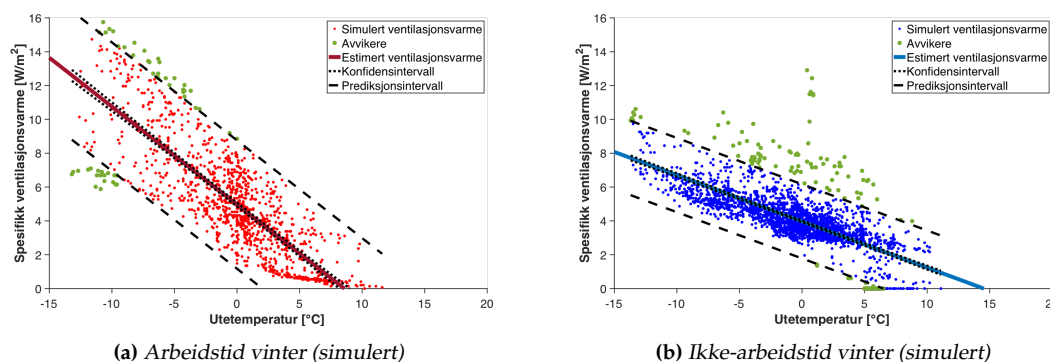
Analyse av standardavvik

På bakgrunn av delkapittel 2.12 kan prediksjons- og konfidensintervall utvikles for ventilasjonsvarme mot utetemperatur i arbeidstid fra figur 45a og ikke-arbeidstid i figur 45b. Tabell 23 viser hvilke verdier som er brukt i likning 7, likning 8 og likning 9 for å utvikle intervallene.

Tabell 23 Statistikk for konfidens- og prediksjonsintervall for ventilasjonsvarme mot utetemperatur (Kalibrert modell)

Beskrivelse	Statistikk	Arbeidstid Vinter	Ikke-arbeidstid Vinter
Estimert ventilasjonsvarme	\hat{y}	4,96-0,58x	3,97-0,27x
Standard feilverdi for estimert ventilasjonsvarme	$SE_{\hat{y}}$	1,93	1,12
Kvantil for 95%-intervall og 2 frihetsgrader	$t_{\alpha=0.05, v=2}$	1,96	1,96
Antall observasjonspaar	n	1100	2524
Gjennomsnittlig utetemperatur	\bar{x}	-0,38	-0,52

Figur 47 viser ventilasjonsvarmen mot utetemperaturen, inkludert 95%-prediksjonsintervall, 95%-konfidensintervall og avvikere fra prediksjonsintervallet, hvor figur 47a viser for arbeidstid vinter og figur 47b viser for ikke-arbeidstid vinter.

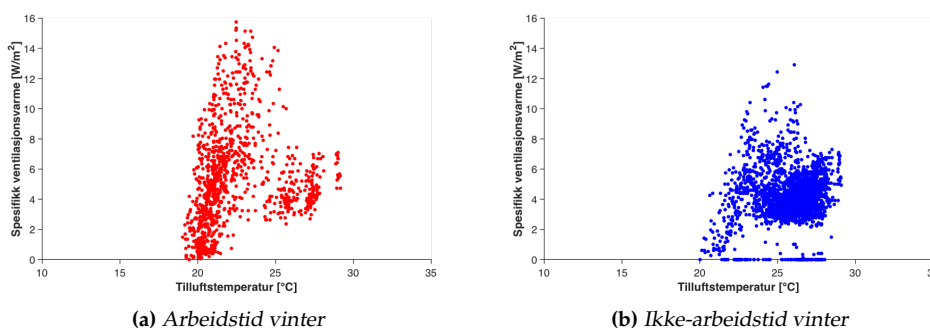


Figur 47 Konfidens- og prediksjonsintervall

Totalt er det 4,5% og 6,5% avvikere utenfor prediksjonsintervallet for henholdsvis arbeidstid og ikke-arbeidstid. Målet er å styre ventilasjonen bedre slik at punktene over øvre grense av prediksjonsintervallet kommer innenfor intervallet ved unødvendig energibruk. For ikke-arbeidstid er det noen avvikere som i større grad skiller seg ut med verdier på rundt 12 W/m². Dette skyldes at det er 23. desember, og selv om dette er i ikke-arbeidstid er det mindre interne laster som gir varmetilskudd. En tilsvarende analyse av alle avvikerne kunne blitt gjort. Oppsummert viser Energi-Temperatur-kurver at bygningen har potensial for effektreduksjon av ventilasjonsvarmen.

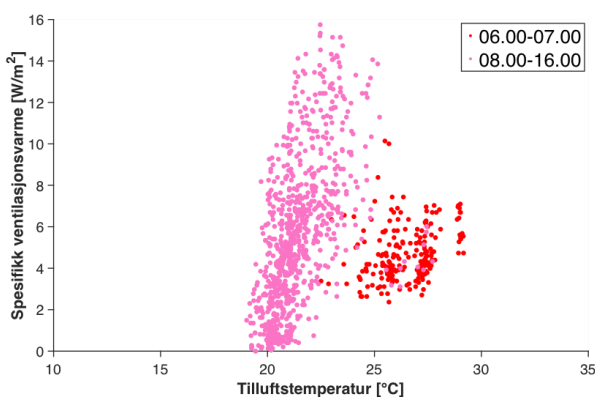
Ventilasjonsvarme mot tilluftstemperatur

Til nå har ventilasjonsvarmen mot utetemperaturen blitt analysert, og det neste er å analysere ventilasjonsvarmen mot tilluftstemperaturen. I den kalibrerte modellen brukes den samme målte gjennomsnittlige tilluftstemperaturen som settpunkt for aggregatene. Som beskrevet i delkapittel 3.5, er det antatt at det er nok tilgjengelig varme slik at settpunktet for tilluftstemperaturen oppnås. Dermed benyttes tilluftstemperaturen fra ett aggregat videre i oppgaven. Figur 48 viser ventilasjonsvarmen mot tilluftstemperaturen for vinteren, hvor figur 48a viser for arbeidstid og figur 48b viser for ikke-arbeidstid.



Figur 48 Ventilasjonsvarme mot tilluftstemperatur (Kalibrert modell)

Figur 48 viser at punktene splittes i to for arbeidstid, og dette studeres videre i figur 49. Figur 49 viser ventilasjonsvarmen mot tilluftstemperatur, hvor arbeidstid er separert i to tidsintervaller; 06.00-07.00 og 08.00-16.00.

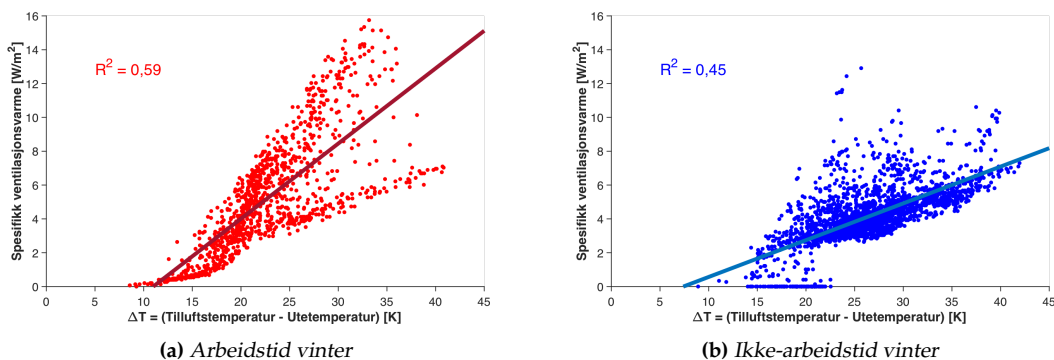


Figur 49 Ventilasjonsvarme mot tilluftstemperatur for separert arbeidstid vinter (Kalibrert modell)

Figur 49 viser en klar trend for de to tidsintervallene. Det er likevel ikke valgt å legge til lineære regresjoner av ventilasjonsvarmen mot tilluftstemperaturen, da det er flere avvikere. Figur 124 i vedlegg G viser at ventilasjonsvarme mot tilluftstemperatur også har samme trend for de to tidsintervallene for de ulike vinter-månedene. Tilluftstemperaturen vil bli analysert videre, hvor det i tillegg tas hensyn til utetemperaturen.

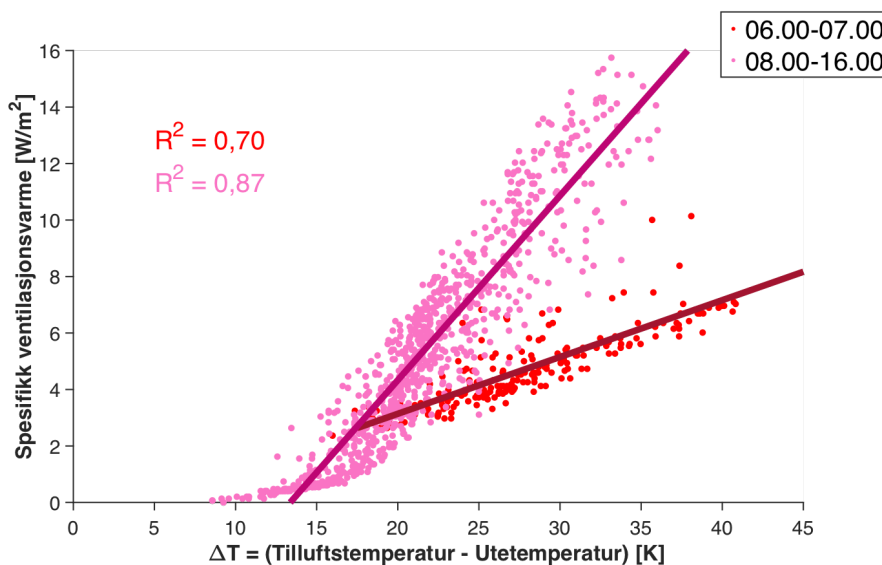
Ventilasjonsvarme mot differansen mellom tilluftstemperatur og utetemperatur

I dette underdelkapittelet studeres også hvordan differansen mellom tilluftstemperaturen og utetemperaturen påvirker ventilasjonsvarmen. Figur 50 viser ventilasjonsvarmen mot differansen mellom tilluftstemperatur og utetemperatur for vinteren, hvor figur 50a viser for arbeidstid og 50b viser for ikke-arbeidstid.



Figur 50 Ventilasjonsvarme mot differansen mellom tilluftstemperatur og utetemperatur for vinter (Kalibrert modell)

Figur 50 viser at punktene splittes i to for arbeidstid, og dette studeres videre i figur 51. Figur 51 viser ventilasjonsvarme mot differansen mellom tilluftstemperatur og utetemperatur når arbeidstid er separert i to tidsintervaller; 06.00-07.00 og 08.00-16.00.

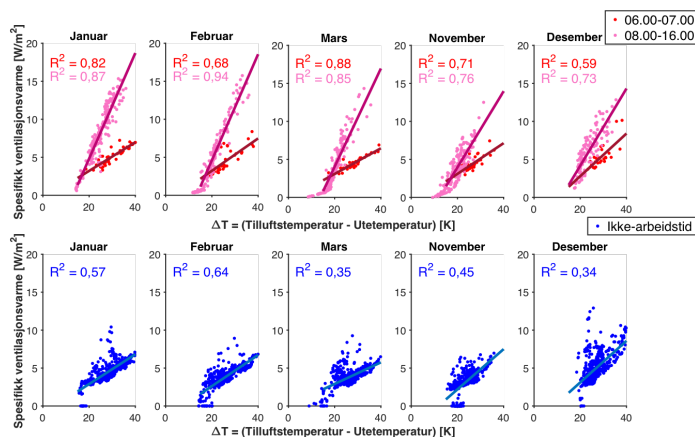


Figur 51 Ventilasjonsvarme mot differansen mellom tilluftstemperatur og utetemperatur for separert arbeidstid vinter (Kalibrert modell)

Figur 51 viser igjen en klar trend for de samme to tidsintervallene som for figur 49. Videre viser figur 51 at det er lavere ventilasjonsvarme ved større differanse mellom tilluftstemperatur og utetemperatur klokken 06.00 og klokken 07.00 sammenliknet med de resterende timene i arbeidstid

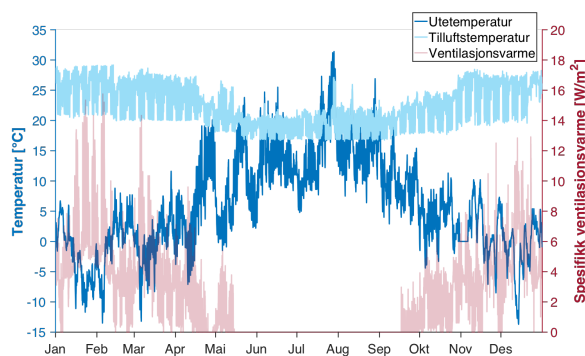
om vinteren. Dette skyldes at differansen mellom tilluftstemperatur og utetemperatur er størst klokken 06.00-07.00 for arbeidstid, men effekten for ventilasjonsvarmen har en tidsforsinkelse i forhold til tilluftstemperaturen som vil bli analysert i underdelkapittel 5.10.5, spesielt i figur 57b.

Figur 52 viser ventilasjonsvarme mot differansen mellom tilluftstemperatur og utetemperatur for de ulike vinter-månedene for arbeidstid og ikke-arbeidstid.



Figur 52 Ventilasjonsvarme mot differansen mellom tilluftstemperatur og utetemperatur for vinter-måneder (Kalibrert modell)

Figur 52 viser igjen at tilluftstemperaturen er delt i to for arbeidstid. Av den grunn er det hensiktsmessig å studere profiler for tilluftstemperaturen, og en analyse av profilene presenteres i underdelkapittel 5.10.5. Som en oppsummering viser figur 53 sammenhengen mellom ventilasjonsvarme, tilluftstemperatur og utetemperatur.

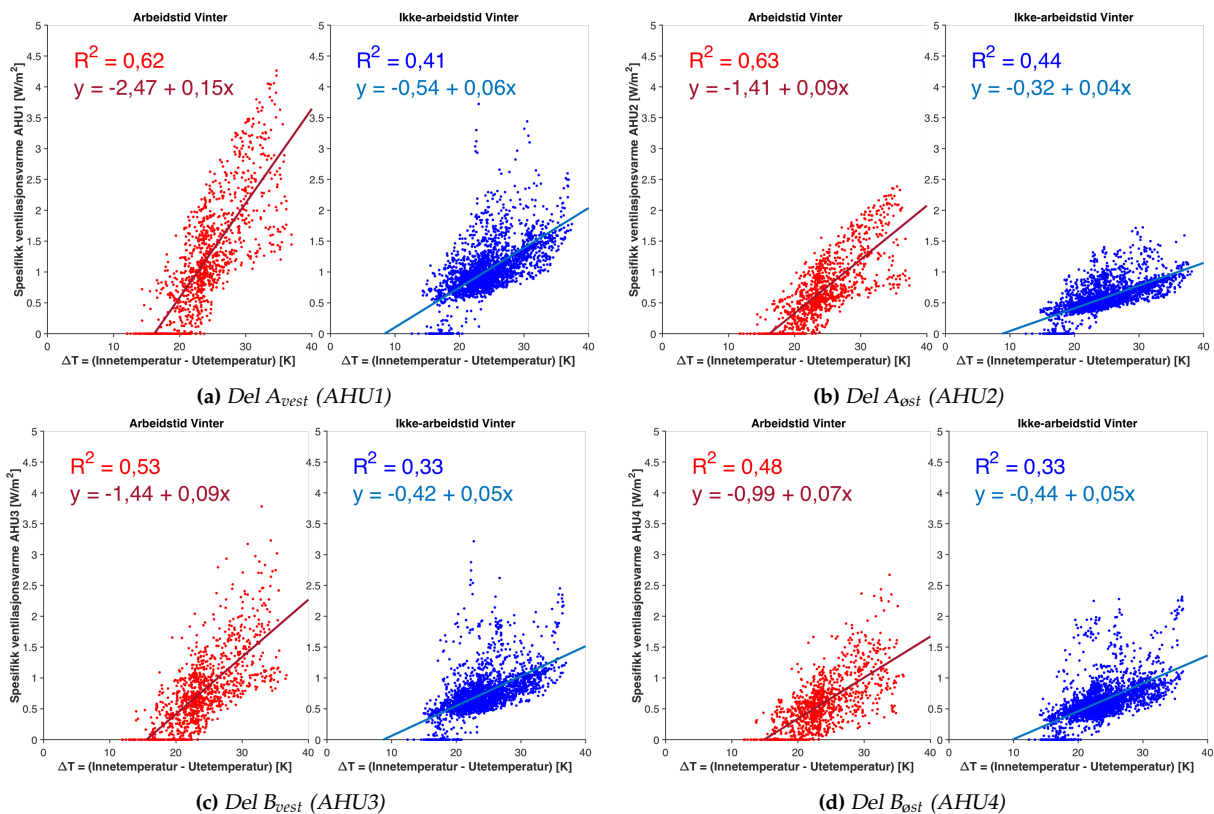


Figur 53 Ventilasjonsvarme, tilluftstemperatur og utetemperatur for 2019 (Kalibrert modell)

Figur 53 viser at ventilasjonsvarmen avhenger betydelig av differansen mellom tilluftstemperatur og utetemperatur, og dette blir tatt hensyn til ved utvikling av årlige scenarier.

Ventilasjonsvarme mot differansen mellom innetemperatur og utetemperatur

Det siste som studeres i dette underdelkapittelet er sammenhengen mellom ventilasjonsvarmen og differansen mellom innetemperaturen og utetemperaturen. Figur 54 viser ventilasjonsvarmen per ventilasjonsaggregat mot differansen mellom gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone tilkoblet dette aggregatet og utetemperatur. Figur 54 viser for vinter-månedene, og er delt mellom arbeidstid og ikke-arbeidstid. Figur 54a og figur 54b viser for del A, og figur 54c og figur 54d viser for del B.

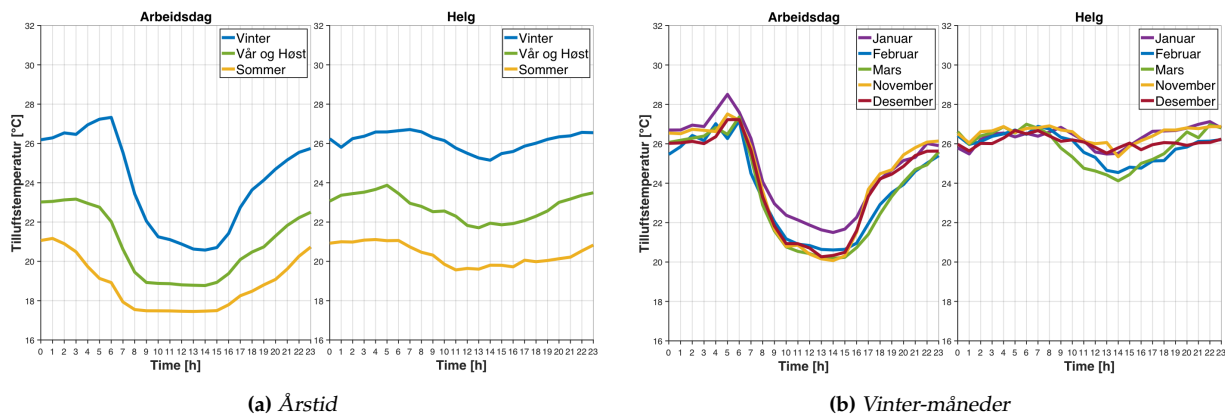


Figur 54 Ventilasjonsvarme per AHU mot differansen mellom gjennomsnittlig innetemperatur for hver sone og utetemperatur for vinter-måneder (Kalibrert modell)

Figur 54 viser at det er en lineær sammenheng mellom innetemperaturen og utetemperaturen, både for arbeidstid og ikke-arbeidstid. Figur 54a viser at spesifikk ventilasjonsvarme for aggregat AHU1 øker med $0,15 \text{ W/m}^2$ per 1 K for arbeidstid. For aggregat AHU2 og AHU3 øker spesifikk ventilasjonsvarme med $0,09 \text{ W/m}^2$ per 1 K for arbeidstid fra figur 54b og figur 54c. Figur 54d viser at spesifikk ventilasjonsvarme for aggregat AHU4 øker med $0,07 \text{ W/m}^2$ per 1 K for arbeidstid. En grundigere analyse av profiler av innetemperaturen fremstilles i underdelkapittel 5.10.6.

5.10.5 Profiler for tilluftstemperatur for kalibrert modell

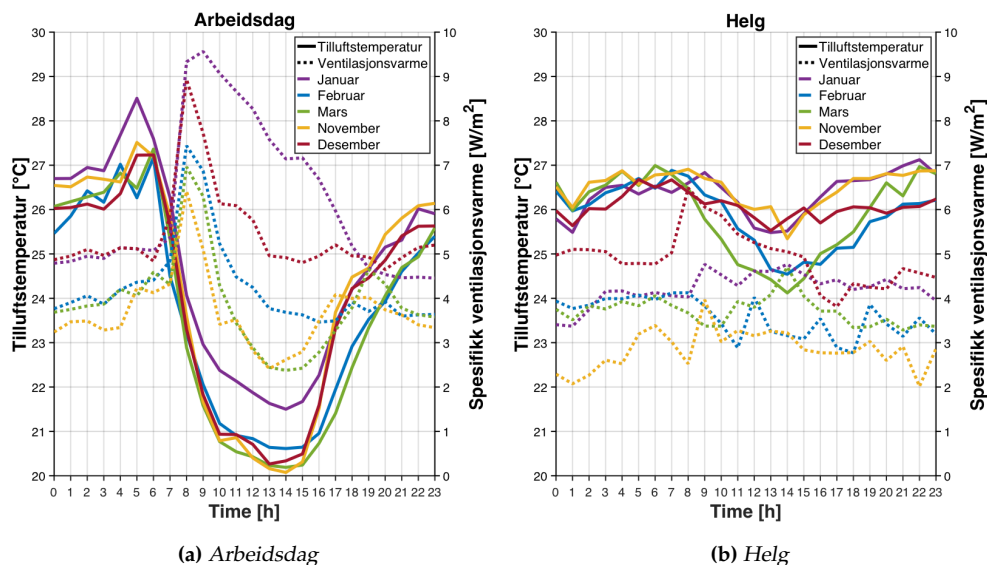
Figur 55 viser daglig profil av tilluftstemperaturen for arbeidsdag og helg, hvor figur 55a viser for de ulike årstidene og figur 55b viser for vinter-månedene. I den kalibrerte modellen brukes den samme målte gjennomsnittlige tilluftstemperaturen som settpunkt for aggregatene. Som tidligere beskrevet, er det antatt at det er nok tilgjengelig varme slik at settpunktet for tilluftstemperaturen oppnås. Dermed benyttes tilluftstemperaturen fra ett aggregat. I tillegg vil scenarioer som ikke har endringer i settpunktet for tilluftstemperaturen ha lik profil for tilluftstemperaturen som figur 55.



Figur 55 Daglig profil av tilluftstemperatur (Kalibrert modell)

Figur 55a viser at den høyeste tilluftstemperaturen i arbeidsdager om vinteren er klokken 06.00. I arbeidstid, som er fra 06.00 til 16.00, er den andre høyeste tilluftstemperaturen klokken 07.00. Dermed viser profilen av tilluftstemperatur i figur 55a til de separerte punktene klokken 06.00-07.00 i figur 49 som viser ventilasjonsvarme mot tilluftstemperatur. Profil av utetemperatur om vinteren i figur 129a i vedlegg G viser at utetemperaturen er lav klokken 06.00-07.00, og dermed blir differansen mellom tilluftstemperatur og utetemperatur større klokken 06.00-07.00. Dermed viser profilen av tilluftstemperatur 55a og profilen av utetemperatur til de separerte punktene i figur 51 som viser ventilasjonsvarme mot differansen mellom tilluftstemperatur og utetemperatur. Likevel er den høyeste effekttoppen for ventilasjonsvarmen i arbeidsdager om vinteren klokken 08.00 fra figur 39a. Av den grunn fremtrer effekttoppen for ventilasjonsvarmen to timer senere enn høyeste tilluftstemperatur i arbeidsdager om vinteren.

For figur 55b gjøres en grundigere analyse enn analysen av figur 55a. Figur 55b sammenliknes med figur 39b som viser daglig profil av ventilasjonsvarme for vinter-månedene. Dette er gjort i figur 56, som viser profiler av tilluftstemperatur og ventilasjonsvarme for arbeidsdag i figur 56a og for helg i figur 56b.



Figur 56 Profil av tilluftstemperatur (heltrukket linje) og profil av ventilasjonsvarme (stiplet linje) for vinter-måneder (Kalibrert modell)

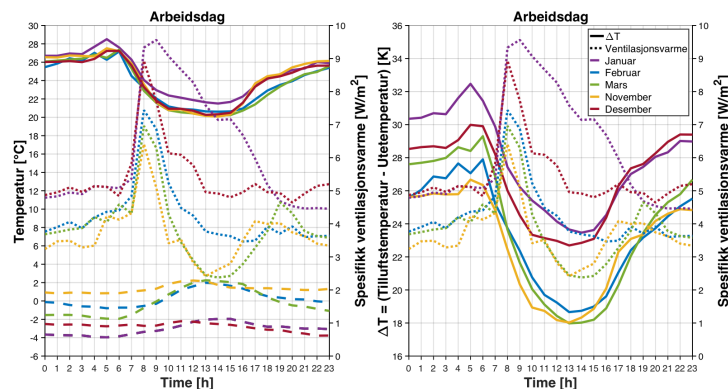
Figur 56 viser en klar tidsforsinkelse i toppene mellom høyeste tilluftstemperatur og ventilasjonsvarme for arbeidsdagene, og av den grunn studeres denne forsinkelsen videre. Tabell 24 viser klokkeslett for høyeste tilluftstemperatur og klokkeslett for effekttoppen for ventilasjonsvarmen for arbeidsdag fra figur 56a, samt tidsforsinkelsen mellom tilluftstemperaturen og ventilasjonsvarmen for vinter-månedene.

Tabell 24 Tidsforsinkelse mellom høyeste tilluftstemperatur og effekttopp for ventilasjonsvarme (Kalibrert modell)

Vinter-måned	Klokkeslett for høyeste tilluftstemperatur	Klokkeslett for effekttopp for ventilasjonsvarme	Tidsforsinkelse
Januar	05.00	09.00	4 h
Februar	06.00	08.00	2 h
Mars	06.00	08.00	2 h
November	05.00	08.00	3 h
Desember	06.00	08.00	2 h

Tabell 24 viser at januar har størst tidsforsinkelse på fire timer mellom tilluftstemperatur og ventilasjonsvarme. Denne tidsforsinkelsen er ikke det samme som termisk treghet (τ) i bygningen. Fra underdelkapittel 5.10.4 om ET-kurver ble det funnet at optimal korrelasjon mellom ventilasjonsvarme og utetemperatur er når TMA også er fire timer fra tabell 22. For februar er tidsforsinkelsen to timer, men optimal TMA er en time. For mars er både tidsforsinkelsen og optimal TMA to timer. For november er tidsforsinkelsen tre timer, men optimal TMA er to timer. For desember er tidsforsinkelsen to timer, men optimal TMA er null timer. Det er viktig å bemerke at TMA studerer hvordan forsinket utetemperatur påvirker ventilasjonsvarmen, og at beregningen er basert på arbeidstid. Tabell 24 derimot, gir en forsinkelse mellom tilluftstemperatur og ventilasjonsvar-

me, og beregningen er basert på profiler for arbeidsdag. Av den grunn studeres også profiler som inkluderer utetemperatur. Figur 57 viser profiler for tilluftstemperatur, ventilasjonsvarme og utetemperatur, hvor figur 57a viser det samme som figur 56a inkludert profiler for utetemperatur og figur 57b viser en profil av differansen mellom tilluftstemperatur og utetemperatur.



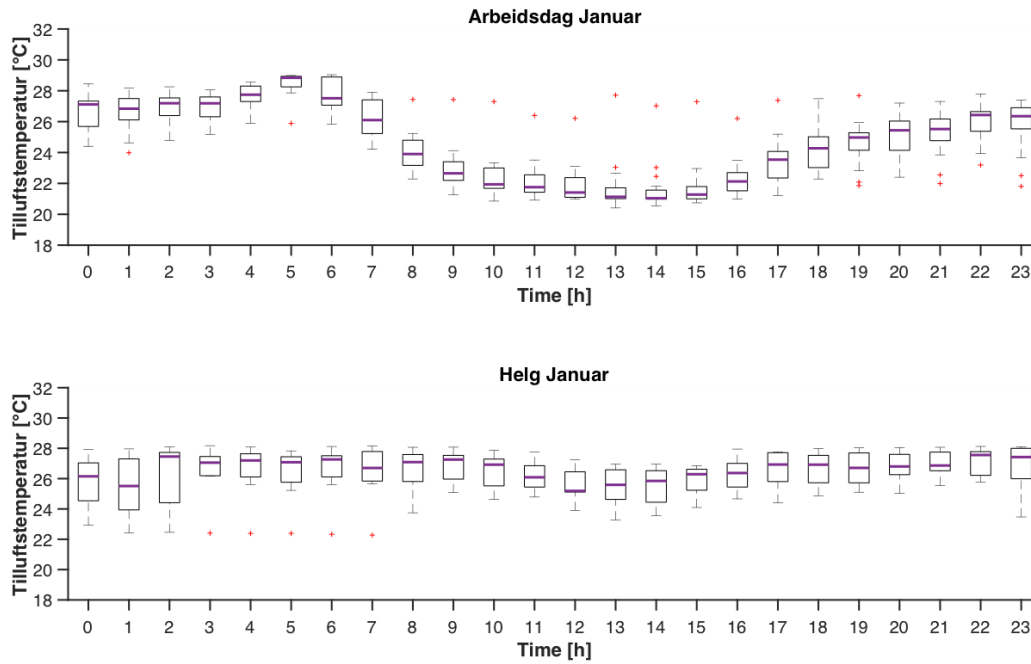
(a) Separerte profiler for tilluftstemperatur og utetemperatur (b) Profil av differansen mellom tilluftstemperatur og utetemperatur

Figur 57 Profiler for tilluftstemperatur, ventilasjonsvarme og utetemperatur for vintermånedene (Kalibrert modell)

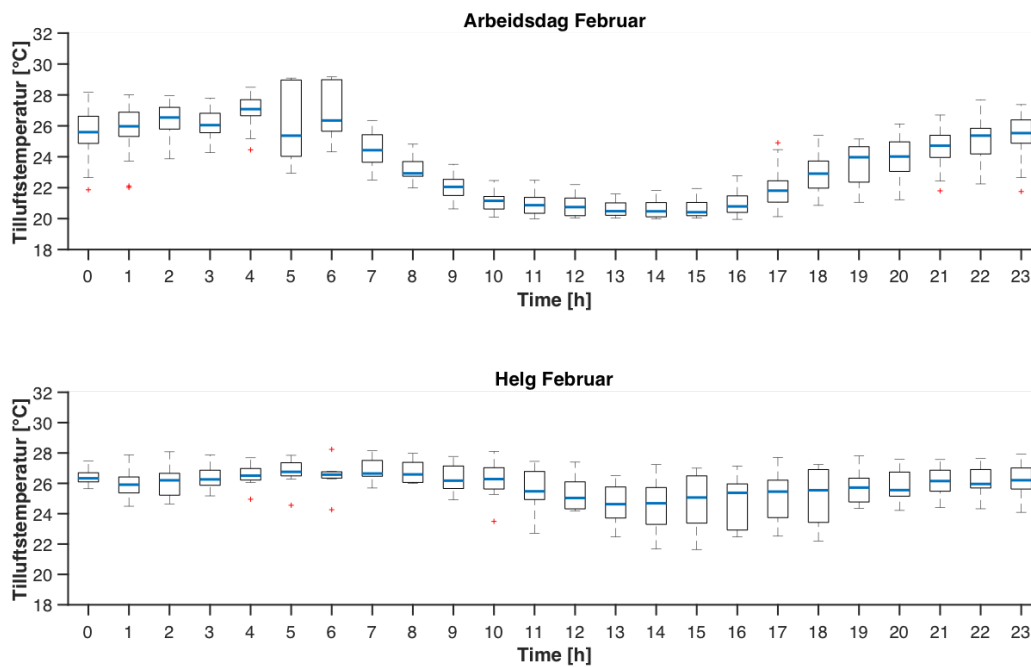
Figur 57a viser at utetemperaturen er høyest på dagen og lavest på natten, og at tilluftstemperaturen er lavest på dagen og høyest på natten. Ved å også ta utetemperaturen i betraktning som en differanse mellom tilluftstemperatur og utetemperatur, viser figur 57b den samme tidsforsinkelsen som tidsforsinkelsen mellom tilluftstemperatur og ventilasjonsvarme i figur 56a. Dette er med unntak av desember, som har en neglisjerbar høyere differanse mellom tilluftstemperatur og utetemperatur klokken 05.00, og ikke klokken 06.00 som i tabell 24. Fra underdelkapittel 5.10.4 ble det observert lavere ventilasjonsvarme ved høyere differanse mellom tilluftstemperatur og utetemperatur klokken 06.00 og klokken 07.00 sammenliknet med de resterende timene i arbeidstid om vinteren. Dette blir nå bekreftet i figur 57b.

Det er viktig at profilen av tilluftstemperaturen for januar er representativ for hver dag i januar, og tilsvarende for de andre vinter-månedene. Av den grunn vil avvik i tilluftstemperaturen for den enkelte dag i gjeldende måned bli analysert gjennom bokplott av tilluftstemperaturen. Figur 58, figur 59, figur 60, figur 61 og figur 62 viser bokplott av tilluftstemperatur for kalibrert modell for henholdsvis januar, februar, mars, november og desember. I figurene 58-62 er det brukt 0,25-, 0,50- og 0,75-kvantiler. Det er laget en boks som strekker seg fra den empiriske 0,25-kvantilen til den empiriske 0,75-kvantilen, og boksen har en tversgående linje som representerer medianen i datasettet. Medianen tilsvarer 0,50-kvantilen. I tillegg er det to linjer utenfor boksen som representerer minimum og maksimum verdi i datasettet, ekskludert avvikere. Minimum verdi tilsvarer 0-kvantilen og maksimum verdi tilsvarer 100-kvantilen. Avvikere er markert med et rødt kryss, og ligger utenfor intervallet gitt av minimum og maksimum verdi. Disse avvikerne er definert som verdiene som går ut til de mest ekstreme observasjonene som ligger nærmere boksen enn 1,5

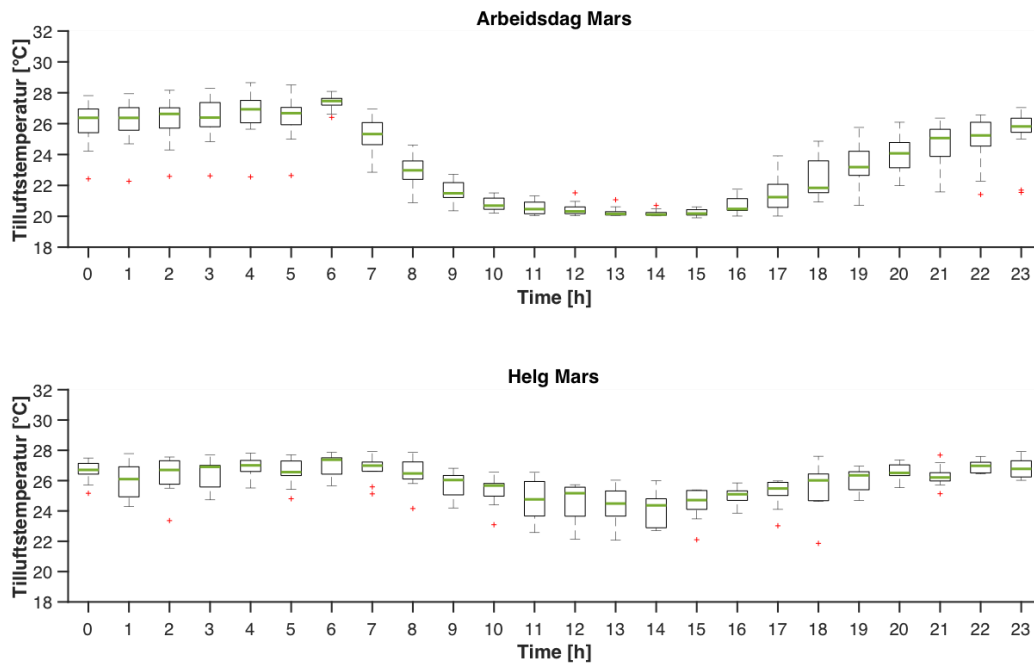
ganger kvartildifferansen.



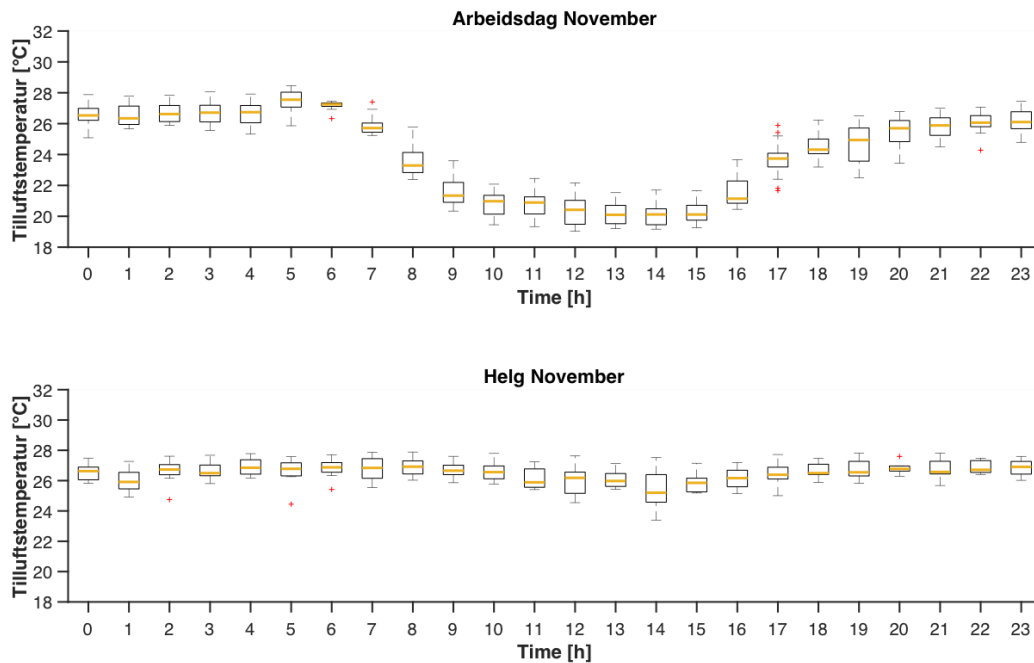
Figur 58 Boksplott av tilluftstemperatur for januar (Kalibrert modell)



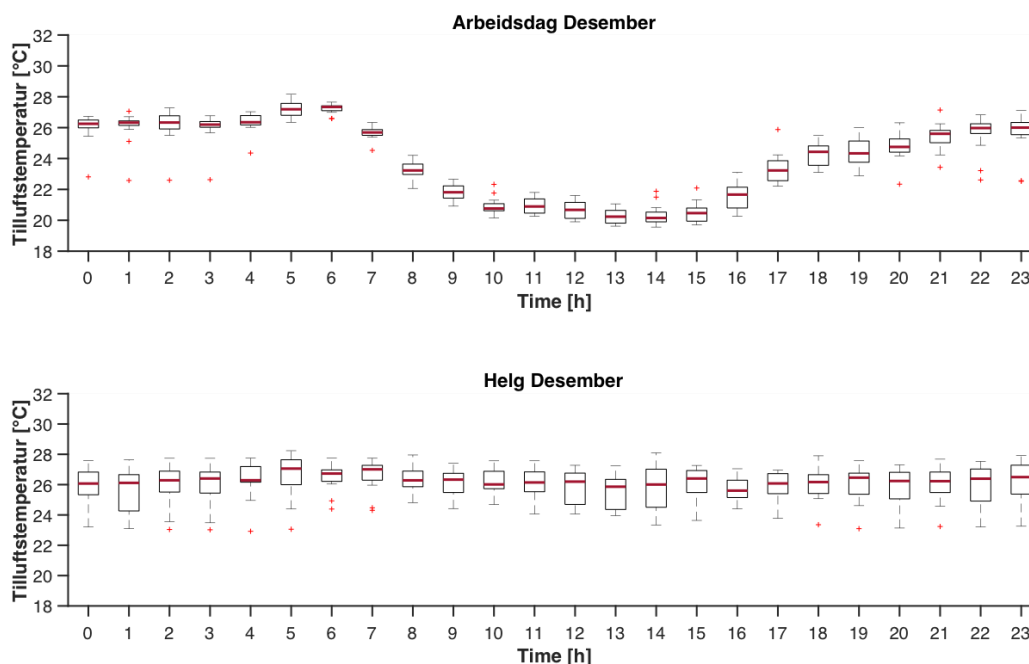
Figur 59 Boksplott av tilluftstemperatur for februar (Kalibrert modell)



Figur 60 Bokplott av tilluftstemperatur for mars (Kalibrert modell)



Figur 61 Bokplott av tilluftstemperatur for november (Kalibrert modell)



Figur 62 Boksploott av tilluftstemperatur for desember (Kalibrert modell)

Generelt viser figurene 58-62 at profilene av tilluftstemperaturene for de ulike månedene er representativ for den bestemte måneden. Jo tettere boks og mindre intervall for minimum og maksimum verdi, jo mer representativ er profilene. Det er likevel avvikere, som tyder på at enkelte dager i de ulike månedene har andre tilluftstemperaturer. Dette er også naturlig, da den målte tilluftstemperaturen som er brukt som input i den kalibrerte modellen er beregnet fra samlet varme- og/eller kjølebehov i den reelle bygningen. Tilsvarende boksploott av ventilasjonsvarmen i de ulike vintermånedene er gitt i vedlegg G.

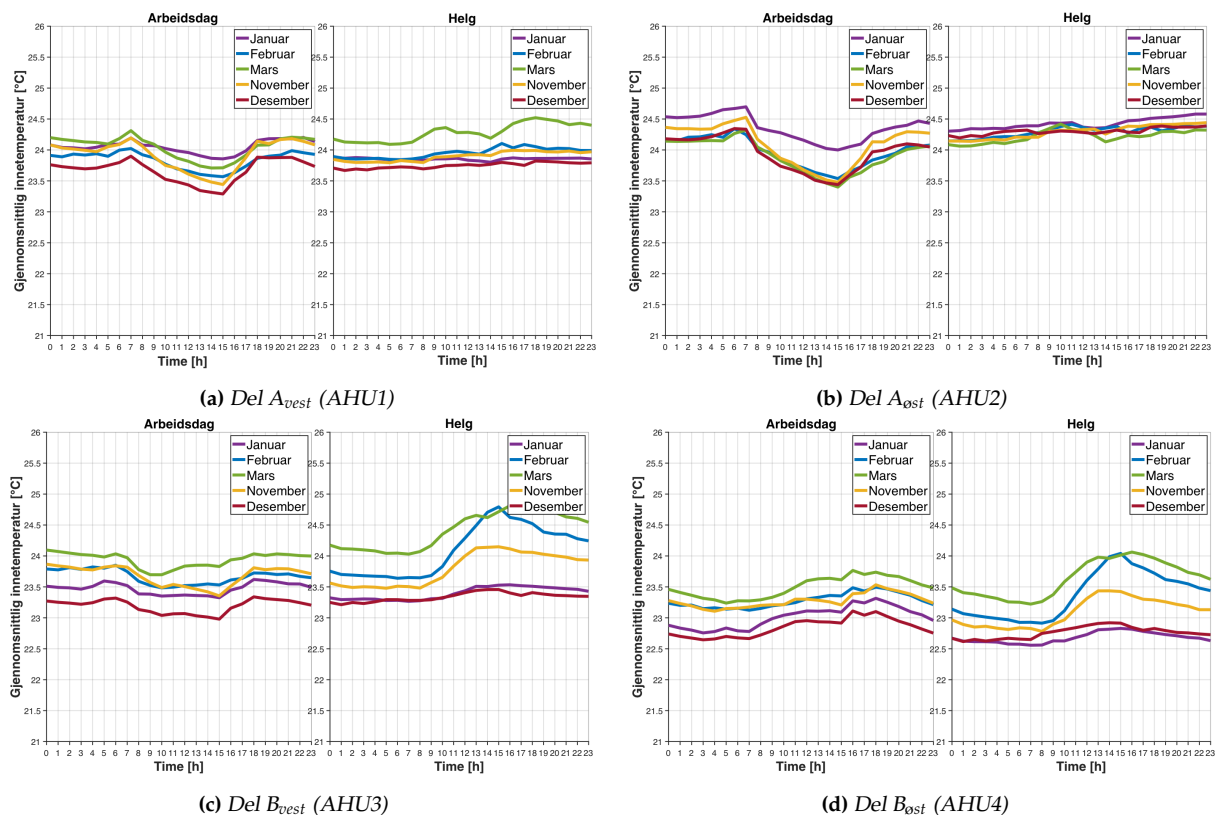
Oppsummert viser profiler av tilluftstemperaturen at bygningen har potensial for effektreduksjon av ventilasjonsvarmen. Profilene av tilluftstemperaturen vil i stor grad benyttes videre for forståelse av innetemperatur og luftmengde i den kalibrerte modellen i underdelkapittel 5.10.6 og for de ulike scenarioene i underdelkapittel 5.11.2. I tillegg brukes profilene av tilluftstemperaturen i enkelte av scenarioene for effektreduksjon.

5.10.6 Årlig inn klima for kalibrert modell

Analyse av årlig inn klima inkluderer resultater av innetemperatur og luftmengde. Det fokuseres på vinter, men resultater av innetemperatur og luftmengde for vår/høst og sommer er gitt i vedlegg G. Det er viktig å være klar over at temperaturfordelingen kan være dårlig i kalibrert modell, og det er kun én tilluftstemperatur som tilføres rom tilkoblet samme aggregat. Disse rommene kan ha samtidig varme- og kjølebehov. For presentasjonen av årlig inn klima brukes profiler, som er gjennomsnittet av hver time i en bestemt periode. Årsaken til dette er at all data om innetemperatur i hvert rom for hver time i løpet av et år blir strukturert ved å dele inn i arbeidsdag/helg og ulike måneder. Tilsvarende gjelder for luftmengde. Det er viktig å bemerke at det vil være avvikere for profilene. Analysen av årlig inn klima fokuserer på arbeidsdager.

Innetemperatur for kalibrert modell

Figur 63 viser profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone for kalibrert modell, hvor figur 63a og figur 63b viser for del A og figur 63c og figur 63d viser for del B. Figurene er delt inn i arbeidsdag og helg, og viser profiler for de ulike vinter-månedene.



Figur 63 Profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone (Kalibrert modell)

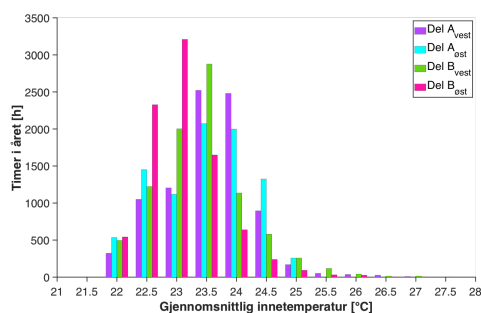
Sammenliknes figur 63 med profiler av gjennomsnittlig målt innetemperatur fra figur 22, er innetemperaturen i kalibrert modell høyere for bygningsdel A, mens innetemperaturene er like-

re for bygningsdel B. Det er kun månedene januar, februar og mars som sammenlignes, da alle målingene for innnetemperaturen for den reelle bygningen mangler for november og desember. Hovedårsaken til at simulert og målt profil av innnetemperatur er ulik skyldes at den kalibrerte modellen er kalibrert ved å sammenlikne simulert og reell romoppvarming, og settpunktet for tilluftstemperaturen og interne laster påvirker innnetemperaturen i stor grad. I tillegg påvirker VAV temperatur- og CO₂-reguleringen innnetemperatur, og dette analyseres når luftmengde presenteres.

Figur 63 viser at profilen av den gjennomsnittlige innnetemperaturen for arbeidsdagene ligger mellom 23,3°C og 24,3°C for del A_{vest}, mellom 23,4°C og 24,7°C for del A_{øst}, mellom 23,0°C og 24,1°C for del B_{vest} og mellom 22,6°C og 23,8°C for del B_{øst}. Generelt har del A_{vest} høyest gjennomsnittlig innnetemperatur for profilen, mens del B_{øst} har lavest gjennomsnittlig innnetemperatur for profilen. Dette kan skyldes at del A_{vest} har høyest tilstedeværelse fra tabell 16, men det er del B_{vest} som har lavest tilstedeværelse i tillegg til lavest belysning fra tabell 16. Dette blir også bekreftet i vedlegg B som viser tidsplanene for interne laster. Likevel har del B_{øst} lavest profil for gjennomsnittlig innnetemperatur, og dette kan skyldes at denne delen har flere overflater mot utsiden.

Videre viser figur 63 at profilen av innnetemperatur er senket i arbeidstid for del A_{vest}, del A_{øst} og del B_{øst}. Dette skyldes at tilluftstemperaturen er lavere i arbeidstid og høyere i ikke-arbeidstid fra figur 55b, i tillegg til at det brukes høyere luftmengde i arbeidstid. Lavere tilluftstemperatur i arbeidstid skyldes at det ønskes både forvarming av innnetemperaturen og interne laster for å oppnå settpunktet for innnetemperatur i arbeidstid. På dagen er profil av tilluftstemperatur fra figur 55b som regel lavere enn profil av innnetemperatur fra figur 63, og da brukes maksimum settpunkt på 23°C fra figur 10b på dagen. På natten er profil av tilluftstemperatur som regel høyere enn profil av innnetemperatur, og da brukes minimum settpunkt på 22-22,5°C fra figur 10a på natten. Dermed er det i stor grad for høye innnetemperaturer dersom profiler studeres. Likevel er det viktig å bemerke at det er profilen av gjennomsnittlig innnetemperatur som sammenlignes med settpunktet for innnetemperaturen, og dersom innnetemperaturen for hvert rom analyseres er det både rom som har for høy, for lav og oppnådd innnetemperatur ved ulike tidspunkt i løpet av vinter-månedene.

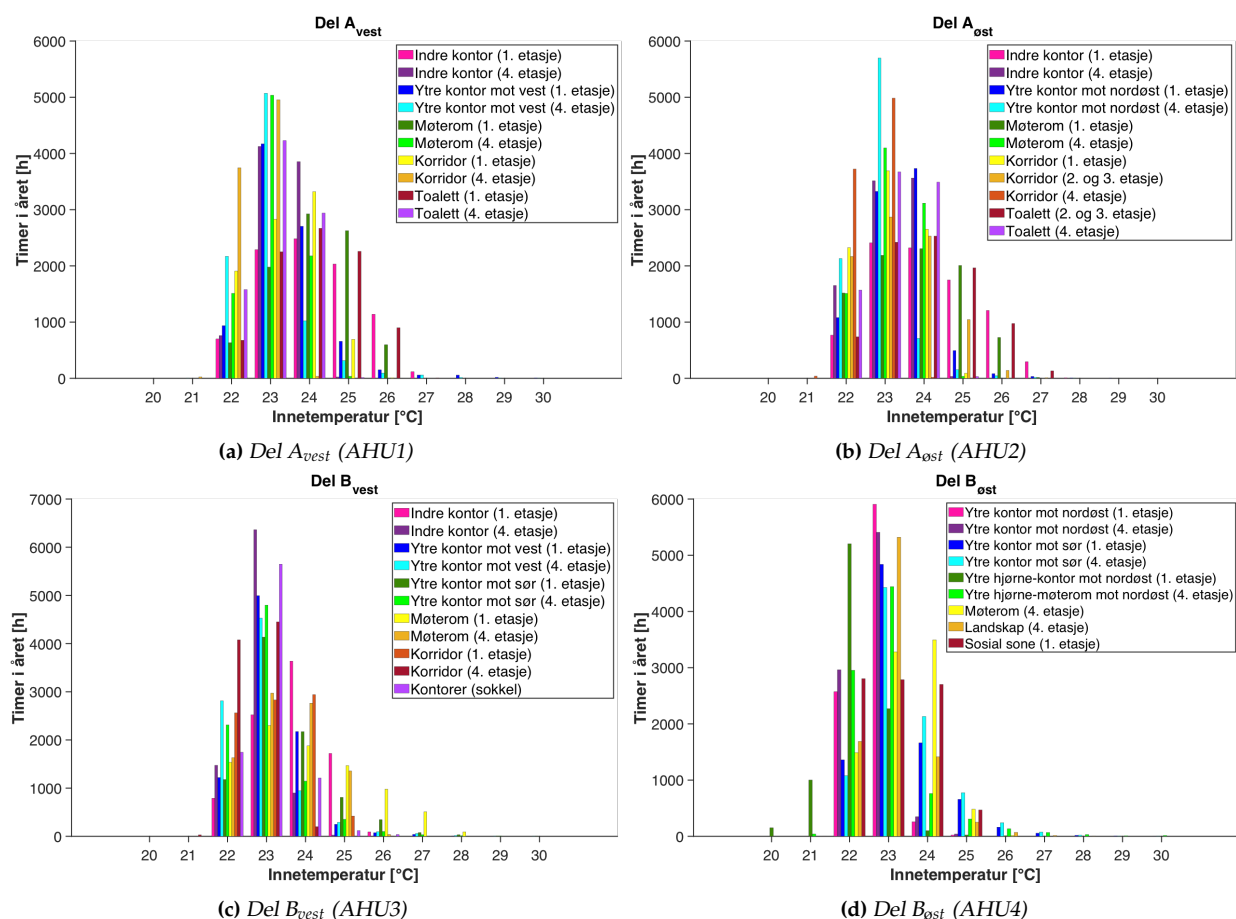
Av den grunn blir innnetemperaturen på romnivå også analysert. Figur 64 viser antall timer i løpet av året med gjennomsnittlig innnetemperatur av hvert rom i de ulike sonene for kalibrert modell.



Figur 64 Antall timer i løpet av året med gjennomsnittlig innnetemperatur av hvert rom i hver sone (Kalibrert modell)

Generelt viser figur 64 at bygningsdel B_{ost} har lavest inne-temperaturer i løpet av året, og dette skyldes flere overflater mot utsiden. Deretter følger generelt bygningsdel B_{vest} , som har lavest tilstedeværelse og belysning. Bygningsdel A_{vest} har generelt høyest inne-temperaturer, og skyldes høy tilstedeværelse, høy belysning og at denne delen vender mot sørvest. Figur 64 viser for hele året, og skiller dermed ikke mellom arbeidstid og ikke-arbeidstid, og mellom de ulike sesongene. Det som kunne ha vært av større interesse er å kun ha arbeidstid vinter langs tidsaksen. Grunnen til at arbeidstid er av større interesse er at det er ved denne tiden at inne-temperaturen har betydning for komforten til personene i bygningen. Videre er vinter av større interesse, først og fremst da det er ventilasjonsvarmen som analyseres i størst grad, i tillegg til at en overflate som et vindu kan gi lavere inne-temperatur om vinteren og høyere inne-temperatur om sommeren.

Figur 65 viser antall timer i løpet av året med inne-temperatur for hvert rom for kalibrert modell. Figur 65a og figur 65b viser for bygningsdel A, og figur 65c og figur 65d viser for bygningsdel B.



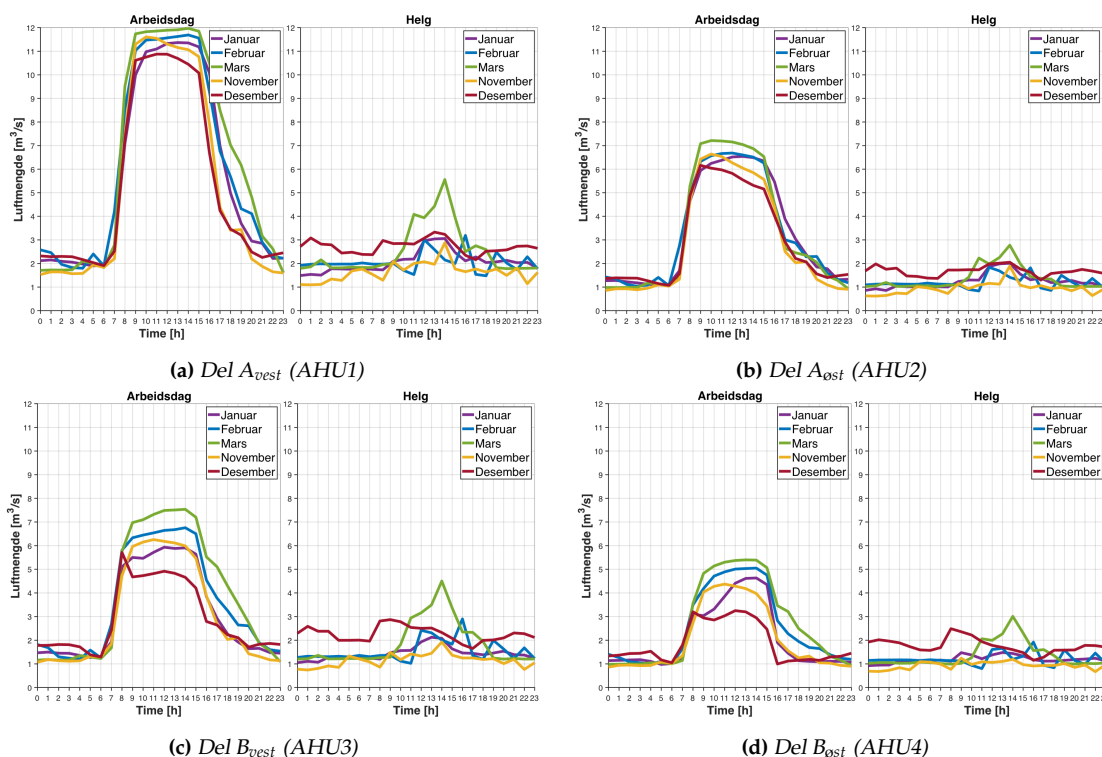
Figur 65 Antall timer i løpet av året med inne-temperatur for hvert rom (Kalibrert modell)

Generelt viser figur 65 at indre kontor har høyere inne-temperaturer enn ytre kontor, og skyldes at ytre kontor har overflater mot utsiden. Rom mot nord har lavere inne-temperaturer enn rom mot sør, og skyldes at overflater mot sør får større varmetilskudd fra solinnstråling enn overflater mot

nord i Norge. Hjørne-kontor og -møterom har lavere innetemperaturer, og skyldes flere overflater mot utsiden. Møterom har høyere innetemperaturer, og skyldes at de fleste møterom er indre rom og er okkupert med flere personer. Det samme gjelder for landskap og sosial sone. Korridorer har lavere innetemperaturer, og skyldes mindre personer og ingen teknisk utstyr. Toalett har ofte høyere innetemperaturer, og skyldes at dette er indre rom. Videre har 1. etasje høyere innetemperaturer enn 4. etasje, og skyldes at 4. etasje grenser mot utsiden. Sokkel har lavere innetemperaturer, og skyldes at etasjen grenser til kald parkeringskjeller, og at sokkelen har mange overflater mot utsiden. Til slutt har bygningsdel $B_{\text{øst}}$ lavere innetemperaturer enn de andre delene.

Luftmengde for kalibrert modell

Figur 66 viser profil av luftmengde til hver sone for kalibrert modell, hvor figur 66a og figur 66b viser for bygningsdel A og figur 66c og figur 66d viser for bygningsdel B. Figurene er delt inn i arbeidsdag og helg, og viser profiler for de ulike vinter-månedene.



Figur 66 Profil av luftmengde til hver sone (Kalibrert modell)

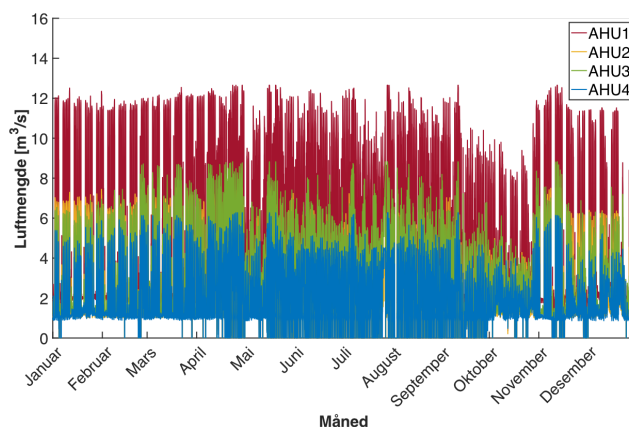
På dagen viser figur 66 at det er høyere luftmengde for alle delene. For å forklare årsaken til dette tas det utgangspunkt i figur 66a for aggregat AHU1. I forklaringen antas det at CO_2 -nivået er under maksimalt settpunkt for CO_2 -nivå, da dette i stor grad er tilfelle for alle rom til enhver tid. Siden tilluftstemperaturen i figur 55b som regel er lavere enn innetemperaturen i figur 63a på dagen, tilsvarer settpunktet for innetemperatur settpunktet for kjøling gitt i figur 10b på dagen. Årsaken til at luftmengdene er høyere på dagen skyldes at innetemperaturen som regel er høyere

enn settpunktet for innetemperaturen på dagen. Da vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen åpne til maksimum settpunkt for luftmengde for å kjøle ned den for høye inneluften ved hjelp av kaldere tilluft. Eventuelle interne laster og solinnstråling gir varmetilskudd på dagen.

På natten viser figur 66 at det er lavere luftmengde for alle delene. For å forklare dette tas det igjen utgangspunkt i figur 66a. På natten er tilluftstemperaturen som regel høyere enn innetemperaturen, og da tilsvarer settpunktet for innetemperatur settpunktet for oppvarming gitt i figur 10a på natten. Årsaken til at luftmengdene er lavere på natten skyldes at innetemperaturen som regel er høyere enn settpunktet for innetemperaturen på natten. Da vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen stenge til minimum settpunkt for luftmengde for å i minst mulig grad dra nytte av varm tilluft siden innetemperaturen allerede er høyere enn settpunktet for innetemperaturen.

VAV temperatur- og CO₂-reguleringen har den ulempen at dersom settpunktet for oppvarming er nådd i et rom og tilluftstemperatur er høyere enn innetemperatur, vil tilluftstemperaturen uansett gi varmetilskudd til rommet. Dette skyldes at luftmengdene har et minimum settpunkt for luftmengde, og kan ikke stenges fullstendig. Dersom tilluftstemperatur er lavere enn innetemperatur og settpunktet for kjøling er nådd i et rom, vil tilluftstemperaturen uansett gi kjøletilskudd til rommet. Dette skyldes minimum settpunkt for luftmengde. Som tidligere skrevet er innetemperaturen generelt for høy i kalibrert modell. Årsaken er at tilluftstemperaturen ikke styres på en hensiktsmessig måte, hvor settpunkt for tilluftstemperatur ikke tar hensyn til interne laster og varmebalanse i bygningen. Ved gitt tilluftstemperatur regulerer VAV temperatur- og CO₂-reguleringen så optimalt som mulig for å oppnå settpunkt for innetemperatur og eventuelt CO₂-nivå.

Til slutt viser figur 66 en liknende form som den daglige profilen av spesifikk effekt for pumper og vifter i figur 40. Dette skyldes at vifteeffekten er avhengig av luftmengden. Fra figur 66 blir det også observert at aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 henholdsvis har maksimal luftmengde på omtrent 12 m³/s, 7 m³/s, 8 m³/s og 5 m³/s. Disse verdiene gjelder for profiler for luftmengden, og av den grunn gir figur 67 luftmengdene fra aggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for den kalibrerte modellen. Luftmengdene er plottet oppå hverandre i figur 67.

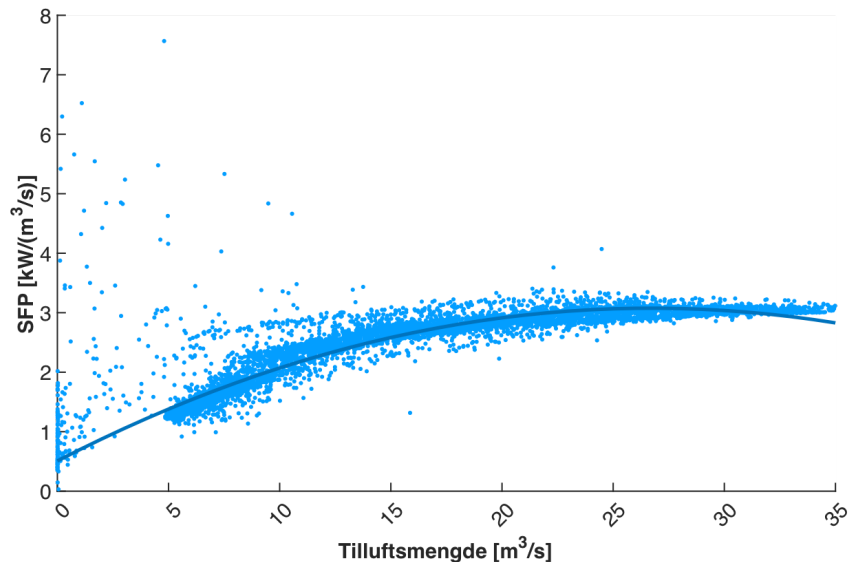


Figur 67 Luftmengde fra aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 (Kalibrert modell)

Ved å sammenlikne simulerte luftmengder fra figur 67 med målte luftmengder fra figur 23, er luftmengdene høyere i kalibrert modell enn i reell bygning. Luftmengdene er avhengig av inne-temperatur i tillegg til maksimalt CO₂-nivå i kalibrert modell. Da tilluftstemperaturen ikke styres på en hensiktsmessig måte i kalibrert modell, vil luftmengdene i kalibrert modell avvike fra reelle luftmengder. Interne laster er heller ikke like i kalibrert modell og reell bygning, og dette kan gjøre en stor forskjell på luftmengdene. Høyere luftmengder betyr at det kan være lavere CO₂-nivå i kalibrert modell, men CO₂-nivået avhenger av forurensning fra personer, materialer, produkter og installasjon. I tillegg er ikke default-verdier for regulatorparametere i kalibrert modell nødvendigvis like som for spjeldene og tilluftsventilene i den reelle bygningen. Dette gjelder PI-regulatoren for oppvarming og kjøling, og P-regulatoren for CO₂-nivå i den kalibrerte modellen.

5.10.7 Spesifikk vifteeffekt for kalibrert modell

Ved bruk av likning 1 er total SFP beregnet for aggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for kalibrert modell. Det er brukt summen av timesverdier for elektrisk effekt til viftene for å beregne total SFP. Videre er det brukt timesverdier for brutto tilluftsmengde fra de fire aggregatene fra figur 67 for å beregne SFP. Figur 68 viser total spesifikk vifteeffekt (SFP) mot tilluftsmengde for de fire aggregatene for kalibrert modell. Figur 68 er konstruert ved å bruke timesverdier i løpet av hele året, og det skilles ikke mellom i driftstid og utenfor driftstid.



Figur 68 Spesifikk vifteeffekt mot tilluftsmengde (Kalibrert modell)

Fra figur 68 kan det observeres at total SFP er omtrent 3 kW/(m³/s) ved høyere tilluftsmengde. Sammenliknet med målt total SFP på 6 kW/(m³/s) i figur 25, er total SFP lavere i kalibrert modell. Punkter som avviker fra regresjonen er som regel utenfor driftstid, og brukes ikke for å sammenlikne med kravet for SFP fra tabell 1.

Teoretisk kan det forventes at SFP-kurven i figur 68 har form som en systemkarakteristikk, som viser hvordan trykket i ventilasjonssystemet endres med luftmengden. SFP kan beregnes som totaltrykkfall dividert med viftesystemets totale virkningsgrad fra likning 3. Totaltrykkfall beregnes ved å multiplisere en proporsjonalfaktor med luftmengden opphøyd i en eksponent fra likning 4. For laminær strømning er denne eksponenten 1, mens for turbulent strømning er denne eksponenten 2. For figur 68 er denne eksponenten mindre enn 1 siden formen er buet nedover og ikke oppover ved høyere luftmengde. Likevel er ikke formen buet nedover i stor grad.

Årsaken til at resultatene i figur 68 er annerledes enn hva som kan forventes, kan være at figur 68 viser en samlet SFP for hele bygningen for de fire ventilasjonsaggregatene og ikke for hvert aggregat. Figur 67 viser at luftmengdene fra de forskjellige aggregatene er ulike avhengig av maksimal belastning for aggregatene og tilstedeværelse i sonene. Driften til aggregatene er gitt i tabell 15. Dette kan påvirke at bidraget fra hvert aggregat til en samlet SFP ikke er likt, og dermed blir ikke SFP-karakteristikken som det teoretisk forventes. I tillegg beregner ikke IDA ICE detaljert trykktap. I kalibrert modell er det brukt en ASHRAE modell for vifte som tar hensyn til trykkdifferanse og virkningsgrad til vifte avhengig av volummengde og ønsket trykkdifferanse over vifte.

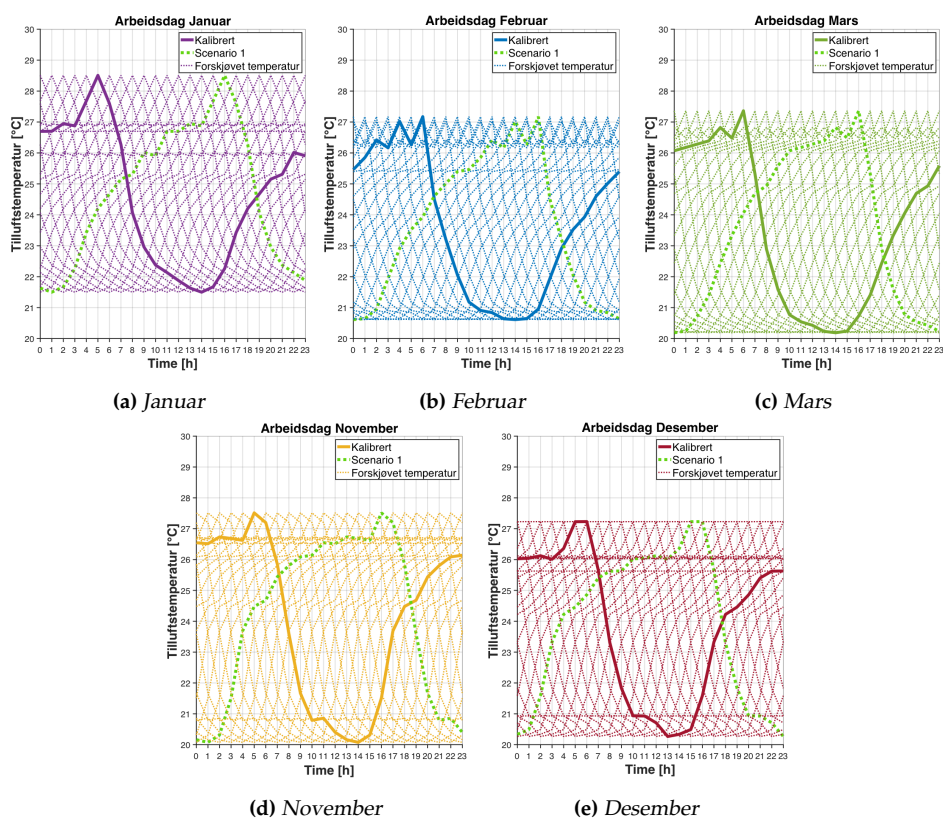
I utgangspunktet vil lavere kurve for SFP gi et mer energieffektivt ventilasjonssystem. Likevel er det viktig å bemerke at det er prosjektering av ventilasjonsanlegget, gjennom redusert totaltrykkfall over anlegget og økt total virkningsgrad for viftesystemet, som er avgjørende for et energieffektivt ventilasjonssystem. Dette gir lavere vifteeffekt, og dermed mindre energi. Ved å redusere den elektriske effekten til viftene vil SFP reduseres, og dette vil studeres i de ulike scenarioene. Vifteeffekten er avhengig av luftmengden og driften til ventilasjonsaggregatene gitt i tabell 15. I denne oppgaven går vifter under energiposten pumper og vifter.

5.11 Scenarier for reduksjon av effekttopper for året

I dette delkapittelet vil energibruk for ventilasjonsvarme og pumper og vifter presenteres og analyseres for scenarioene for hele året. I tillegg vil det studeres årlig inn klima for de ulike scenarioene. Når det gjelder scenario 1 er dette scenarioet utviklet på bakgrunn av resultater fra den kalibrerte modellen. Av den grunn blir også disse resultatene presentert i dette delkapittelet.

Scenario 1 - Forskjøvet profil for tilluftstemperatur

Figur 69 viser profiler av tilluftstemperaturen for arbeidsdag i de fem vinter-månedene, hvor figur 69a viser for januar, figur 69b viser for februar, figur 69c viser for mars, figur 69d viser for november og figur 69e viser for desember. Heltrukne linjer er profiler for tilluftstemperaturen fra kalibrert modell, og tilsvarer dermed profilene i figur 55b. Stiplede linjer er forskjøvet profil for tilluftstemperatur i forhold til den kalibrerte modellen. Dermed vil høyeste tilluftstemperatur, med bakgrunn i at det er 24 timer i døgnet, totalt opptre 24 ganger på grunn av denne forskyvningen. Figur 69 gir med andre ord 120 ulike profiler for tilluftstemperaturen.



Figur 69 Profil av tilluftstemperatur for kalibrert modell (heltrukket linje) og forskyvning i forhold til den kalibrerte modellen (stiplet linje) (Scenario 1)

Med utgangspunkt i figur 69 er det utviklet 120 ulike simuleringer; fem ulike måneder og 24 ulike tilfeller for høyeste tilluftstemperatur per måned. Tabell 25 viser resultatene fra de 120 simuleringene. Resultatene i tabell 25 består av høyeste effekttopp for ventilasjonsvarmen for hver måned,

som har en profil for tilluftstemperaturen fra figur 69 med høyeste tilluftstemperatur ved et bestemt klokkeslett gitt i tabell 25.

Tabell 25 Høyeste effekttopp for ventilasjonsvarmen ved 24 ulike profiler for tilluftstemperatur for hver vinter-måned (Scenario 1)

Klokkeslett for høyeste tilluftstemperatur [-]	Høyeste effekttopp for januar [kW]	Høyeste effekttopp for februar [kW]	Høyeste effekttopp for mars [kW]	Høyeste effekttopp for november [kW]	Høyeste effekttopp for desember [kW]
Kalibrert	227	223	212	185	191
00.00	237	235	225	192	239
01.00	236	231	212	192	233
02.00	235	226	260	186	240
03.00	238	215	203	187	240
04.00	240	214	207	178	233
05.00	236	220	203	181	217
06.00	232	228	247	191	223
07.00	228	249	242	200	236
08.00	223	253	228	199	251
09.00	219	239	213	195	253
10.00	206	238	201	196	256
11.00	201	238	189	187	250
12.00	197	224	188	177	239
13.00	194	221	185	175	237
14.00	192	212	184	173	231
15.00	193	205	188	174	217
16.00	181	180	174	152	195
17.00	195	217	200	169	207
18.00	205	208	203	164	204
19.00	209	205	207	164	202
20.00	219	216	209	164	201
21.00	230	221	221	174	220
22.00	241	237	253	191	241
23.00	239	234	241	190	248
Minst effekttopp [kW]	181	180	174	152	195

Tabell 25 viser at ved å la høyeste tilluftstemperatur opptre klokken 16.00, er effekttoppen minst for alle vinter-månedene. Dette er markert i grått i tabell 25, og korresponderende profil for tilluftstemperaturen er markert som grønne stiplede linjer i figur 69. På bakgrunn av dette er scenario 1 utviklet, da det ønskes størst mulig effektreduksjon. Det er viktig å bemerke at da simuleringene ble gjort, ble det simulert med en profil for tilluftstemperaturen lik profilen for gjeldende måned for hele året. Dermed kan høyeste effekttopp, ved en årlig simulering med ulike profiler for tilluftstemperaturen, avvike fra tabell 25. Oppsummert er scenario 1 å la profilen av tilluftstemperaturen være slik at høyeste tilluftstemperatur opptrer klokken 16.00 for vinter-månedene.

Oppsummering av scenarioer

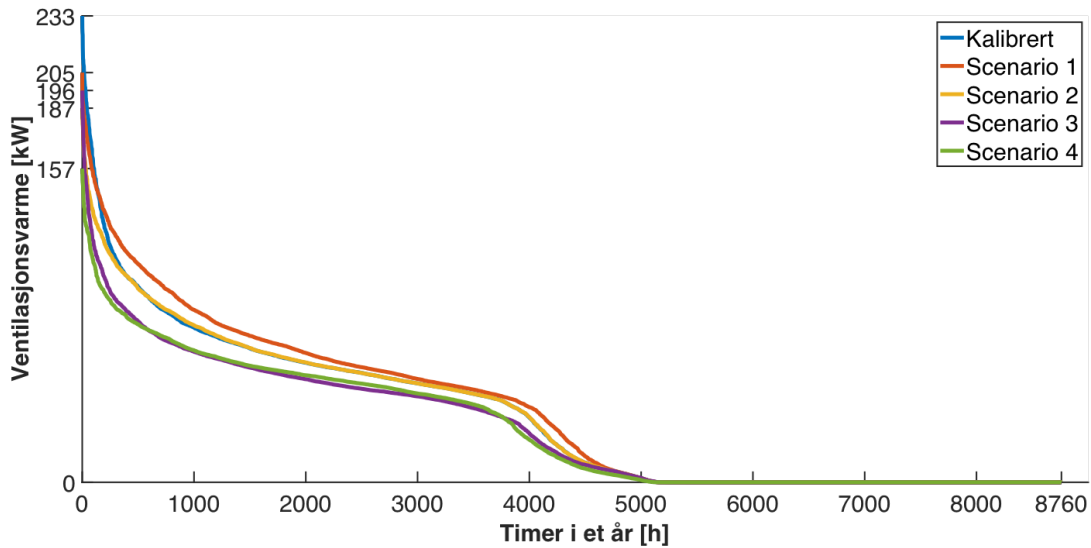
Tabell 26 viser oppsummering av scenarioene for hele året, utviklet i delkapittel 4.7, med forklaring og endring i forhold til kalibrert modell.

Tabell 26 Scenarioer for reduksjon av effekttopper for året

Scenario	Forklaring	Kalibrert modell	Endring
Scenario 1	Forskjøvet profil for tilluftstemp.	Profil: Figur 55b	Profil: Figur 69
Scenario 2	Endret tilluftstemp. ved lav utetemp.	Settpunkt: Figur 15b	Settpunkt: Tabell 35
Scenario 3	$SP_{innetemp} = [21, 24] \text{ } ^\circ\text{C}$	Settpunkt: Figur 10	Settpunkt: [21, 24] $^\circ\text{C}$
Scenario 4	$SP_{luftmengde} = [0.7, 3] \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$	Settpunkt: Tabell 14	Settpunkt: [0.7, 3] $\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$
Scenario 5.1	Return air temp. control	AHU: Standard air handling unit	AHU: Return air temp. control
Scenario 5.2	Return air temp. control med $SP_{innetemp} = [21, 24]$	AHU: Standard air handling unit Settpunkt for innetemp.: Figur 10	AHU: Return air temp. control Settpunkt for innetemp.: [21, 24] $^\circ\text{C}$
Scenario 5.3	Return air temp. control med VAV CO ₂ -regulering	AHU: Standard air handling unit Regulering: VAV temperatur og CO ₂	AHU: Return air temp. control Regulering: VAV CO ₂

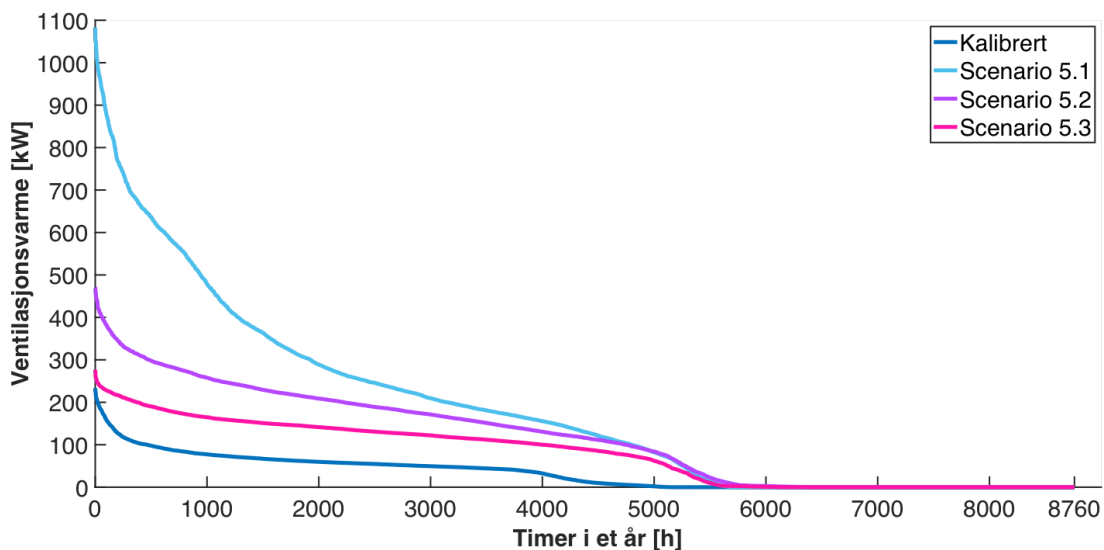
5.11.1 Årlig energibruk og effekttopp for scenarioer

Figur 70 viser varighetskurvene for ventilasjonsvarme for kalibrert modell, scenario 1, scenario 2, scenario 3 og scenario 4, hvor scenarioene er tiltak innen settpunkt for tilluftstemperatur, innnetemperatur og luftmengde.



Figur 70 Varighetskurve for ventilasjonsvarme for kalibrert modell og scenario 1-4

Figur 71 viser varighetskurvene for ventilasjonsvarme for kalibrert modell og scenario 5, hvor scenario 5 er tiltak med Return air temperature control.



Figur 71 Varighetskurve for ventilasjonsvarme for kalibrert modell og scenario 5

Tabell 27 viser en oppsummering av energibruk og effekttopp for ventilasjonsvarmen fra figur 70 og figur 71 for kalibrert modell og de ulike scenarioene. Oppsummeringen er gitt i 27a, og

energibruk og effekttopp for pumper og vifter er gitt i tabell 27b.

Tabell 27 Effekttopp og energibruk for ventilasjonsvarme og pumper og vifter for kalibrert modell og scenarioene (året 2019)

		Effekt [kW]	Endring [%]	Energi [MWh]	Endring [%]
Kalibrert		233	–	287	–
Scenario 1	Forskjøvet tilluftstemp.	205	–12%	310	+8%
Scenario 2	Endret tilluftstemp. ved lav utetemp.	187	–20%	282	–2%
Scenario 3	$SP_{innetemp} = [21, 24] \text{ } ^\circ\text{C}$	196	–16%	239	–17%
Scenario 4	$SP_{luftmengde} = [0.7, 3] \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$	157	–33%	238	–17%
Scenario 5.1	Return air temp. control	1092	+369%	1696	+491%
Scenario 5.2	Return air temp. control med $SP_{innetemp} = [21, 24] \text{ } ^\circ\text{C}$	450	+93%	1009	+252%
Scenario 5.3	Return air temp. control med VAV CO ₂ -regulering	277	+19%	694	+142%

(a) Ventilasjonsvarme

		Effekt [kW]	Endring [%]	Energi [MWh]	Endring [%]
Kalibrert		146	–	374	–
Scenario 1	Forskjøvet tilluftstemp.	146	±0%	379	+1%
Scenario 2	Endret tilluftstemp. ved lav utetemp.	146	±0%	372	–1%
Scenario 3	$SP_{innetemp} = [21, 24] \text{ } ^\circ\text{C}$	133	–9%	288	–23%
Scenario 4	$SP_{luftmengde} = [0.7, 3] \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$	90	–38%	305	–18%
Scenario 5.1	Return air temp. control	63	–57%	108	–71%
Scenario 5.2	Return air temp. control med $SP_{innetemp} = [21, 24] \text{ } ^\circ\text{C}$	27	–82%	63	–83%
Scenario 5.3	Return air temp. control med VAV CO ₂ -regulering	8	–95%	42	–89%

(b) Pumper og vifter

Tabell 27 viser at de ulike scenarioene gir endring i energibruk og effekttopp for både ventilasjonsvarme og pumper og vifter. Scenarioene vil også gi endring i ventilasjonskjøling. For ventilasjonsvarmen oppstår årlig effekttopp i en av vinter-månedene, men for energiposten pumper og vifter kan årlig effekttopp oppstå hele året. Dette skyldes at effekten for pumper og vifter avhenger av luftmengde, som igjen hovedsakelig reguleres etter settpunkt for innetemperatur og eventuelt CO₂-nivå. Av den grunn gir tabell 37 i vedlegg H energibruk og effekttopp for pumper og vifter for de ulike vinter-månedene. Tilsvarende tabell er også gitt for ventilasjonsvarme i samme vedlegg.

Resultatene fra tabell 27 vil analyseres i større grad når kostnadsbesparelsene for de ulike scenarioene skal studeres i delkapittel 5.12. Endring i ventilasjonsvarmen kan skyldes endring i tilluftstemperatur, innetemperatur, luftmengde og drift. Endring i energiposten pumper og vifter kan skyldes endring i luftmengde og drift. Siden alle tilfellene, bortsett fra scenario 5.3, har VAV temperatur- og CO₂-regulering er luftmengden avhengig av settpunktet for innetemperaturen. Videre bestemmes settpunktet for innetemperaturen av om tilluftstemperaturen er høyere enn innetemperaturen eller lavere enn innetemperaturen. Deretter vil luftmengdene prøve og oppnå settpunktet for innetemperaturen ved å regulere mellom minimum og maksimum avhengig av om tilluftstemperaturen kan hjelpe med varme eller kulde. Av den grunn er det en avhengighet mellom disse faktorene.

5.11.2 Årlig inneklima for scenarier

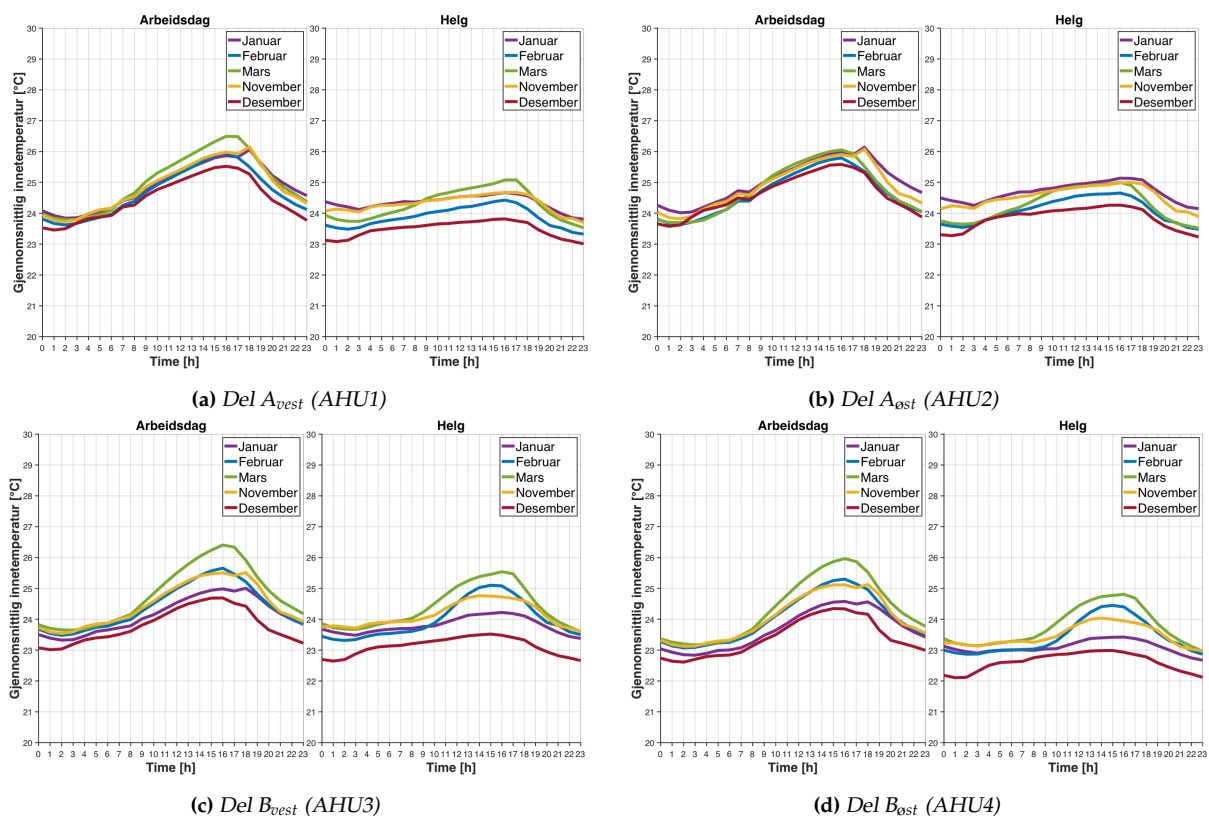
I dette underdelkapittelet vil resultater av årlig inneklima for scenarier presenteres. Scenarioene er basert på endringer i forhold til kalibrert modell. Av den grunn vil inneklima for de ulike scenarier bli påvirket av dårlig temperaturfordeling med én tilluftstemperatur som for kalibrert modell, og ulike rom tilkoblet samme aggregat vil fortsatt kunne ha samtidig varme- og kjølebehov.

Innetemperatur for scenarier

Resultater av årlig inneklima inkluderer profiler av innetemperatur for de ulike scenarier. Analysen av innetemperatur fokuserer på arbeidsdager og aggregat AHU1.

Scenario 1 - Forskjøvet profil for tilluftstemperatur

Figur 72 viser profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone for scenario 1, hvor figur 72a og figur 72b viser for bygningsdel A og figur 72c og figur 72d viser for bygningsdel B. Figuren viser for arbeidsdag og helg, og for de ulike vinter-månedene.



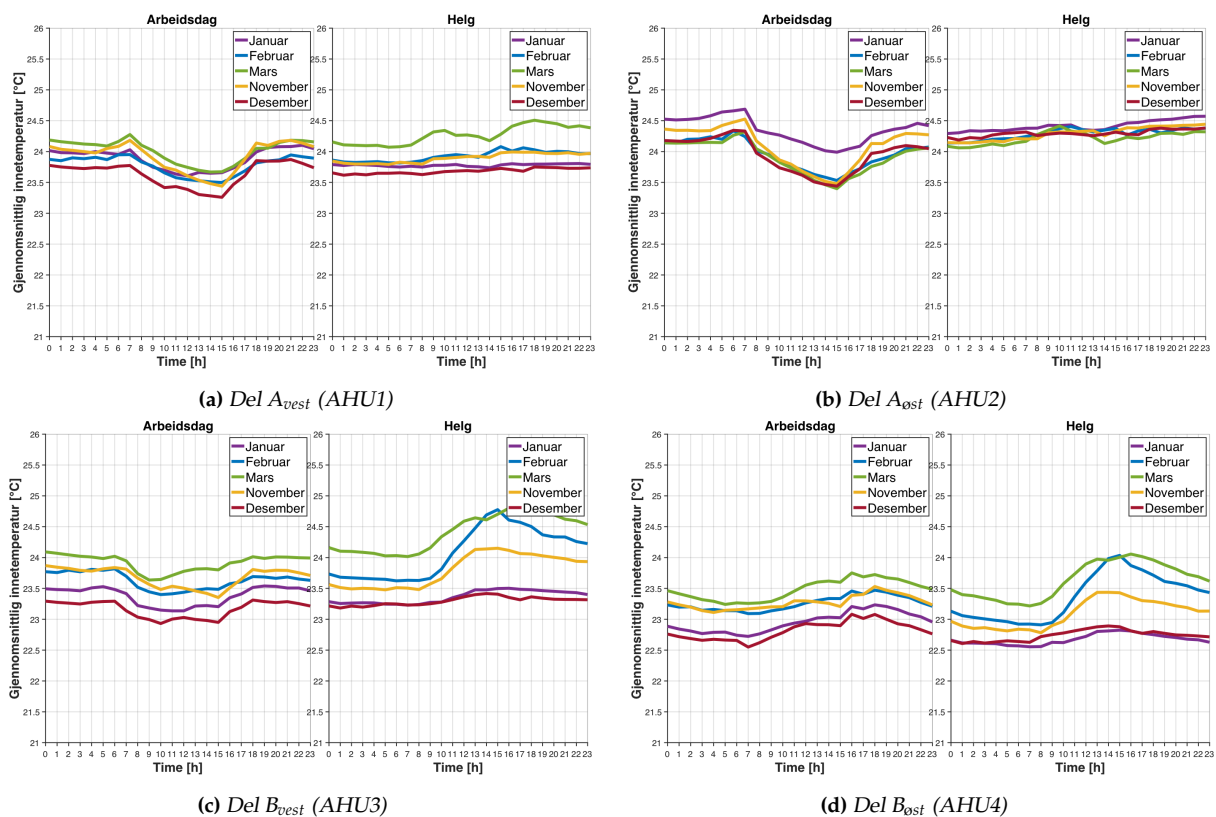
Figur 72 Profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone (Scenario 1)

Figur 72 viser at innetemperaturen er betydelig høy på dagen. Årsaken er at scenario 1 har en profil for tilluftstemperatur med en topp klokken 16.00 fra figur 69, og dette gir naturlig høyere innetemperaturer på dagen. Årsaken til at denne profilen av tilluftstemperatur gir størst effektreduksjon

for ventilasjonsvarmen, er at profilen av tilluftstemperaturen har bedre samsvar med profilen av utetemperaturen. Med dette menes at det ved høyere tilluftstemperatur også er høyere utetemperatur, og tilsvarende motsatt. Profilen av tilluftstemperaturen er gitt i figur 69, og profilen av utetemperaturen er gitt i figur 129 i vedlegg G. Dermed varmes lavere utetemperatur opp til lavere tilluftstemperatur om natten, og høyere utetemperatur varmes opp til høyere tilluftstemperatur om dagen. Differansen mellom tilluftstemperaturen og utetemperaturen er dermed minimalisert for scenario 1. Oppsummert betyr dette at kaldere uteluft varmes opp til varmere tilluft på natten i den kalibrerte modellen, og dette krever mer ventilasjonsvarme siden det er kaldere på natten. Dette skyldes at ventilasjonsvarmen er svært avhengig av utetemperaturen.

Scenario 2 - Endret tilluftstemperatur ved lav utetemperatur

Figur 73 viser profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone for scenario 2, hvor figur 73a og figur 73b viser for bygningsdel A og figur 73c og figur 73d viser for bygningsdel B. Figuren viser for arbeidsdag og helg, og for de ulike vinter-månedene.



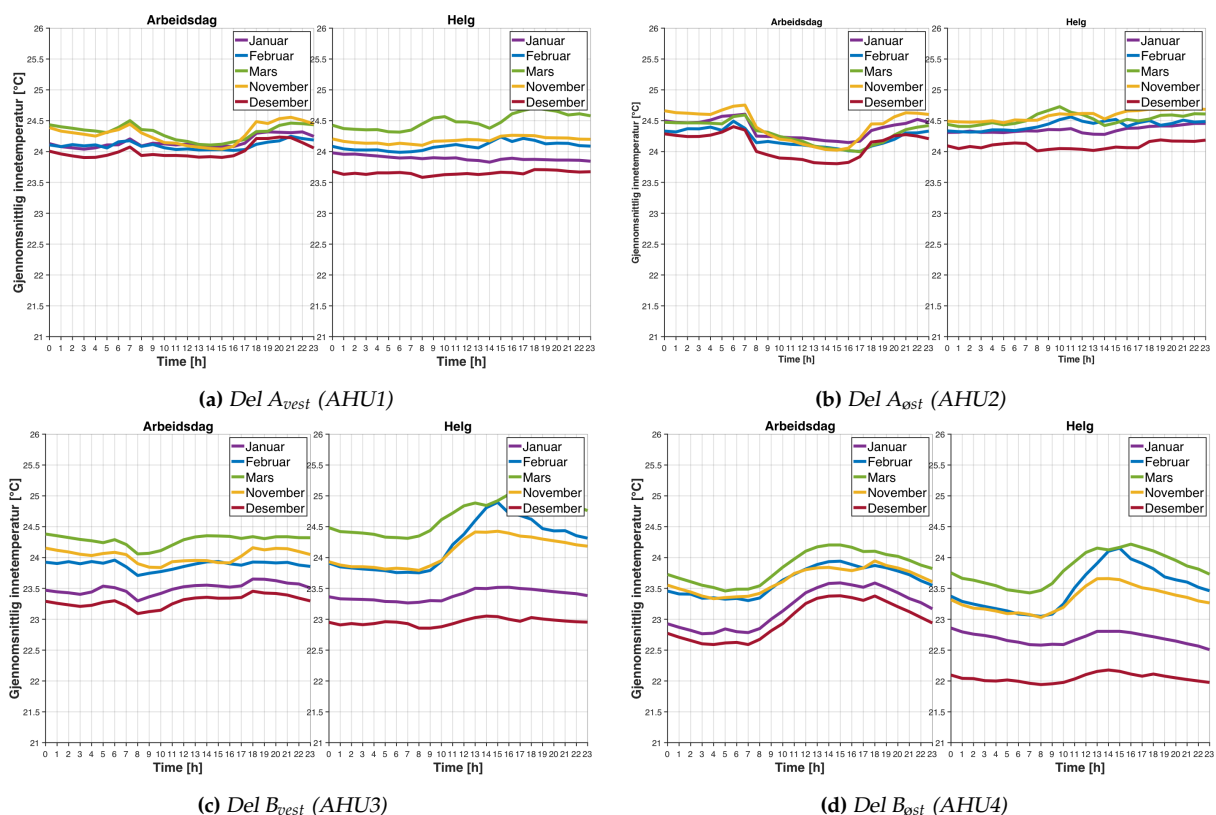
Figur 73 Profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone (Scenario 2)

Figur 73 viser en betydelig likhet med figur 63 som viser profil av gjennomsnittlig innetemperatur for kalibrert modell. Årsaken er at scenario 2 kun inneholder endringer for settpunktet for tilluftstemperaturen på de kaldeste vinter-dagene i løpet av året. Av den grunn kunne det vært hensiktsmessig å presentere resultater av innetemperatur for disse dagene. Til tross for dette er en

slik presentasjon ikke inkludert i denne oppgaven, og skyldes at tilluftstemperaturen ikke styres på en hensiktsmessig måte. Simuleringene gir likevel akseptable innetemperaturer på de kalde dagene og dagene etter, og scenarioet viser dermed hvordan effektreduksjon av ventilasjonsvarme kan oppnås ved å kun redusere større økninger i settpunkt for tilluftstemperatur på kalde dager.

Scenario 3 - Minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur lik 21°C og 24°C

Figur 74 viser profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone for scenario 3, hvor figur 74a og figur 74b viser for bygningsdel A og figur 74c og figur 74d viser for bygningsdel B. Figuren viser for arbeidsdag og helg, og for de ulike vinter-månedene.



Figur 74 Profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone (Scenario 3)

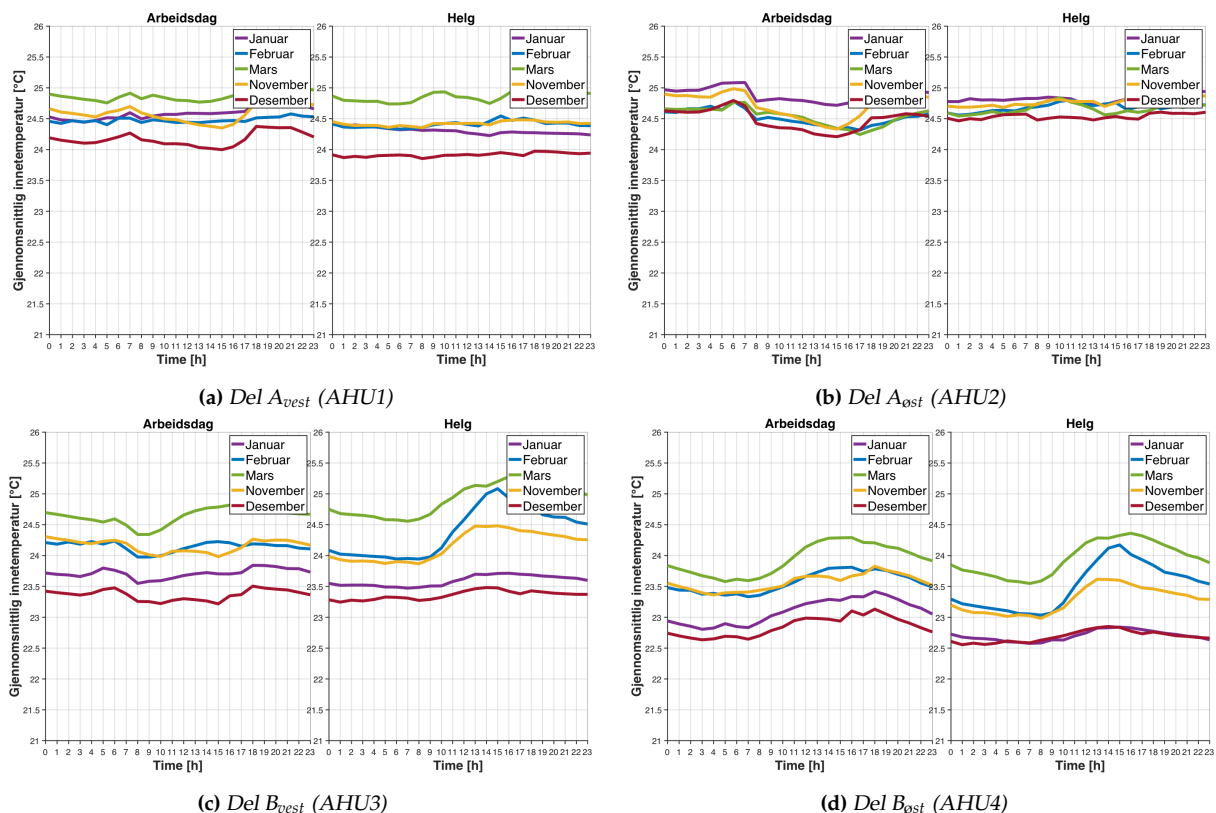
Figur 74 viser at innetemperaturen i stor grad har økt på dagen sammenliknet med kalibrert modell fra figur 63. Dette skyldes at innetemperaturen er høyere enn tilluftstemperaturen fra figur 55b på dagen for både scenario 3 og kalibrert modell. Da tilsvarer settpunktet for innetemperaturen settpunktet for kjøling. For scenario 3 er settpunktet for kjøling lik 24°C, mens for kalibrert modell er settpunktet for kjøling lik 23°C på dagen. Siden innetemperaturen som regel er høyere enn settpunktet for innetemperaturen på dagen i begge tilfeller, brukes den kaldere tilluften til å kjøle ned den for høye inneluften i større grad i kalibrert modell. Dermed er innetemperaturen på dagen høyere for scenario 3 enn for kalibrert modell. På natten er tilluftstemperaturen høyere enn innetemperaturen for scenario 3 og kalibrert modell. Da tilsvarer settpunktet for innetemperaturen

settpunktet for oppvarming. For scenario 3 er settpunktet for oppvarming lik 21°C , mens for kalibrert modell er settpunktet for oppvarming $22-22,5^{\circ}\text{C}$ på natten. Likevel er tilluftstemperaturen høyere enn innetemperaturen for begge tilfellene, og tilluften kan dermed ikke benyttes på natten for å kjøle ned den for høye inneluften til verken 21°C eller $22-22,5^{\circ}\text{C}$ på natten. Dermed er innetemperaturene i stor grad like på natten for scenario 3 og kalibrert modell, men innetemperaturen på dagen påvirker innetemperaturen på natten.

Generelt har ytre kontor innetemperaturen på 21°C , mens indre kontor har innetemperaturen på 24°C på dagen. Dette ble observert i figur 32d som viser det samme scenarioet, bare for den kalde dagen. Årsaken er at innetemperatur er lavere enn tilluftstemperatur på dagen for flere ytre kontor, og da tilsvarer settpunktet for innetemperatur settpunktet for oppvarming lik 21°C . Da brukes varmere tilluft til å varme opp for kald inneluft dersom innetemperatur er lavere enn 21°C for ytre kontor. For flere indre kontor er innetemperatur høyere enn tilluftstemperatur, og da tilsvarer settpunkt for innetemperatur settpunktet for kjøling lik 24°C . Dermed brukes kaldere tilluft i minst mulig grad dersom innetemperatur er lavere enn 24°C .

Scenario 4 - Redusert maksimum settpunkt for luftmengde

Figur 75 viser profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone for scenario 4, hvor figur 75a og figur 75b viser for bygningsdel A og figur 75c og figur 75d viser for bygningsdel B. Figuren viser for arbeidsdag og helg, og for de ulike vinter-månedene.



Figur 75 Profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone (Scenario 4)

Figur 75 viser at det er høyere innetemperaturer for scenario 4 enn for kalibrert modell fra figur 63. Innnetemperaturen er høyere enn tilluftstemperaturen fra figur 55b på dagen for begge tilfellene, og da tilsvarer settpunktet for innetemperatur settpunkt for kjøling. Settpunktet for kjøling er 23°C på dagen for både scenario 4 og kalibrert modell. Siden innnetemperaturen som regel er høyere enn settpunktet for innetemperatur, brukes den kaldere tilluften til å kjøle ned den for høye inneluften i begge tilfellene. I scenario 4 er maksimum settpunkt for luftmengde redusert, og dette begrenser muligheten til å kjøle ned den for høye inneluften i like stor grad som for kalibrert modell. Dermed er innnetemperaturen på dagen høyere i scenario 4 enn for kalibrert modell.

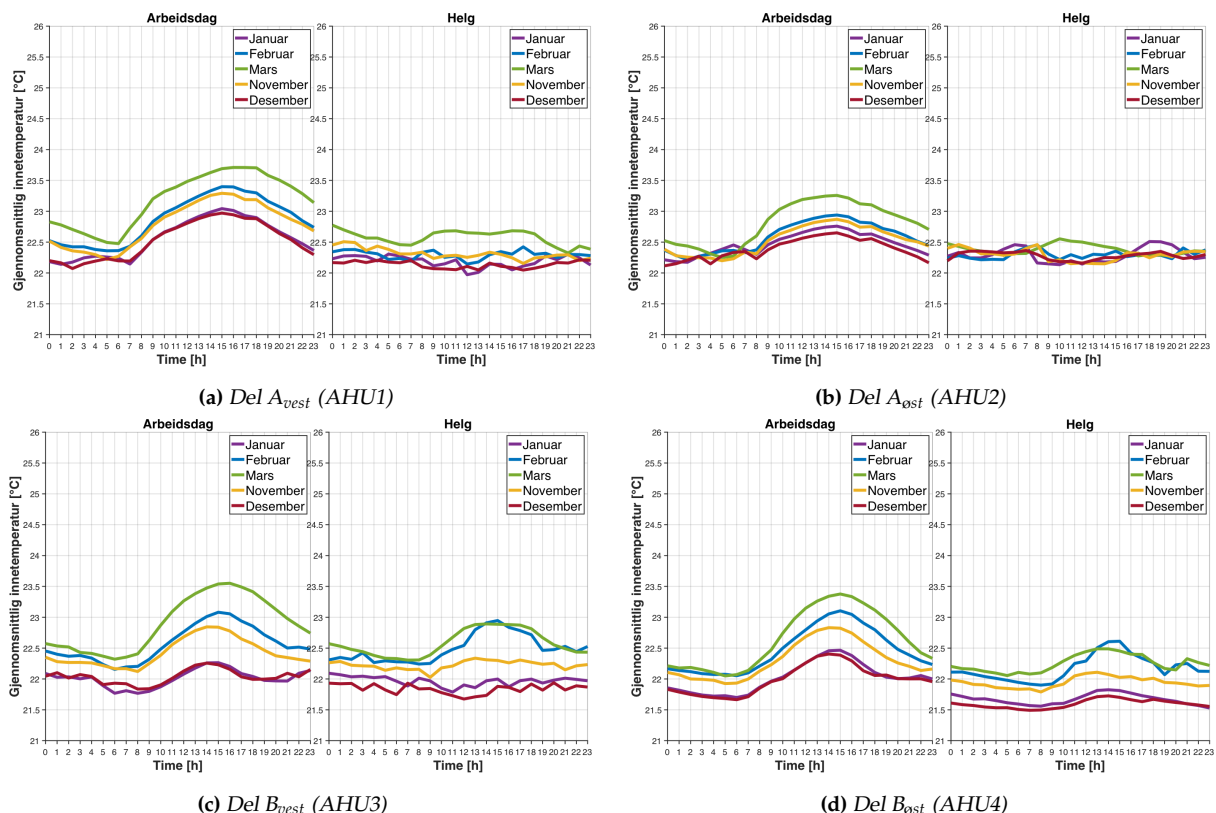
Siden innnetemperaturen er høyere på dagen for scenario 4 enn kalibrert modell, vil dette også påvirke innnetemperaturen på natten. Både for scenario 4 og kalibrert modell er tilluftstemperaturen høyere enn innnetemperaturen på natten, og da brukes settpunkt for oppvarming. Videre er innnetemperaturen høyere enn settpunktet for innnetemperaturen på natten, og det ønskes i minst mulig grad å benytte varmere tilluft.

Scenario 5.1 - Return air temperature control

Det er valgt å ikke presentere resultatene for innetemperaturene fra scenario 5.1, da den eneste forskjellen mellom scenario 5.1 og scenario 5.2 er settpunktene for innnetemperaturen. I scenario 5.1 er settpunktet for innnetemperaturen som for den kalibrerte modellen i figur 10, mens i scenario 5.2 er settpunkt for minimum og maksimum innetemperatur henholdsvis lik 21°C og 24°C.

Scenario 5.2 - Return air temperature control med $SP_{innetemp} = [21, 24]$

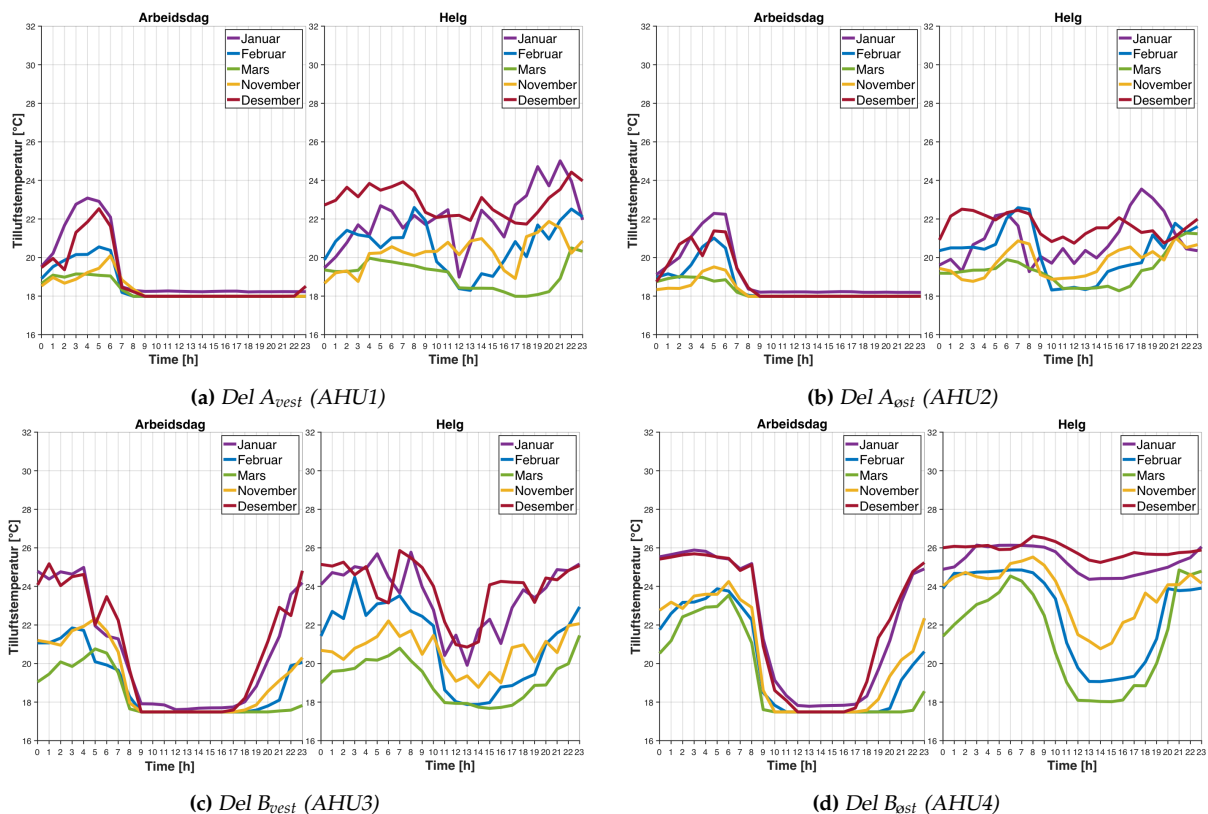
Figur 76 viser profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone for scenario 5.2, hvor figur 76a og figur 76b viser for bygningsdel A og figur 76c og figur 76d viser for bygningsdel B. Figuren viser for arbeidsdag og helg, og for de ulike vinter-månedene.



Figur 76 Profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone (Scenario 5.2)

Generelt viser figur 76 akseptable innetemperaturer. I scenario 5.2 er settpunktet for innetemperatur lik 21°C eller 24°C avhengig av om tilluftstemperaturen henholdsvis er høyere enn innetemperaturen eller lavere enn innetemperaturen. Videre reguleres tilluftstemperaturen mellom minimum og maksimum settpunkt for tilluftstemperaturen for å oppnå et settpunkt for returtemperaturen. For varmebatteriet er settpunktet for returtemperaturen lik 22°C, og varmebatteriet brukes dersom settpunktet for tilluftstemperaturen er høyere enn utetemperaturen i modellen.

For å forstå profilene av innetemperatur i figur 76 er det nødvendig å presentere tilluftstemperaturen i scenario 5.2. Figur 77 viser profil av tilluftstemperatur fra hvert aggregat for scenario 5.2, hvor figur 77a og figur 77b viser for bygningsdel A og figur 77c og figur 77d viser for bygningsdel B. Figuren viser for arbeidsdag og helg, og for de ulike vinter-månedene.



Figur 77 Profil av tilluftstemperatur fra hvert aggregat (Scenario 5.2)

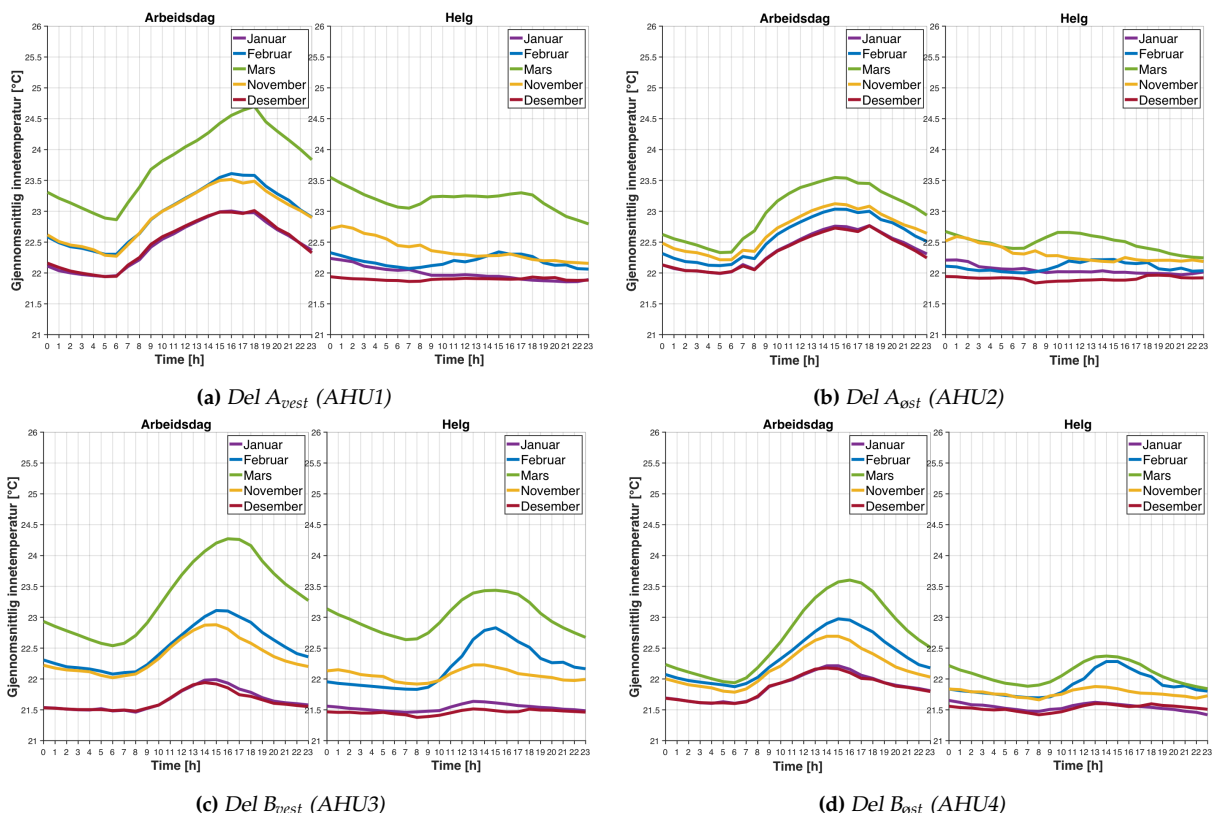
Figur 77 viser at tilluftstemperaturen er gitt av minimum settpunkt for tilluftstemperaturen fra tabell 11 på dagen. Dette skyldes at returtemperaturen, som vil bli presentert i figur 93a, er høyere enn settpunktet for returtemperaturen på dagen.

På dagen er tilluftstemperaturen fra figur 77 lavere enn innetemperaturen fra figur 76, og da tilsvarer settpunktet for innetemperaturen settpunktet for kjøling lik 24°C . Innetemperaturen er som regel lavere enn settpunktet for innetemperaturen, og det ønskes i minst mulig grad å benytte kaldere tilluft. Eventuelle interne laster og solinnstråling gir varmetilskudd på dagen. Oppsummert ønsker reguleringen av tilluftstemperaturen å kjøle ned den for varme luften i returen på dagen, men samtidig benyttes kaldere tilluft i minst mulig grad for å ikke kjøle ned den for kalde inneluften på dagen. Dermed jobber ikke settpunkt for innetemperatur og settpunkt for returtemperatur like bra sammen. Inneluften vil likevel bli kjølt ned av tilluften på dagen, og dette skyldes minimum settpunkt for luftmengde. Likevel viser figur 76 akseptable innetemperaturer.

På natten er tilluftstemperaturen som regel høyere enn innetemperaturen, og da tilsvarer settpunktet for innetemperaturen settpunkt for oppvarming lik 21°C . Innetemperaturen er som regel høyere enn settpunktet for innetemperaturen, og det ønskes i minst mulig grad å dra nytte av varmere tilluft. Likevel vil inneluften bli varmet opp av tilluften på natten på grunn av minimum settpunkt for luftmengde. På natten blir returtemperaturen omtrent nådd.

Scenario 5.3 - Return air temperature control med VAV CO₂-regulering

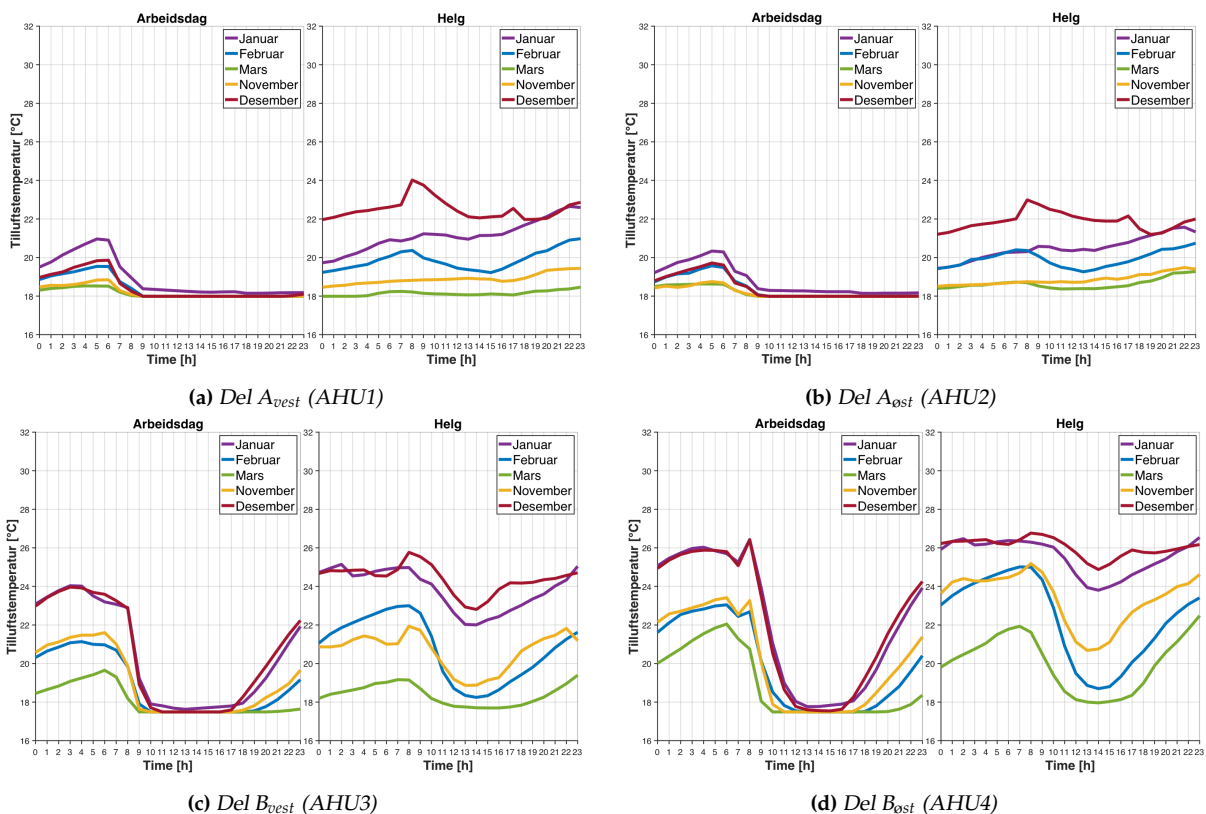
Figur 78 viser profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone for scenario 5.3, hvor figur 78a og figur 78b viser for bygningsdel A og figur 78c og figur 78d viser for bygningsdel B. Figuren viser for arbeidsdag og helg, og for de ulike vinter-månedene.



Figur 78 Profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone (Scenario 5.3)

Generelt viser figur 78 akseptable innetemperature. I scenario 5.3 har settpunktet for innetemperaturen ingen betydning i en bygning med oppvarming via tilluft. Dette skyldes at det benyttes VAV CO₂-regulering, som betyr at luftmengdene reguleres mellom minimum og maksimum settpunkt for luftmengdene avhengig av CO₂-nivået. Videre reguleres tilluftstemperaturen mellom minimum og maksimum settpunkt for tilluftstemperaturen for å oppnå returtemperaturen på 22°C for varmebatteriet på tilsvarende måte som for scenario 5.2.

For å forstå profilene av innetemperatur i figur 78 er det også nødvendig å presentere tilluftstemperaturen i scenario 5.3. Figur 79 viser profil av tilluftstemperatur fra hvert aggregat for scenario 5.3, hvor figur 79a og figur 79b viser for bygningsdel A og figur 79c og figur 79d viser for bygningsdel B. Figuren viser for arbeidsdag og helg, og for de ulike vinter-månedene.



Figur 79 Profil av tilluftstemperatur fra hvert aggregat (Scenario 5.3)

Figur 79 viser at tilluftstemperaturen er gitt av minimum settpunkt for tilluftstemperaturen fra tabell 11 på dagen. Dette skyldes at returtemperaturen, som vil bli presentert i figur 93b, er høyere enn settpunktet for returtemperaturen på dagen.

På dagen er tilluftstemperaturen fra figur 79 lavere enn innetemperaturen fra figur 78, og da vil tilluften kjøle ned inneluften. I hvor stor grad tilluften vil kjøle ned inneluften er avhengig av luftmengdene, som er avhengig av CO₂-nivå. Likevel øker innetemperaturen på dagen, og dette skyldes interne laster og solinnstråling. Innetemperaturene blir sett på som akseptable.

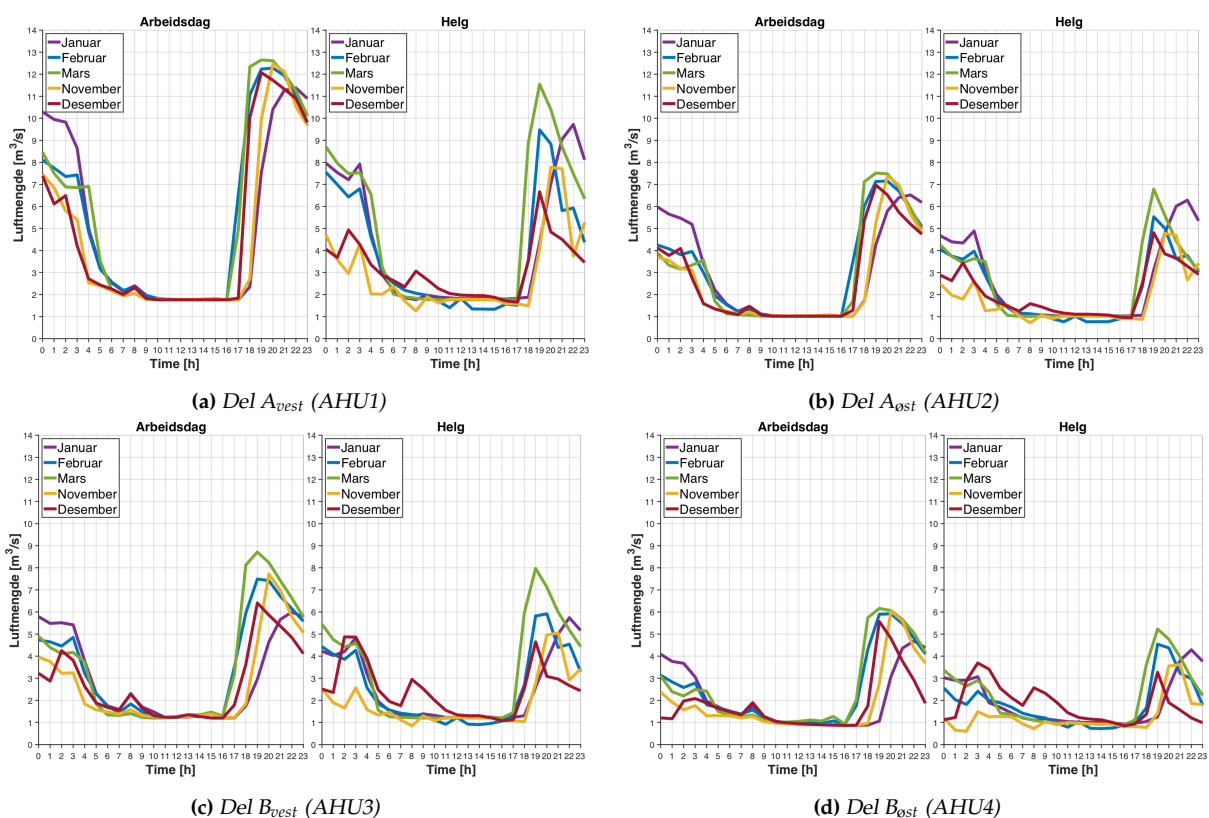
På natten er tilluftstemperaturen høyere enn innetemperaturen i enkelte tilfeller, og da vil tilluften varme opp inneluften. I hvor stor grad tilluften vil varme opp inneluften er igjen avhengig av luftmengdene. Det er lite varmetilskudd fra interne laster og solinnstråling, men teknisk utstyr er på om natten. På natten blir returtemperaturen omtrent nådd.

Luftmengde for scenarioer

Resultater av årlig inneklimate inkluderer profiler av luftmengde for de ulike scenarioene. Analysen av luftmengde fokuserer på arbeidsdager og aggregat AHU1. Siden årlige kostnader for hvert scenario skal beregnes, og ventilasjonsvarmen og pumper og vifter påvirkes av luftmengden, vil også årlig luftmengde presenteres ved nødvendighet.

Scenario 1 - Forskjøvet profil for tilluftstemperatur

Figur 80 viser profil av luftmengde til hver sone for scenario 1, hvor figur 80a og figur 80b viser for bygningsdel A og figur 80c og figur 80d viser for bygningsdel B. Figuren viser for arbeidsdag og helg, og for de ulike vinter-månedene.



Figur 80 Profil av luftmengde til hver sone (Scenario 1)

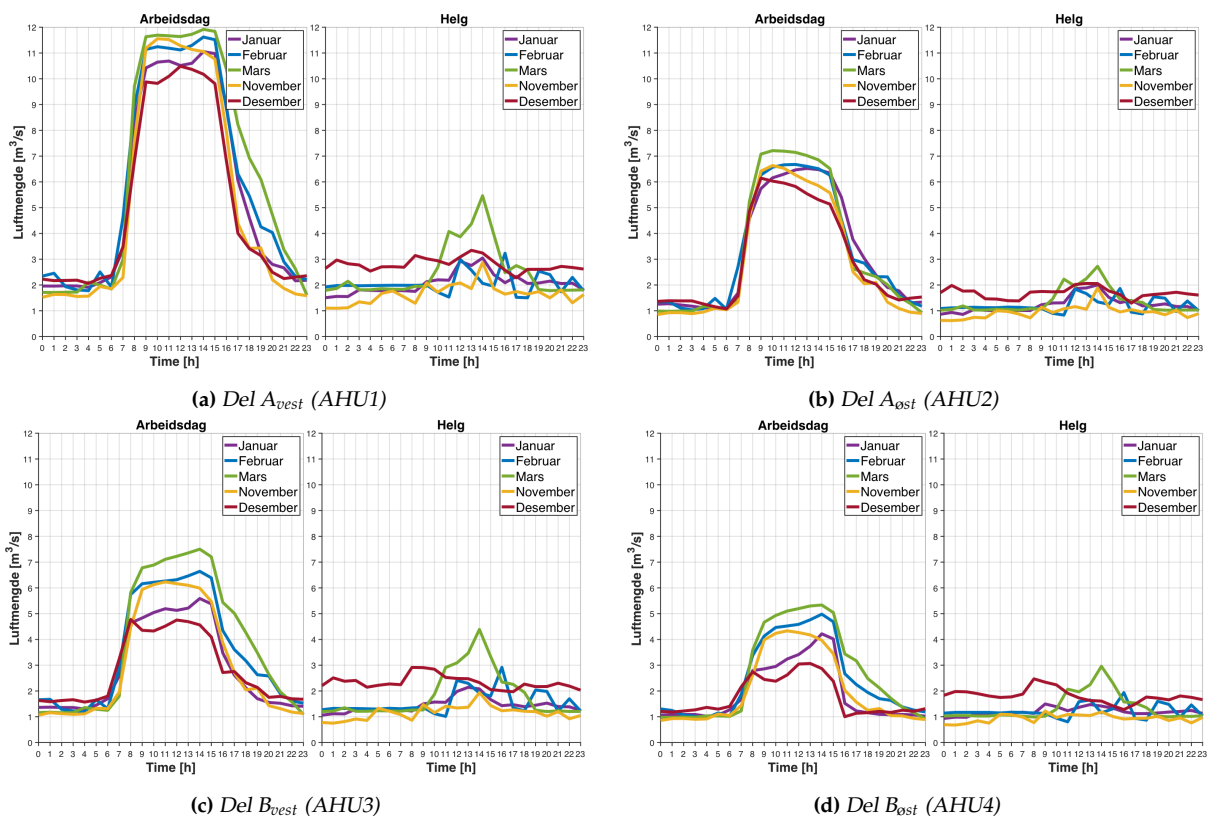
På dagen viser figur 80 at det er lavere luftmengde for alle bygningsdelene. Dette skyldes at tilluftstemperaturen fra figur 69 som regel er høyere enn innetemperaturen fra figur 72 på dagen, og da vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen stenge til minimum settpunkt for luftmengde, så lenge innetemperaturen er høyere enn settpunktet for innetemperaturen for oppvarming fra figur 10a. Dette er realistisk når også eventuelle interne laster og solinnstråling gir varmetilskudd på dagen.

På natten viser figur 80 at det er høyere luftmengde for alle bygningsdelene. Dette skyldes at tilluftstemperaturen som regel lavere enn innetemperaturen, og da vil VAV temperatur- og CO₂-

reguleringen åpne til maksimum settpunkt for luftmengde, så lenge innetemperaturen er høyere enn settpunktet for innetemperaturen for kjøling fra figur 10b. Siden endring i energibruk og effekttopp for pumper og vifter er neglisjerbare for scenario 1 sammenliknet med kalibrert modell fra tabell 27b, presenteres ikke årlig luftmengde for scenario 1. Likevel er totale luftmengder økt i scenario 1 sammenliknet med kalibrert modell.

Scenario 2 - Endret tilluftstemperatur ved lav utetemperatur

Figur 81 viser profil av luftmengde til hver sone for scenario 2, hvor figur 81a og figur 81b viser for bygningsdel A og figur 81c og figur 81d viser for bygningsdel B. Figuren viser for arbeidsdag og helg, og for de ulike vinter-månedene.



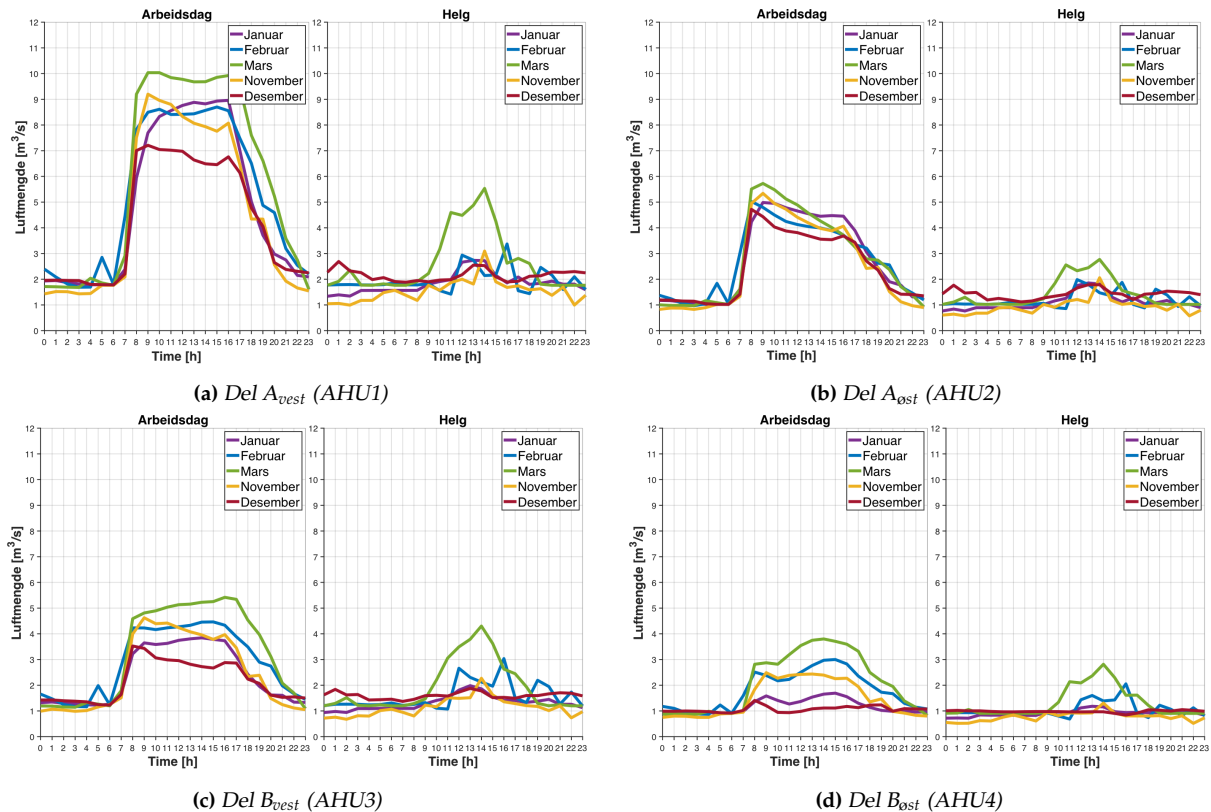
Figur 81 Profil av luftmengde til hver sone (Scenario 2)

Figur 81 viser en betydelig likhet med figur 66 som viser profiler for luftmengder for den kalibrerte modellen. Som tidligere beskrevet er årsaken at scenario 2 kun inneholder endringer for settpunktet for tilluftstemperaturen på de kaldeste vinter-dagene i løpet av året. Av den grunn er også årlige luftmengder betydelig like.

Siden endring i energibruk og effekttopp for pumper og vifter er neglisjerbare for scenario 2 sammenliknet med kalibrert modell fra tabell 27b, presenteres ikke årlig luftmengde for scenario 2. Likevel er totale luftmengder redusert i scenario 2 sammenliknet med kalibrert modell.

Scenario 3 - Minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur lik 21°C og 24°C

Figur 82 viser profil av luftmengde til hver sone for scenario 3, hvor figur 82a og figur 82b viser for bygningsdel A og figur 82c og figur 82d viser for bygningsdel B. Figuren viser for arbeidsdag og helg, og for de ulike vinter-månedene.



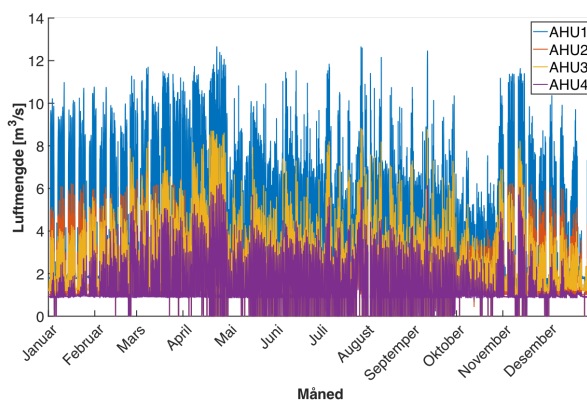
Figur 82 Profil av luftmengde til hver sone (Scenario 3)

På dagen viser figur 82 at det er høyere luftmengde, slik som for kalibrert modell i figur 66. Sammenliknet med kalibrert modell er luftmengdene som regel lavere på dagen i scenario 3. For kalibrert modell ble det beskrevet at høyere luftmengde på dagen skyldes at innetemperaturen er høyere enn settpunktet for innetemperaturen for kjøling på dagen, og at tilluftstemperaturen er lavere enn innetemperaturen på dagen. Da åpnes det for maksimum settpunkt for luftmengde for å kjøle ned den for høye inneluften ved hjelp av kaldere tilluft. Dette er også tilfelle for scenario 3, hvor innetemperaturen er gitt i figur 74 og tilluftstemperaturen er gitt i figur 55b. Forskjellen er at settpunkt for kjøling er 23°C på dagen for kalibrert modell, mens settpunkt for kjøling er lik 24°C for scenario 3. Dermed trengs det ikke like stor luftmengde til å kjøle ned den for høye inneluften ved hjelp av kaldere tilluft for scenario 3 som for kalibrert modell.

På natten viser figur 82 at det er lavere luftmengde. Tilluftstemperaturen er høyere enn innetemperaturen på natten for scenario 3, og da prøves det å oppnå settpunktet for innetemperatur for oppvarming lik 21°C. Da stenges det til minimum settpunkt for luftmengde for å i minst mulig

grad dra nytte av varm tilluft siden innertemperaturen allerede er høyere enn settpunktet for innertemperaturen på natten.

Figur 83 viser luftmengde fra ventilasjonsaggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for scenario 3, hvor kurvene er plottet oppå hverandre.

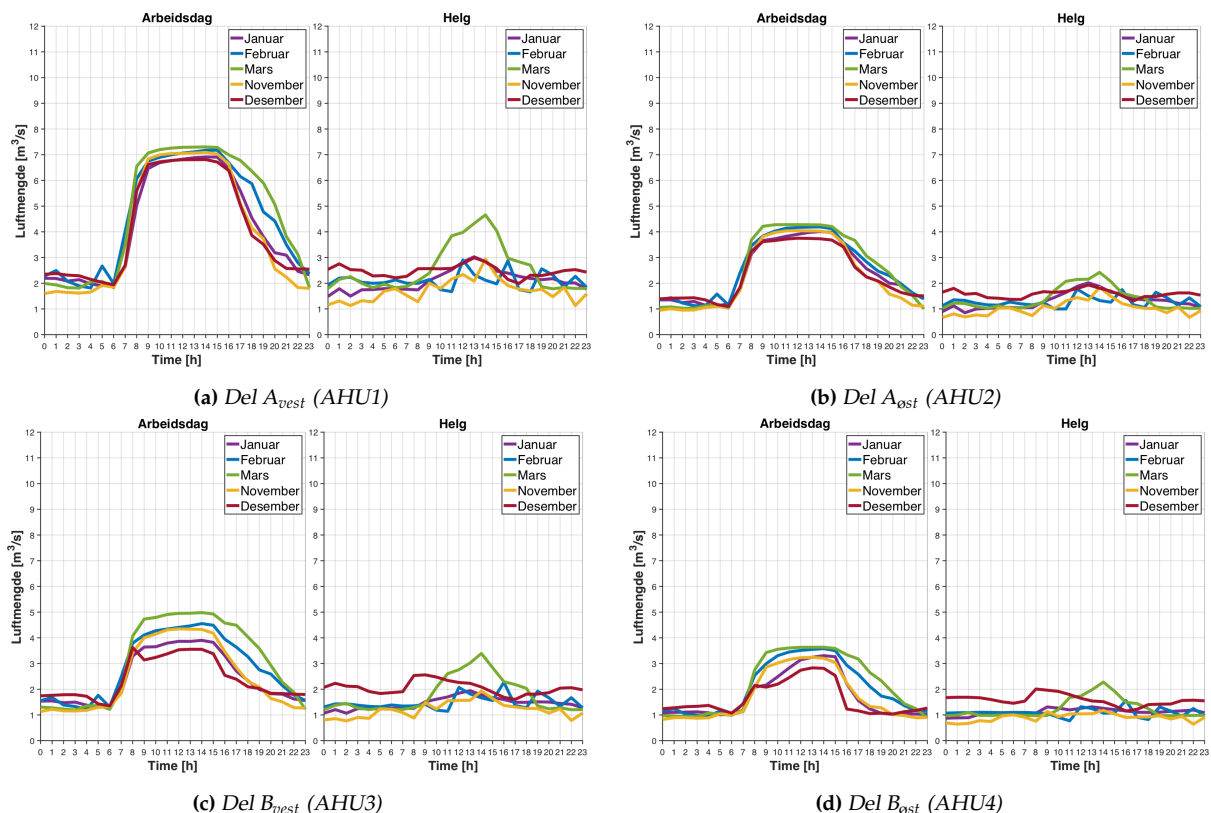


Figur 83 Luftmengde fra aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for scenario 3 (året 2019)

Figur 83 viser at luftmengdene er redusert store deler av året sammenliknet med luftmengdene i kalibrert modell i figur 67. I tillegg er luftmengdene i figur 83 større enn luftmengdene for den reelle bygningen i figur 23.

Scenario 4 - Redusert maksimum settpunkt for luftmengde

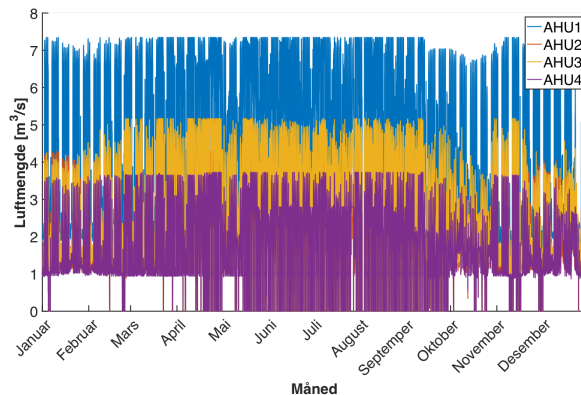
Figur 84 viser profil av luftmengde til hver sone for scenario 4, hvor figur 84a og figur 84b viser for bygningsdel A og figur 84c og figur 84d viser for bygningsdel B. Figuren viser for arbeidsdag og helg, og for de ulike vinter-månedene.



Figur 84 Profil av luftmengde til hver sone (Scenario 4)

Figur 84 viser igjen at det er høyere luftmengde på dagen og lavere luftmengde på natten for scenario 4. Formen på kurven for luftmengdene er tilsvarende lik som for kalibrert modell i figur 66, bare at luftmengdene er lavere for scenario 4 sammenliknet med kalibrert modell på dagen. Dette er også naturlig ettersom scenario 4 innebærer å ha redusert maksimum settpunkt for luftmengde. Av den grunn er analysen av figur 84 tilsvarende lik som for den kalibrerte modellen, bare at det er lavere settpunkt for maksimum luftmengde. Det er likevel viktig å være klar over at lavere luftmengde resulterer i andre innetemperaturer, som både sammenlignes med tilluftstemperaturen og settpunktet for innetemperaturen.

Figur 85 viser luftmengde fra ventilasjonsaggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for scenario 4, hvor kurvene er plottet oppå hverandre.

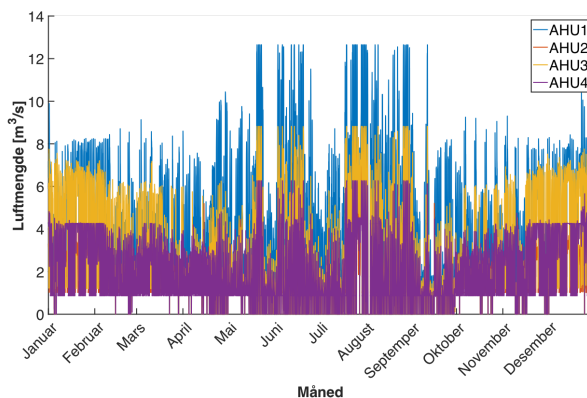


Figur 85 Luftmengde fra aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for scenario 4 (året 2019)

Figur 85 viser at luftmengdene er redusert hele året sammenliknet med luftmengdene i kalibrert modell i figur 67. I tillegg er det likere størrelsesordenen på luftmengdene for scenario 4 og den reelle bygningen i figur 23.

Scenario 5.1 - Return air temperature control

På tilsvarende måte som for innetemperatur er det valgt å ikke presentere profiler av luftmengdene for scenario 5.1, da den eneste forskjellen mellom scenario 5.1 og scenario 5.2 er settpunktene for innetemperaturen. Figur 86 viser luftmengde fra ventilasjonsaggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for scenario 5.1, hvor kurvene er plottet oppå hverandre.

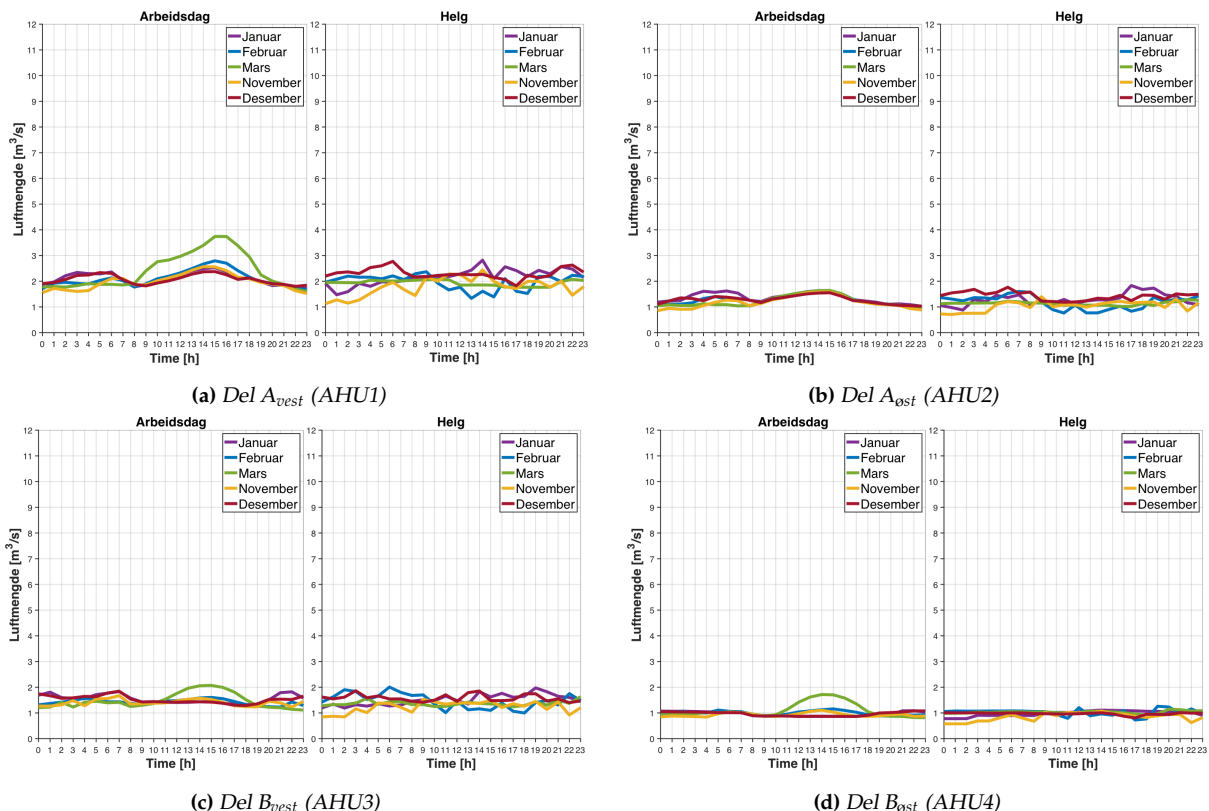


Figur 86 Luftmengde fra aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for scenario 5.1 (året 2019)

Figur 86 viser at luftmengdene er redusert og endret store deler av året sammenliknet med luftmengdene i kalibrert modell i figur 67.

Scenario 5.2 - Return air temperature control med $SP_{innetemp} = [21, 24]$

Figur 87 viser profil av luftmengde til hver sone for scenario 5.2, hvor figur 87a og figur 87b viser for bygningsdel A og figur 87c og figur 87d viser for bygningsdel B. Figuren viser for arbeidsdag og helg, og for de ulike vinter-månedene.



Figur 87 Profil av luftmengde til hver sone (Scenario 5.2)

Figur 87 viser at luftmengdene er betydelig redusert på dagen for scenario 5.2 sammenliknet med kalibrert modell, men også sammenliknet med scenario 1, scenario 2, scenario 3 og scenario 4 som omhandler endring i settpunkt for tilluftstemperatur, innetemperatur og luftmengde. Det er fortsatt VAV temperatur- og CO₂-regulering i scenario 5.2, men nå reguleres tilluftstemperatur etter returtemperatur i aggregatene. For varmebatteriet er settpunktet for returtemperatur lik 22°C. På den måten vil settpunktet for tilluftstemperaturen ta hensyn til interne laster og varmebalanse i bygningen. Det er ikke en sensor for returtemperaturen i hvert rom, men en sensor for returtemperaturen i hvert aggregat. Dermed er returtemperaturen i hvert aggregat et resultat av varmebalansen fra flere rom.

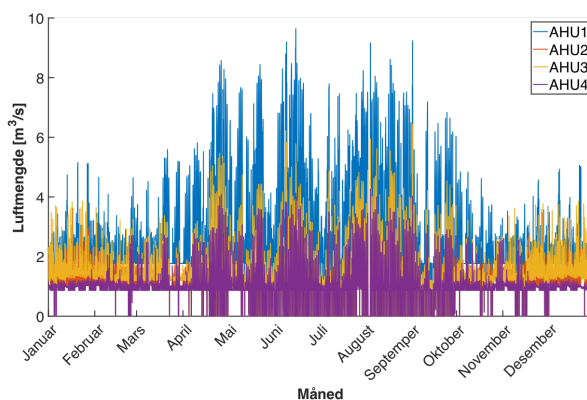
På dagen er tilluftstemperaturen fra figur 77 som regel lavere enn innetemperaturen fra figur 76, og da prøver reguleringen å oppnå settpunktet for innetemperatur for kjøling lik 24°C på dagen. Årsaken til at luftmengdene er lavere på dagen skyldes at innetemperaturen som regel er lavere enn settpunktet for innetemperaturen på dagen. Da vil VAV temperatur- og CO₂-reguleringen

stenge til minimum settpunkt for luftmengde for å i minst mulig grad dra nytte av kald tilluft siden innetemperaturen allerede er lavere enn settpunktet for innetemperaturen. Eventuelle interne laster og solinnstråling gir varmetilskudd på dagen.

På natten er tilluftstemperaturen som regel høyere enn innetemperaturen, og da prøver reguleringen å oppnå settpunktet for innetemperatur for oppvarming lik 21°C på natten. Årsaken til at luftmengdene er lavere på natten skyldes at innetemperaturen som regel er høyere enn settpunktet for innetemperaturen på natten. Da vil VAV temperatur- og CO_2 -reguleringen også stenge til minimum settpunkt for luftmengde på natten, for å i minst mulig grad dra nytte av varm tilluft siden innetemperaturen allerede er høyere enn settpunktet for innetemperaturen.

Selv om settpunktet for tilluftstemperaturen tar hensyn til varmebalansen i bygningen ved å regulere mellom minimum og maksimum settpunkt for tilluftstemperatur for å oppnå et settpunkt for returtemperatur i aggregatene, vil settpunktene for innetemperaturen kunne begrense muligheten til å oppnå settpunktet for returtemperaturen dersom det benyttes VAV temperatur- og CO_2 -regulering. Dermed jobber ikke VAV temperatur- og CO_2 -regulering og reguleringen av tilluftstemperaturen like bra sammen.

Figur 88 viser luftmengde fra ventilasjonsaggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for scenario 5.2, hvor kurvene er plottet oppå hverandre.

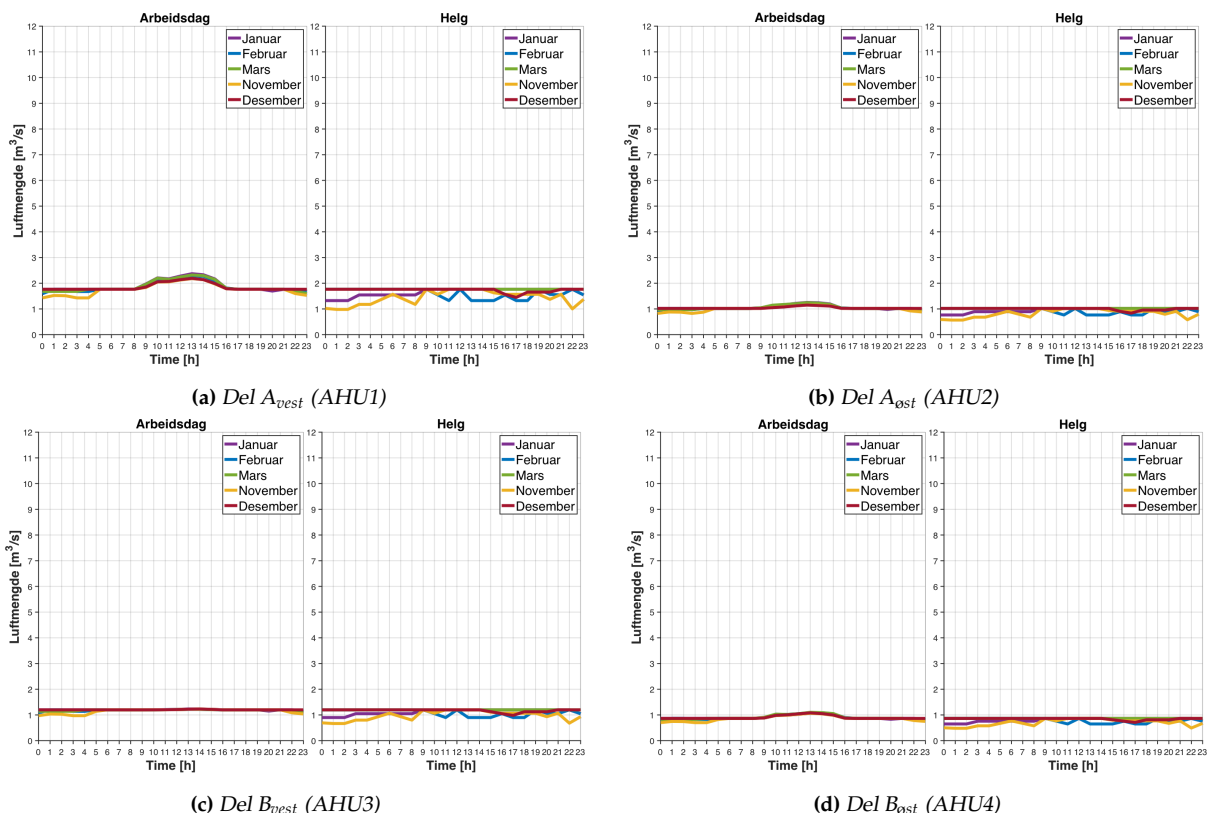


Figur 88 Luftmengde fra aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for scenario 5.2 (året 2019)

Figur 88 viser en betydelig reduksjon og endring i hvordan luftmengdene distribueres fra de ulike ventilasjonsaggregatene sammenliknet med kalibrert modell, scenario 1, scenario 2, scenario 3 og scenario 4. Dette skyldes at tilluftstemperaturen reguleres etter settpunktet for returtemperaturen, og luftmengden reguleres etter innetemperatur og eventuelt CO_2 -nivå.

Scenario 5.3 - Return air temperature control med VAV CO₂-regulering

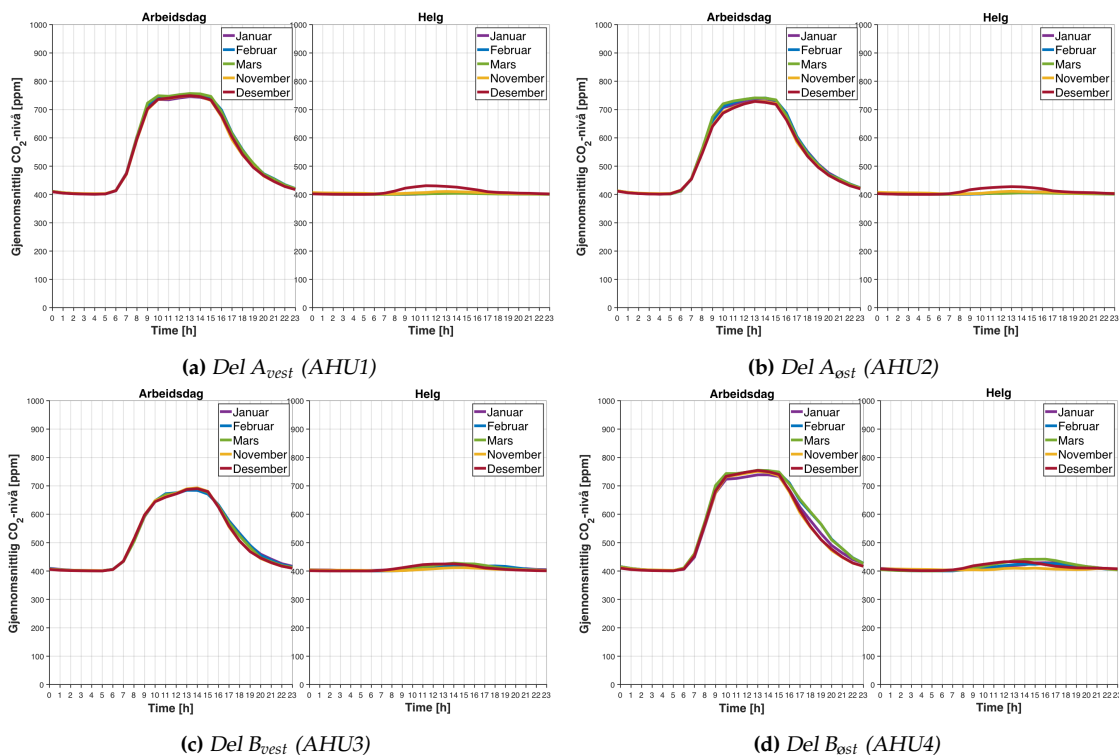
Figur 89 viser profil av luftmengde til hver sone for scenario 5.3, hvor figur 89a og figur 89b viser for bygningsdel A og figur 89c og figur 89d viser for bygningsdel B. Figuren viser for arbeidsdag og helg, og for de ulike vinter-månedene.



Figur 89 Profil av luftmengde til hver sone (Scenario 5.3)

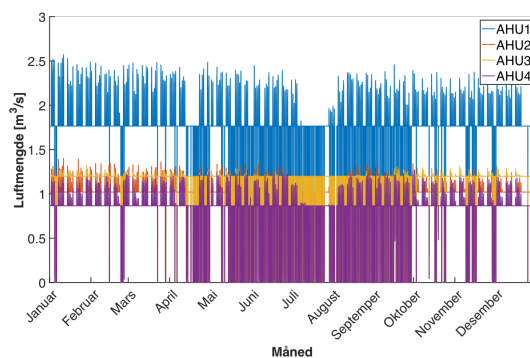
Figur 89 viser at luftmengdene også er betydelig redusert på dagen for scenario 5.3. Dette skyldes at det benyttes VAV CO₂-regulering, og at tilluftstemperatur reguleres etter returtemperatur i aggregatene i scenario 5.3. For varmebatteriet er returtemperaturen satt til 22°C, og minimum og maksimum luftmengde reguleres etter minimum og maksimum settpunkt for CO₂-nivå. Dermed har settpunkt for innetemperatur ingen betydning i scenario 5.3 for en bygning med oppvarming via tilluft. Minimum settpunkt for CO₂-nivå er 700 ppm, og maksimum settpunkt for CO₂-nivå er 1100 ppm fra tabell 15. Dersom CO₂-nivået tilsvare eller er høyere enn maksimum settpunkt for CO₂-nivå brukes maksimum settpunkt for luftmengde. Dersom CO₂-nivået tilsvare eller er lavere enn minimum settpunkt for CO₂-nivå brukes minimum settpunkt for luftmengde.

For å forstå hvorfor VAV CO₂-reguleringen stenger til minimum settpunkt for luftmengde, er det nødvendig å analysere CO₂-nivået. Figur 90 viser profil av gjennomsnittlig CO₂-nivå i hvert rom i hver sone for scenario 5.3, hvor figur 90a og figur 90b viser for bygningsdel A og figur 90c og figur 90d viser for bygningsdel B. Figuren viser for arbeidsdag og helg, og for de ulike vinter-månedene.



Figur 90 Profil av gjennomsnittlig CO_2 -nivå av hvert rom i hver sone (Scenario 5.3)

Figur 90 viser at CO_2 -nivået i betydelig liten grad overstiger minimum settpunkt for CO_2 -nivået på 700 ppm. Dermed vil også luftmengdene være lave i scenario 5.3, siden luftmengdene reguleres i forhold til CO_2 -nivået. Dette betyr at både minimum og maksimum settpunkt for CO_2 -nivået er høyt. Figur 91 viser luftmengde fra aggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for scenario 5.3, hvor kurvene er plottet oppå hverandre.

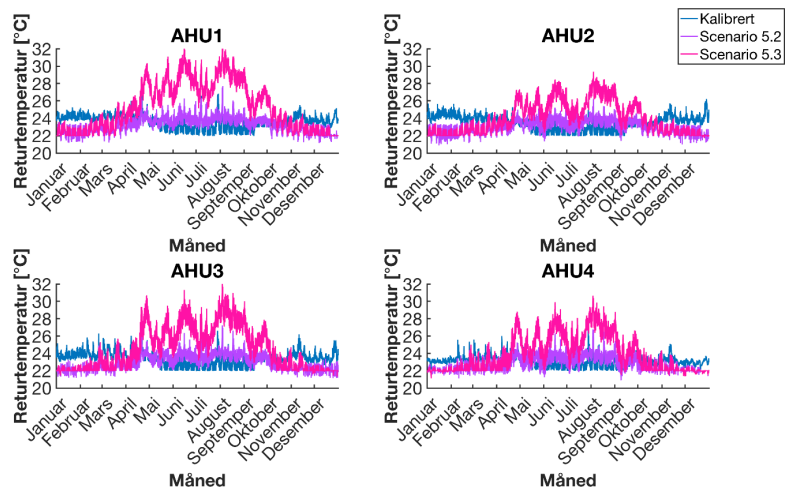


Figur 91 Luftmengde fra aggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for scenario 5.3 (året 2019)

Figur 91 viser en betydelig reduksjon og endring i luftmengdene sammenliknet med kalibrert modell, scenario 1, scenario 2, scenario 3, scenario 4, scenario 5.1 og scenario 5.2. Dette skyldes at scenario 5.3 benytter VAV CO_2 -regulering med høye settpunkt for CO_2 -nivå.

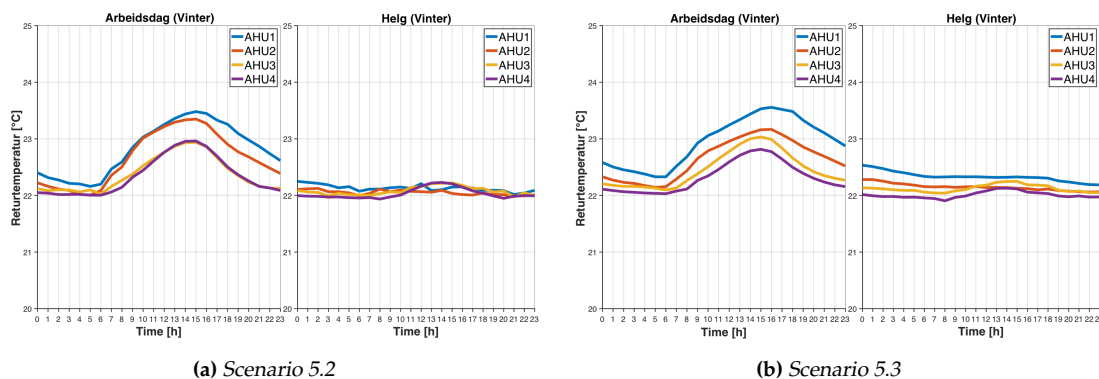
Returtemperatur for scenario 5

Siden tilluftstemperaturen reguleres mellom minimum og maksimum settpunkt for tilluftstemperatur for å oppnå settpunktet for returtemperaturen i aggregatet i scenario 5, er returtemperaturen sentral å analysere. Settpunktet for returtemperaturen er 22°C for varmebatteriet, og 23°C for kjølebatteriet. Referansebygningen har settpunkt for returtemperatur i de ulike aggregatene lik 22°C fra tabell 10. Figur 92 viser returtemperaturen til aggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for den kalibrerte modellen, scenario 5.2 og scenario 5.3.



Figur 92 Returtemperatur til ventilasjonsaggregatene AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for kalibrert modell og scenario 5 (året 2019)

Figur 92 viser at den kalibrerte modellen generelt har høyere returtemperatur om vinteren enn scenario 5. For sommeren er returtemperaturen lavere for kalibrert modell enn for scenario 5, men i denne oppgaven fokuseres det på ventilasjonsvarmen. Av den grunn er det varmebatteriet som er sentralt, og settpunktet for returtemperaturen er da 22°C. Fra figur 92 kan de se ut som at returtemperaturen på 22°C blir nådd for vinteren, men det er nødvendig å studere daglig profil av returtemperaturen for vinteren. Figur 93 viser profil av returtemperatur for vinteren, hvor figur 93a viser for scenario 5.2 og figur 93b viser for scenario 5.3.

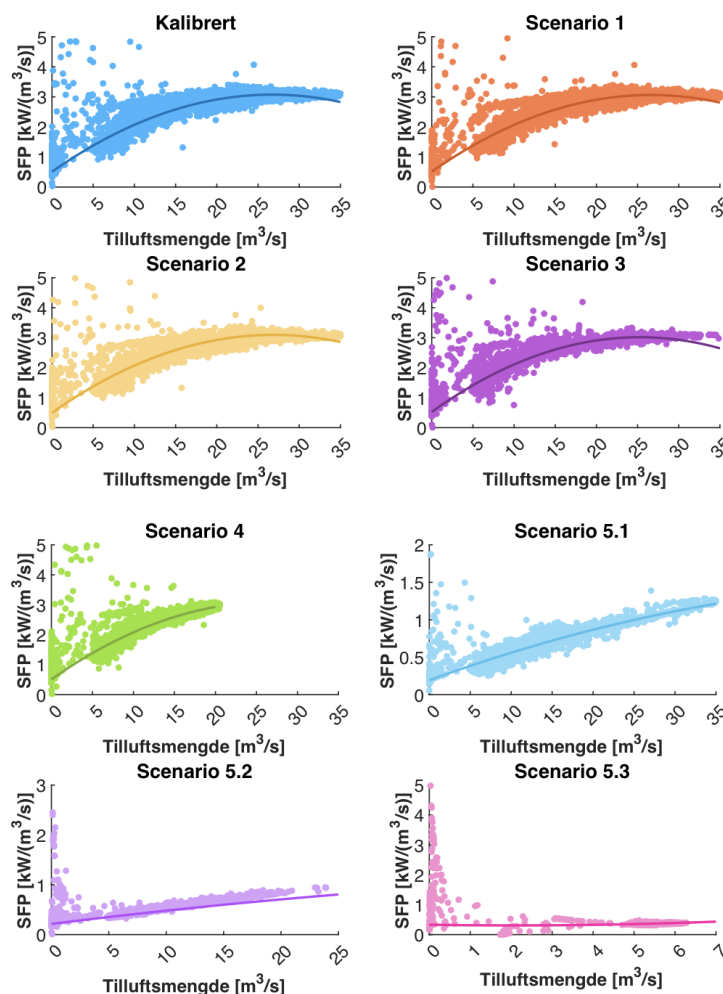


(a) Scenario 5.2 (b) Scenario 5.3
Figur 93 Profil av returtemperatur for vinter (Scenario 5)

Figur 93 viser at settpunktet for returtemperaturen på 22°C blir nådd for ikke-arbeidstid og helg. Når det gjelder arbeidstid er returtemperaturen omtrent 23°C for scenario 5.2 og scenario 5.3. Dette skyldes at tilluftstemperaturen i stor grad er gitt av minimum settpunkt for tilluftstemperaturen i arbeidstid for scenario 5.2 og scenario 5.3. Når interne laster og solinnstråling gir varmetilskudd i arbeidstid, vil returtemperaturen dermed bli for høy. Av den grunn kunne minimum settpunkt for tilluftstemperatur for varmebatteriet vært lavere i scenario 5. Likevel påvirker settpunkt for innetemperatur luftmengden og dermed returtemperaturen i scenario 5.2, og settpunkt for CO₂-nivået påvirker luftmengden og dermed returtemperaturen i scenario 5.3.

5.11.3 Spesifikk vifteeffekt for scenarioer

Spesifikk vifteeffekt påvirkes ved styring av ventilasjon. Figur 94 viser total spesifikk vifteeffekt for ventilasjonsaggregat AHU1, AHU2, AHU3 og AHU4 for den kalibrerte modellen og de ulike scenarioene. Det er disse aggregatene som er de mest sentrale, og som scenarioene har fokus på.



Figur 94 Spesifikk vifteeffekt mot tilluftsmengde for kalibrert modell og scenarioer

Figur 94 viser at SFP for scenario 1 og scenario 2 i svært stor grad er lik den kalibrerte modellen, og skyldes liten endring i energibruk og effekttopp for pumper og vifter fra tabell 27b. Scenario 3 inkluderer endringer i settpunktet for innnetemperaturen, som også påvirker luftmengdene gitt i figur 83, og dermed energibruk og effekttopp for pumper og vifter gitt i tabell 27b. Likevel er SFP for scenario 3 også i stor grad lik den kalibrerte modellen, men maksimum luftmengde er redusert store deler av året. Videre har scenario 4 også en lignende kurve som for kalibrert modell, bare at maksimum settpunkt for luftmengde er redusert i dette scenarioet, og dermed er energibruk og effekttopp for pumper og vifter redusert fra tabell 27b. For kalibrert modell, scenario 1, scenario 2, scenario 3 og scenario 4 er SFP omtrent lik $3 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ ved høyere tilluftsmengder. Av den grunn gir ikke disse scenarioene redusert SFP i betydelig grad.

I motsetning viser scenario 5 en betydelig reduksjon i SFP sammenliknet med kalibrert modell i figur 94. Dette skyldes at tilluftstemperaturen reguleres etter returtemperaturen, og det er ikke nødvendig med like store luftmengder som reguleres etter innnetemperatur og/eller CO_2 -nivå. I scenario 5.1 og scenario 5.2 reguleres luftmengdene i stor grad etter innnetemperatur, mens i scenario 5.3 reguleres luftmengdene etter CO_2 -nivå. Dette gir mindre energibruk og effekttopp for pumper og vifter gitt i tabell 27b for scenario 5. Siden CO_2 -nivået i betydelig liten grad overstiger minimum settpunkt i scenario 5.3, er luftmengdene betydelig lave i dette scenarioet. For scenario 5.1 er SFP omtrent lik $1,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ ved høyere luftmengder, for scenario 5.2 er SFP omtrent lik $1 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ ved høyere luftmengder og for scenario 5.3 er SFP omtrent lik $0,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ ved høyere luftmengder. Det er likevel viktig å være klar over at luftmengdene ikke må være for lave.

5.12 Årlige kostnader for termisk og elektrisk energi

Beregningen for årlige kostnader baserer seg på likning 13 og likning 14, hvor tabell 28 gir verdiene som brukes i likningene for beregningen.

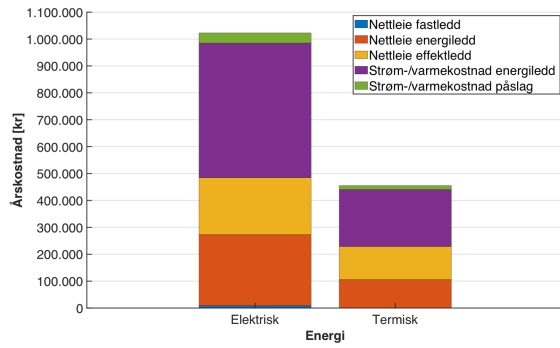
Tabell 28 Verdier for beregning av elektrisitets- og fjernvarmekostnad for 2019 [44, 45]

Type kostnad	Pris	Elektrisitet	Fjernvarme
Nettleie	Fastpris [kr/år]	8800	–
	Energipris [øre/kWh]	5,00	5,00
	Forbruksavgift [øre/kWh]	15,83	15,83
	Effektpris [kr/kW/måned]	Tabell 4 og 5	Tabell 4 og 5
Strøm-/varmekostnad	Energipris [øre/kWh]	Spotpris 2019 [43]	Tabell 34
	Påslag [øre/kWh]	3,00	3,00

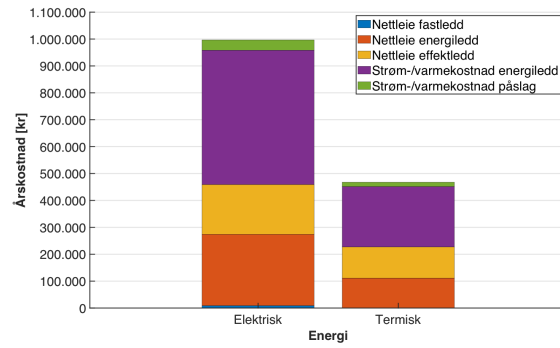
Energiprisen for strømkostnaden i tabell 28 er timesverdier for spotprisen fra 2019, mens energiprisen for varmekostnaden bruker månedsmiddel for spotpris. Ved manglende timesverdi er det antatt en verdi som tilsvarende gjennomsnittet av forrige timesverdi og neste timesverdi. Månedsmiddel for spotpris, som er gjennomsnittlig strømpris for hver måned for 2019, er gitt i tabell 34 i vedlegg F. Beregningen av kostnadene for kalibrert modell for hele året er gitt i vedlegg F. Samme beregning gjelder for scenarioene.

I den kalibrerte modellen dekker fjernvarme både grunnlast og topplast for romoppvarming, og romoppvarming er dermed termisk energi. Dette gjelder både ventilasjonsvarmen og aerotemperne. Fjernkjøling dekker romkjøling i den kalibrerte modellen, og er også termisk energi. For den reelle bygningen er den reversible varmepumpen grunnlast for romoppvarming og kjølemaskin for romkjøling. Varmepumpen bruker elektrisitet. Det vil ikke bli beregnet kostnader for kjøling da den kalibrerte modellen bruker fjernkjøling, og modellen skiller ikke mellom romoppvarming fra varmepumpe og romoppvarming fra fjernvarme. I tillegg er den kalibrerte modellen kalibrert ved å sammenlikne simulert og reell romoppvarming. Energipostene pumper og vifter, belysning og teknisk utstyr går på elektrisitet. Til slutt er varmt tappevann dekket av fjernvarme.

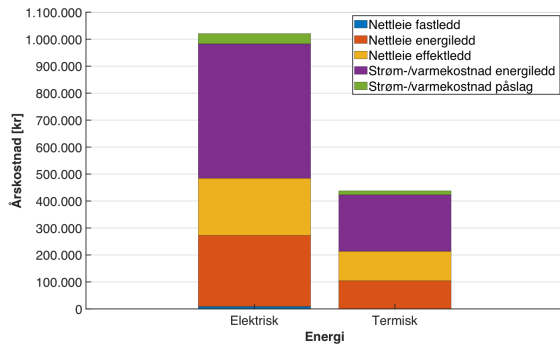
Figur 95 viser årlige kostnader for termisk og elektrisk energi, hvor figur 95a, figur 95b, figur 95c, figur 95d, figur 95e, figur 95f, figur 95g og figur 95h henholdsvis viser årskostnad for kalibrert modell, scenario 1, scenario 2, scenario 3, scenario 4, scenario 5.1, scenario 5.2 og scenario 5.3.



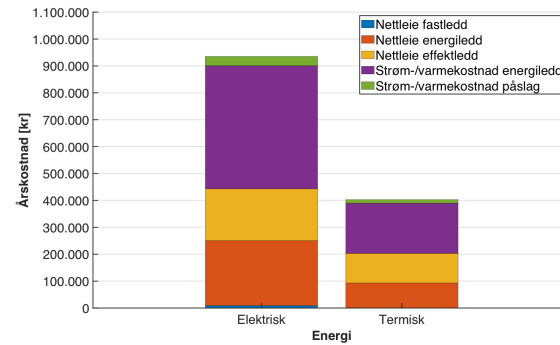
(a) Kalibrert modell



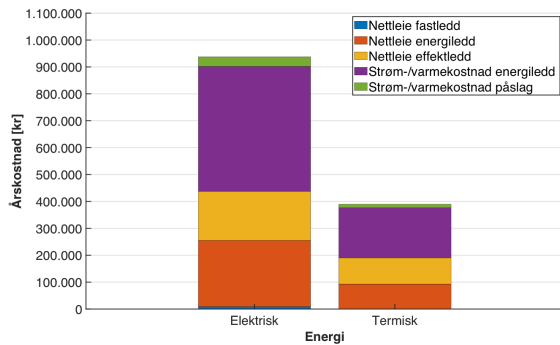
(b) Scenario 1 - Forskjøvet profil for tilluftstemperatur



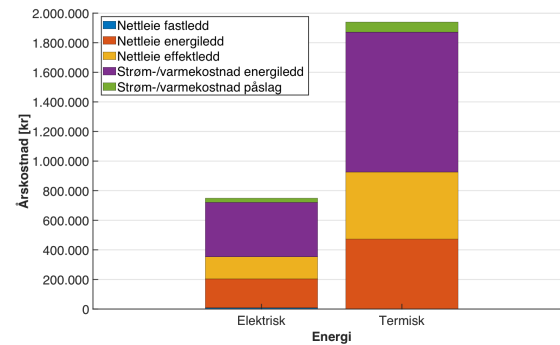
(c) Scenario 2 - Endret tilluftstemperatur ved lav utetemperatur



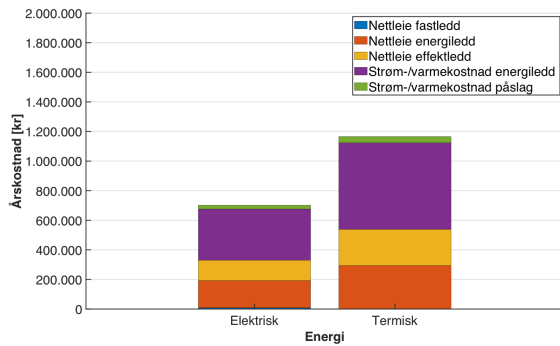
(d) Scenario 3 - Minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur lik 21°C og 24°C



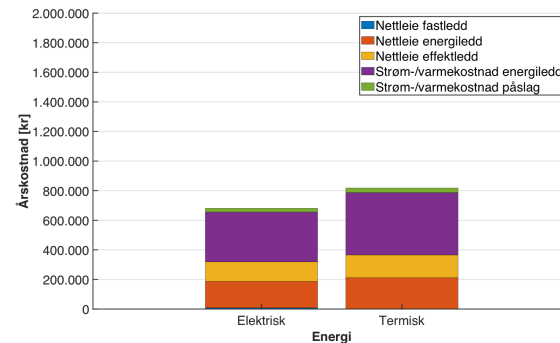
(e) Scenario 4 - Redusert maksimum settpunkt for luftmengde



(f) Scenario 5.1 - Return air temperature control



(g) Scenario 5.2 - Return air temperature control med $SP_{inne}=[21,24]^{\circ}C$



(h) Scenario 5.3 - Return air temperature control med VAV CO2

Figur 95 Årlige kostnader for termisk og elektrisk energi (året 2019)

Tabell 29 viser verdiene for nettleien og strøm-/varmekostnaden fra figur 95, i tillegg til eventuelle kostnadsbesparelser fra kalibrert modell. Tabell 29a viser for scenario 1, scenario 2, scenario 3 og scenario 4, og tabell 29b viser for scenario 5.1, scenario 5.2 og scenario 5.3. I tabell 29 står forkortelsen EL for elektrisitet og forkortelsen FV står for fjernvarme.

Tabell 29 Verdier for årskostnad uten og med effektledd (året 2019)

Kostnad	Kalibrert		Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3		Scenario 4	
	EL	FV	EL	FV	EL	FV	EL	FV	EL	FV
Nettleie fastledd [kr]	8.800	0	8.800	0	8.800	0	8.800	0	8.800	0
Nettleie energiledd [kr]	264.126	105.507	265.363	111.438	263.537	104.301	241.713	93.176	246.241	92.908
Nettleie effektledd [kr]	211.950	122.929	184.764	115.816	211.911	109.550	192.647	109.763	182.628	97.500
Strøm-/varmekostnad energiledd [kr]	499.935	211.703	499.632	224.576	498.477	209.032	457.680	186.691	464.402	185.791
Strøm-/varmekostnad påslag [kr]	38.040	15.195	38.218	16.050	37.955	15.022	34.812	13.419	35.464	13.381
Total kostnad uten effektledd [kr]	810.901	332.405	812.013	352.064	808.769	328.355	743.005	293.286	754.907	292.080
Total kostnad med effektledd [kr]	1.022.851	455.334	996.777	467.880	1.020.680	437.905	935.652	403.049	937.535	389.580
Kostnadsbesparelse med effektledd [kr]	–	–	26.074	–12.546	2.171	17.429	87.199	52.285	85.316	65.754

(a) Scenario 1, scenario 2, scenario 3 og scenario 4

Kostnad	Kalibrert		Scenario 5.1		Scenario 5.2		Scenario 5.3	
	EL	FV	EL	FV	EL	FV	EL	FV
Nettleie fastledd [kr]	8.800	0	8.800	0	8.800	0	8.800	0
Nettleie energiledd [kr]	264.126	105.507	194.901	472.429	183.125	293.700	177.716	211.643
Nettleie effektledd [kr]	211.950	122.929	149.186	453.152	137.918	244.562	132.558	154.248
Strøm-/varmekostnad energiledd [kr]	499.935	211.703	367.950	946.504	346.014	585.008	335.873	421.479
Strøm-/varmekostnad påslag [kr]	38.040	15.195	28.070	68.041	26.374	42.300	25.595	30.482
Total kostnad uten effektledd [kr]	810.901	332.405	599.721	1.486.974	564.313	921.008	547.984	663.604
Total kostnad med effektledd [kr]	1.022.851	455.334	748.907	1.940.126	702.231	1.165.570	680.542	817.852
Kostnadsbesparelse med effektledd [kr]	–	–	273.944	–1.484.792	320.620	–710.236	342.309	–362.518

(b) Scenario 5.1, scenario 5.2, scenario 5.3

Scenario 1 - Forskjøvet profil for tilluftstemperatur

For scenario 1 viser tabell 29 at flere ledd i elektrisitetskostnaden øker, med unntak av energileddet i strømkostnaden og effektleddet. Generelt skyldes dette at energibruket til pumper og vifter er større for scenario 1 enn kalibrert modell, med en økning på 1% fra tabell 27b. Årsaken er at det brukes større luftmengder for å opprettholde settpunkt for innetemperatur og CO₂-nivå. Grunnen til at energileddet for strømkostnaden er redusert skyldes at denne kostnaden avhenger av spotprisen, men energibruket til pumper og vifter er fortsatt større enn for kalibrert modell. For effektleddet for elektrisitet viser tabell 27b at årlig effekttopp for pumper og vifter verken er økt eller redusert. Dette skyldes at scenario 1 innebærer forskjøvet profil for vinter-månedene, hvor de resterende månedene er som for kalibrert modell. Videre oppstår ikke årlig effekttopp i disse vinter-månedene. Effektleddet avregnes etter høyeste timesverdi for effekt i hver måned, og siden effekttoppene for elektrisitet er redusert i alle vinter-månedene, vil effektleddet for elektrisitet bli redusert. For elektrisitet er kostnadsbesparelsen 26074 kr for scenario 1 fra tabell 29.

Kostnaden for fjernvarme, med unntak av effektleddet, øker fra kalibrert modell til scenario 1. Som for pumper og vifter skyldes dette at energibruket til ventilasjonsvarme er større for scenario 1 enn kalibrert modell, med en økning på 8% fra tabell 27a. For effektleddet for fjernvarme viser tabell

27a at årlig effekttopp for ventilasjonsvarme er redusert med 12% fra kalibrert modell. Generelt er effekttoppene for fjernvarme redusert for hver vinter-måned, og da vil også effektleddet for fjernvarme reduseres. Likevel gir fjernvarmekostnaden for energi en større kostnad enn for effekt, og da vil total kostnad også bli høyere. Dermed er det en kostnadsøkning for fjernvarme på 12546 kr for scenario 1 fra tabell 29.

Scenario 2 - Endret tilluftstemperatur ved lav utetemperatur

Alle kostnadene for elektrisitet og fjernvarme er redusert i scenario 2 fra tabell 29. Dette skyldes at energibruk til pumper og vifter er redusert med 1% fra tabell 27b, og energibruk til ventilasjonsvarme er redusert med 2% fra tabell 27a. For scenario 2 brukes det mindre luftmengder for å opprettholde settpunktet for innnetemperaturen og CO₂-nivået enn for kalibrert modell. Årsaken til at energireduksjonene er betydelig lave skyldes at scenario 2 kun innebærer å endre settpunkt for tilluftstemperatur de kaldeste dagene i året, hvor de resterende dagene er som for kalibrert modell. For de kalde dagene er settpunktet for tilluftstemperaturen økt minst like mange antall grader celsius som settpunktet for tilluftstemperaturen er redusert for scenario 2.

For effektleddet for elektrisitet viser tabell 27b at årlig effekttopp for pumper og vifter verken har økt eller redusert. Effekttoppene for elektrisitet har heller ikke økt eller redusert for vinter-månedene. Av den grunn er effektleddene for elektrisitet like for kalibrert modell og scenario 2 fra tabell 29, men det er likevel en ubetydelig reduksjon i effektleddet for scenario 2. Dette skyldes at simuleringen gav en liten økning i effekttopp om sommeren som ikke er berørt i scenario 2. Når det gjelder effektleddet for fjernvarme viser tabell 27a en reduksjon på 20% for årlig effekttopp for ventilasjonsvarme. Effekttoppene er også redusert for alle vinter-måneder, og dermed er effektleddet for fjernvarme redusert. Årsaken til at det kun er effekttoppene for fjernvarme som reduseres, er at effekttoppene for elektrisitet ikke oppstår på de kaldeste dagene som det er gjort endringer på for tilluftstemperaturen. For scenario 2 er kostnadsbesparelsen for elektrisitet 2171 kr, og kostnadsbesparelsen for fjernvarme er 17429 kr fra tabell 29.

Scenario 3 - Minimum og maksimum settpunkt for innnetemperatur lik 21°C og 24°C

For scenario 3 viser tabell 29 at alle kostnadene er redusert fra kalibrert modell. Årsaken er at energibruk til pumper og vifter er redusert med 23% fra tabell 27b, og energibruk til ventilasjonsvarme er redusert med 17% fra tabell 27a. For alle månedene i løpet av året er energibruk til pumper og vifter redusert. For alle månedene med behov for romoppvarming er også energibruk til ventilasjonsvarme redusert. Energireduksjonene for begge energipostene er naturlig når settpunktet for romoppvarming er redusert og settpunktet for romkjøling er økt, og det brukes mindre luftmengder for å opprettholde settpunktet for innnetemperaturen og CO₂-nivået enn kalibrert modell. En sensitivitetsanalyse av settpunkt for innnetemperaturen er gitt i delkapittel 5.13.

Årlig effekttopp for pumper og vifter er redusert med 9% fra tabell 27b, og effekttoppene for elektrisitet er redusert for alle månedene. For ventilasjonsvarme er årlig effekttopp redusert med 16% fra tabell 27a, og effekttoppene for fjernvarme er redusert for alle vinter-månedene. Dermed er

effektledet redusert for både elektrisitet og fjernvarme. For elektrisitet er kostnadsbesparelsen 87199 kr, og for fjernvarmen er kostnadsbesparelsen 52285 kr for scenario 3 fra tabell 29.

Scenario 4 - Redusert maksimum settpunkt for luftmengde

Alle kostnadene for elektrisitet og fjernvarme er også redusert for scenario 4 fra tabell 29. Dette skyldes at energibruk til pumper og vifter er redusert med 18% fra tabell 27b og energibruk til ventilasjonsvarme er redusert med 17% fra tabell 27a. Energiforbruk for pumper og vifter er redusert for alle månedene, da scenario 4 har lavere maksimum settpunkt for luftmengde for hele året. Dermed har scenario 4 mindre total luftmengde enn kalibrert modell. For alle månedene med behov for romoppvarming er også energibruk til ventilasjonsvarme redusert. Energireduksjonene for begge energipostene er naturlig når settpunktet for maksimal luftmengde er redusert, da både energibruk til pumper og vifter og ventilasjonsvarme avhenger av luftmengde. En sensitivitetsanalyse av settpunkt for luftmengde er gitt i delkapittel 5.13.

Årlig effekttopp for pumper og vifter er redusert med 38% fra tabell 27b, og effekttoppene for elektrisitet er redusert for alle månedene. Ventilasjonsvarme har en årlig effekttopp som er redusert med 33% fra tabell 27a, og effekttoppene for fjernvarme er redusert for alle månedene som har behov for romoppvarming. Av den grunn er effektledet redusert for både elektrisitet og fjernvarme. Elektrisitet har en kostnadsbesparelse på 85316 kr, og fjernvarme har en kostnadsbesparelse på 65754 kr for scenario 4 fra tabell 29.

Scenario 5 - Return air temperature control

Generelt har scenario 5 en kostnadsbesparelse for elektrisitet, og en kostnadsøkning for fjernvarme fra tabell 29. Alle leddene i elektrisitetskostnaden er redusert, og alle leddene i fjernvarmekostnaden er økt fra kalibrert modell. Kostnadsbesparelsen for elektrisitet skyldes at energibruk og effekttopp for pumper og vifter er redusert, da luftmengdene er betydelig redusert i scenario 5. Kostnadsøkningen for fjernvarme skyldes at energibruk og effekttopp for ventilasjonsvarme er økt i scenario 5. Dette skyldes igjen at scenarioet sammenlignes med den kalibrerte modellen som ikke lar settpunktet for tilluftstemperaturen ta hensyn til interne laster og varmebalansen i modellen. Likevel er scenario 5 en bedre måte å regulere settpunktet for tilluftstemperaturen på.

Forskjellen mellom scenario 5.1 og scenario 5.2 er at scenario 5.1 har settpunkt for innetemperatur lik den kalibrerte modellen, mens scenario 5.2 har minimum settpunkt for innetemperatur lik 21°C og maksimum settpunkt for innetemperatur 24°C. For scenario 5.1 er energibruk til pumper og vifter redusert med 71% og årlig effekttopp er redusert med 57% fra tabell 27b. Energiforbruk for ventilasjonsvarme er økt med 491% og årlig effekttopp er økt med 369% fra tabell 27a. For scenario 5.2 er energibruk for pumper og vifter redusert med 83% og årlig effekttopp er redusert med 82% fra tabell 27b. Energiforbruk for ventilasjonsvarme er økt med 252% og årlig effekttopp er økt med 93% fra tabell 27a. Årsaken til at scenario 5.2 har mindre energibruk og effekttopp for både pumper og vifter og ventilasjonsvarme, er at luftmengdene er større i scenario 5.1. Dette skyldes igjen at luftmengdene prøver å oppnå andre settpunkt for innetemperaturen i scenario 5.1.

Scenario 5.3 er i større grad forskjellig fra scenario 5.1 og scenario 5.2. Dette skyldes at scenario 5.3 bruker VAV CO₂-regulering, og ikke VAV temperatur- og CO₂-regulering slik som scenario 5.1 og scenario 5.2. Energibruk for pumper og vifter er redusert med 89% og årlig effekttopp er redusert med 95% fra tabell 27b. Energibruk for ventilasjonsvarme er økt med 142% og årlig effekttopp er økt med 19% fra tabell 27a. Dette skyldes at luftmengdene ikke reguleres etter innetemperatur og CO₂-nivå, men kun etter CO₂-nivå. Siden CO₂-nivået i betydelig liten grad overstiger minimum settpunkt for CO₂-nivået, er også luftmengdene betydelig lave i scenario 5.3. Av den grunn har scenario 5.3 mindre energibruk og effekttopp for både pumper og vifter og ventilasjonsvarme sammenliknet med scenario 5.1 og scenario 5.2.

Oppsummering

Tabell 30 viser kostnadsbesparelsene og redusert effektledd for de ulike scenarioene i forhold til den kalibrerte modellen. Verdiene fra tabell 30 er beregnet ved å bruke tabell 29.

Tabell 30 Total kostnadsbesparelse og redusert effektledd (året 2019)

Scenario	Total kostnadsbesparelse [kr]	Redusert effektledd for elektrisk energi [%]	Redusert effektledd for termisk energi [%]	Totalt redusert effektledd [%]
Kalibrert	–	–	–	–
Scenario 1	13.528	13	6	10
Scenario 2	19.600	0	11	4
Scenario 3	139.484	9	11	10
Scenario 4	151.070	14	21	16
Scenario 5.1	–1.210.848	30	–269	–80
Scenario 5.2	–389.616	35	–99	–14
Scenario 5.3	–20.209	37	–25	14

Tabell 30 viser mindre kostnadsbesparelse for scenario 1 og scenario 2, og større kostnadsbesparelse for scenario 3 og scenario 4. Videre er det ikke en kostnadsbesparelse for scenario 5. Effektleddet for elektrisk energi er redusert for alle scenarioene med unntak av scenario 2. Effektleddet for termisk energi er redusert for scenario 1, scenario 2, scenario 3 og scenario 4, og er økt for scenario 5. Totalt effektledd for elektrisk og termisk energi er redusert for alle scenarioene, med unntak av scenario 5.1 og scenario 5.2. Verdier fra tabell 30 og tabell 27 brukes for å konkludere i kapittel 7.

For å avgjøre hvilken smart indikator fra delkapittel 2.10 de ulike scenarioene er eksempler på, er det nødvendig å studere profiler av ventilasjonsvarmen for scenarioene og sammenlikne med profilene for kalibrert modell. Figur 130 i vedlegg H viser profiler av ventilasjonsvarmen for kalibrert modell, scenario 1, scenario 2, scenario 3 og scenario 4. Det er kun disse scenarioene som har redusert effekttopp for ventilasjonsvarmen i forhold til kalibrert modell fra tabell 27. Forskyvning av ventilasjonslast til andre tidspunkt slik at effekttoppen reduseres, uten at det gir energireduksjon, kalles for Load Shifting. Scenario 1 er et eksempel på indikatoren Load Shifting dersom økt energibruk for ventilasjonsvarmen på 8% fra tabell 27 neglisjeres. Dette skyldes at scenario 1 er basert på å forskyve profiler for tilluftstemperaturen. Scenario 2 er i stor grad et eksempel på indikatoren

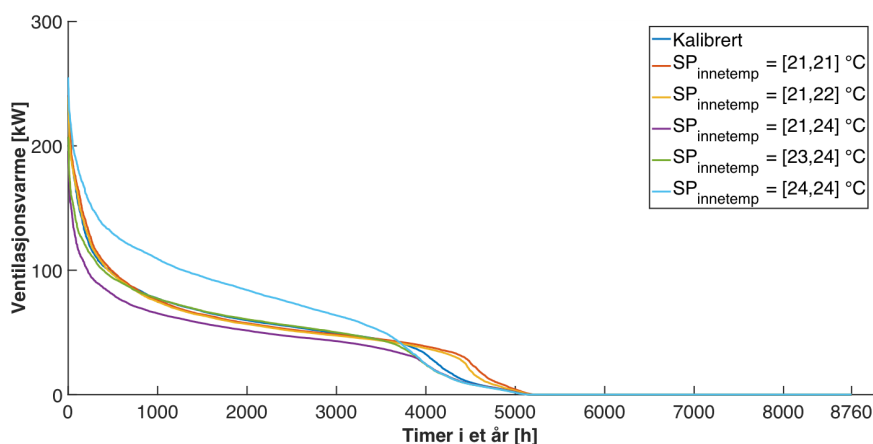
Peak Load Reduction, som betyr at effekttopp og energibruk for ventilasjonsvarme reduseres ved reduksjon av effekttopper. Dette skyldes at settpunktet for tilluftstemperaturen kun endres for de kaldeste dagene. Scenario 3 og scenario 4 gir generelt mindre effekttopp og energibruk gjennom året, men scenarioene blir likevel sett på som indikatoren Peak Load Reduction da det er gjort endringer i settpunktet for innetemperatur og luftmengde i disse scenarioene.

5.13 Sensitivitetsanalyse

Sensitivitetsanalysen baserer seg på å gjøre enkle parameter-endringer i kalibrert modell, og se på hvordan dette påvirker ventilasjonsvarmen. Parameter-endringer inkluderer endringer i minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur og luftmengde. I underdelkapittel 5.10.2 ble det observert og beskrevet en brattere kurve for ventilasjonsvarme, og at dette i hovedsak skyldes settpunkt for innetemperatur og luftmengde.

Settpunkt for innetemperatur

Figur 96 viser varighetskurve for ventilasjonsvarme for den kalibrerte modellen med ulike minimum og maksimum settpunkt for innetemperatur, og tabell 31 viser tilhørende effekttopp.



Figur 96 Sensitivitetsanalyse av innetemperatur på ventilasjonsvarme

Tabell 31 Sensitivitetsanalyse av innetemperatur på ventilasjonsvarme

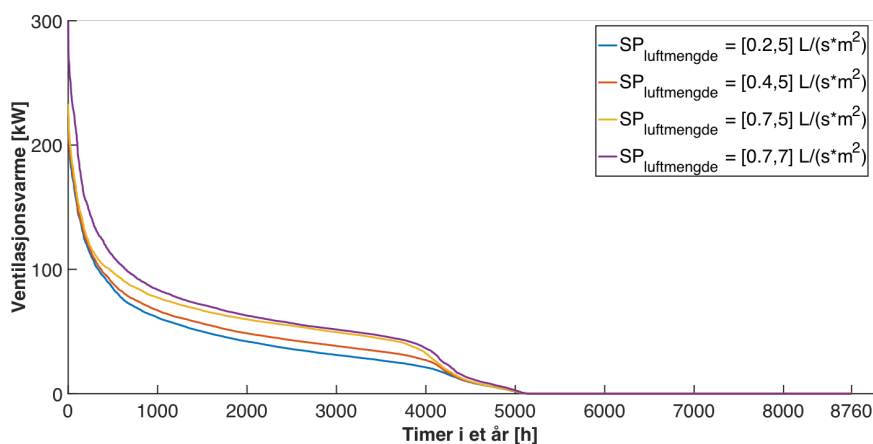
Settpunkt for min. og maks. innetemperatur [°C]	Effekttopp for ventilasjonsvarme [kW]
Kalibrert	233
[21, 21]	241
[21, 22]	239
[21, 24]	196
[23, 24]	207
[24, 24]	255

Ved sammenlikning av maksimum settpunkt for innetemperatur brukes intervallene [21,21], [21,22] og [21,24], og ved sammenlikning av minimum settpunkt for innetemperatur brukes intervallene

[21,24], [23,24] og [24,24]. Figur 96 viser at høyere maksimum settpunkt for innetemperatur gir lavere energibruk til ventilasjonsvarme, og dette gjelder spesielt for de siste sorterte timesverdiene hvor kurven flater mer ut for høyere maksimum settpunkt for innetemperatur. Lavere minimum settpunkt for innetemperatur gir lavere energibruk til ventilasjonsvarme, og dette gjelder spesielt for de første sorterte timesverdiene hvor kurven er brattere ved lavere minimum settpunkt for innetemperatur. Tabell 31 viser at effekttoppen for ventilasjonsvarme er minst ved lavt minimum settpunkt for innetemperatur og høyt maksimum settpunkt for innetemperatur.

Settpunkt for luftmengde

Figur 97 viser varighetskurve for ventilasjonsvarme for den kalibrerte modellen med ulike minimum og maksimum settpunkt for luftmengde, og tabell 32 viser tilhørende effekttopp.



Figur 97 Sensitivitetsanalyse av luftmengde på ventilasjonsvarme

Tabell 32 Sensitivitetsanalyse av luftmengde på ventilasjonsvarme

Settpunkt for min. og maks. luftmengde [$L/(s \cdot m^2)$]	Effekttopp for ventilasjonsvarme [kW]
[0.2, 5]	224
[0.4, 5]	220
[0.7, 5] (Kalibrert)	233
[0.7, 7]	300

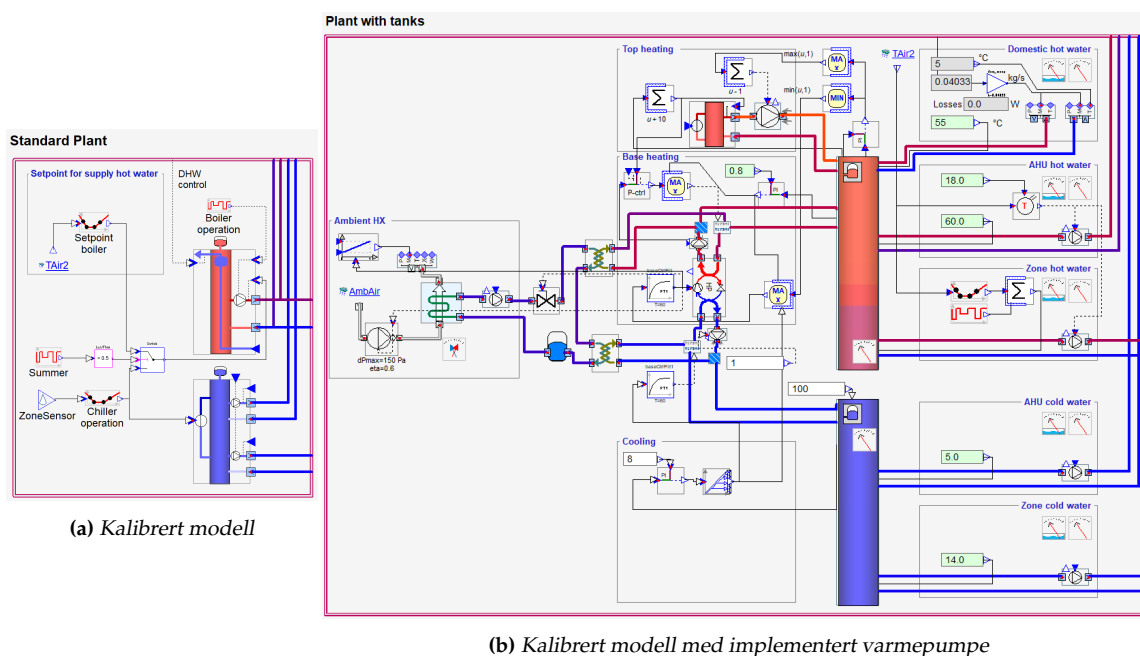
Ved sammenlikning av minimum settpunkt for luftmengde brukes intervallene [0.2,5], [0.4,5] og [0.7,5], og ved sammenlikning av maksimum settpunkt for luftmengde brukes intervallene [0.7,5] og [0.7,7]. Figur 97 viser at lavere minimum settpunkt luftmengde gir lavere energibruk til ventilasjonsvarme, og dette gjelder spesielt for de siste sorterte timesverdiene hvor kurven flater mer ut for lavere minimum settpunkt luftmengde. Lavere maksimum settpunkt for luftmengde gir lavere energibruk til ventilasjonsvarme, og dette gjelder spesielt for de første sorterte timesverdiene hvor kurven er brattere ved lavere maksimum settpunkt for luftmengde. Tabell 32 viser at effekttoppen for ventilasjonsvarme reduseres ved lavere maksimum settpunkt for luftmengde.

5.14 Forbedret modell

Etter analysen av effektreduksjon for den kalibrerte modellen, ble modellen forbedret ved å implementere varmepumpen fra den reelle bygningen i den kalibrerte modellen. I tillegg er modellen forbedret ved å implementere ventilasjonsaggregat som regulerer tilluftstemperaturen etter returtemperaturene i aggregatene. Den kalibrerte modellen er kalibrert ved å sammenlikne simulert og reell romoppvarming, men med bedre regulering av tilluftstemperaturen vil parametere som for høy innetemperatur og for høy luftmengde i kalibrert modell kunne bli forbedret.

5.14.1 Implementert reversibel varmepumpe

Figur 98 viser hvordan anlegget for kontorbygningen er implementert i IDA ICE, hvor figur 98a viser for den kalibrerte modellen mens figur 98b viser for den kalibrerte modellen med den nye implementerte reversible varmepumpen som dekker oppvarming og kjøling via ventilasjonsluft.

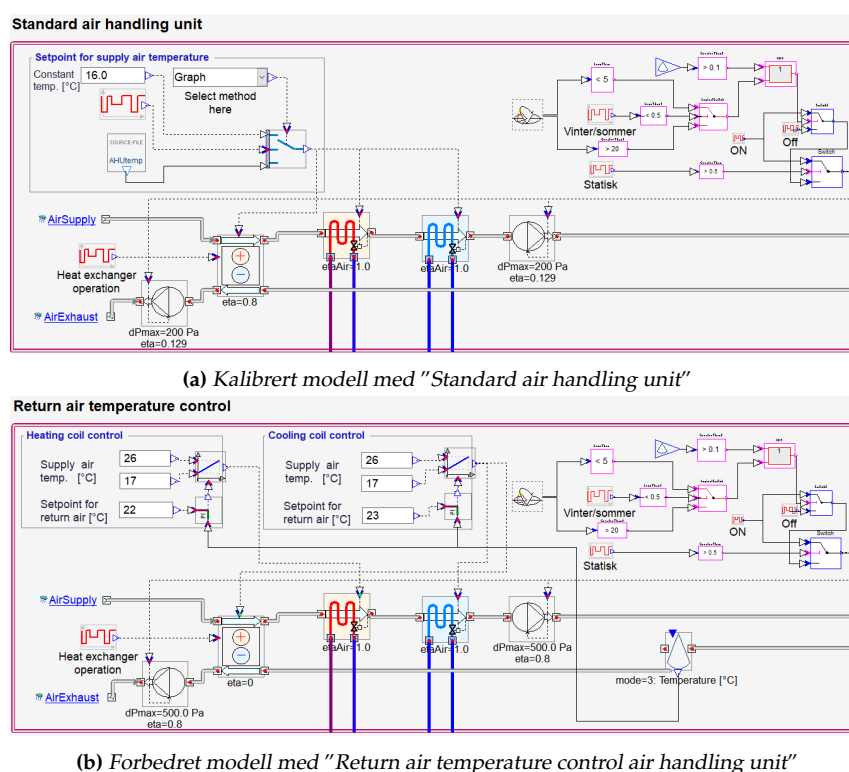


Figur 98 Anlegg i IDA ICE

Figur 98 viser at overgangen fra kalibrert modell uten varmepumpen til kalibrert modell med varmepumpen er omfattende. Likevel er det flere parametere som er like. Informasjon om kontorbygningen fra kapittel 4 er brukt for å implementere varmepumpen. Hovedelementene i overgangen er å implementere en luft-til-vann reversibel varmepumpe som dekker grunnlast for romoppvarming og romkjøling, og at fjernvarmen kun dekker topplast for romoppvarming og oppvarming av tappevann. Dette gir mulighet for analyse av varmepumpen, ventilasjonskjøling, og hvordan energibruk til ventilasjonsvarmen fordeles mellom varmepumpen og fjernvarmen. Dette blir sett på som videre arbeid, da nåværende modell med implementert varmepumpe krasjer under simulering på grunn av drift av varmepumpen og andre komponenter.

5.14.2 Regulering av tilluftstemperatur

For å forbedre modellen bør "Return air temperature control" benyttes. Dette er implementert i scenario 5. I motsetning til kalibrert modell vil denne reguleringen varme opp uteluften avhengig av varmebehov i rommene, og er dermed avhengig av interne laster og varmebalanse i modellen. Det samme gjelder for kjøling. Da reguleres tilluftstemperatur mellom minimum og maksimum settpunkt for å oppnå et settpunkt for returtemperatur i aggregatene. Minimum og maksimum settpunkt for tilluftstemperatur er gitt i tabell 11, og settpunkt for returtemperatur er 22°C for varmebatteri og 23°C for kjølebatteri. Figur 99 viser hvordan aggregat AHU1 er implementert i IDA ICE, hvor figur 99a viser for kalibrert modell, mens figur 99b viser forbedret modell med "Return air temperature control". Tilsvarende er implementert for de andre aggregatene.



Figur 99 Ventilasjonsaggregat AHU1 i IDA ICE

Figur 99a viser ventilasjonsaggregat fra kalibrert modell, med målt gjennomsnittlig tilluftstemperatur navngitt som AHUtemp i figuren. På høyre side av figur 99a og figur 99b vises driften av aggregatene gitt i tabell 15. I figur 99b kan minimum og maksimum settpunkt for tilluftstemperaturen observeres til å henholdsvis være 17°C og 26°C, og settpunktet for returtemperaturen kan observeres til å være 22°C for varmebatteriet. Det er ikke gjort en sensitivitetsanalyse av hvordan settpunkt for innetemperatur, returtemperatur, tilluftstemperatur og type regulering av luftmengdene påvirker resultater for ulike energiposter og inn klima. I tillegg bør det lages egne "control macros" i IDA ICE, da det vil være samtidig behov for oppvarming og kjøling i ulike rom tilkoblet samme aggregat. Dette blir også sett på som videre arbeid.

6 Diskusjon

Diskusjonen baserer seg på å bruke resultatene fra kapittel 5 til å diskutere oppgaven.

6.1 Kalibrert modell, forbedret modell og videre arbeid

Den kalibrerte modellen benytter gjennomsnittlig målt tilluftstemperatur som settpunktet for tilluftstemperaturen i de ulike aggregatene. Dette var en avgjørende parameter for at målt og simulert energibruk for romoppvarming skulle sammenfalle i størst mulig grad. Bruken av målt tilluftstemperatur betyr at varmebatteriet varmer opp uteluften til settpunktet for tilluftstemperaturen uavhengig av det samlede varmebehovet, eller kjølebehovet, for rommene tilkoblet samme aggregat. Med andre ord er settpunktet for tilluftstemperaturen uavhengig av interne laster og varmebalanse i modellen, og settpunktet for tilluftstemperaturen styres dermed ikke på en hensiktsmessig måte. Interne laster i den kalibrerte modellen er også ulike fra den reelle bygningen. For den reelle bygningen beregnes tilluftstemperaturen, som brukes i den kalibrerte modellen, ut fra det samlede varmebehovet og/eller kjølebehovet tilkoblet samme aggregat. Til slutt vil de ulike bygningsdelene ha ulike varme- og/eller kjølebehov, og dermed bør ikke tilluftstemperaturen være den samme for de ulike aggregatene.

Videre vil den oppvarmede tilluften tilføres de ulike rommene. Ved gitt tilluftstemperatur regulerer VAV temperatur- og CO₂-reguleringen så optimalt som mulig for å oppnå settpunktene for innetemperatur og CO₂-nivå. Av den grunn er den kalibrerte modellen forbedret ved å regulere tilluftstemperaturen mellom minimum og maksimum settpunkt for tilluftstemperatur for å oppnå et settpunkt for returtemperatur i aggregatene. VAV temperatur- og CO₂-reguleringen regulerer luftmengdene mellom minimum og maksimum settpunkt for luftmengde avhengig av om tilluftstemperaturen kan hjelpe med varme eller kulde, eller for å opprettholde maksimalt CO₂-nivå om nødvendig. Likevel, siden settpunktet for innetemperaturen påvirker luftmengden, vil også dette påvirke returtemperaturen dersom både den forbedrede reguleringen av tilluftstemperaturen og VAV temperatur- og CO₂-nivå benyttes.

VAV temperatur- og CO₂-regulering har også den ulempen at dersom settpunktet for oppvarming er nådd i et rom og tilluftstemperaturen er høyere enn innetemperaturen, vil tilluftstemperaturen uansett gi varmetilskudd til rommet. Dette skyldes at luftmengdene har et minimum settpunkt for luftmengde, og kan ikke stenges fullstendig. Dersom tilluftstemperaturen er lavere enn innetemperaturen og settpunktet for kjøling er nådd i et rom, vil tilluftstemperaturen uansett gi kjøletilskudd til rommet. Dette skyldes igjen minimum settpunkt for luftmengde. I tillegg er ikke regulatorparametere for oppvarming, kjøling og CO₂-nivå i den kalibrerte modellen nødvendigvis like som parameterne for spjeldene og tilluftsventilene i den reelle kontorbygningen. Av den grunn er videre arbeid å lage en mer reell regulator ved å bruke regulatorparametere fra den reelle bygningen.

Det kan både være varmebehov og kjølebehov på samme tid for ulike rom tilkoblet samme aggregat, og det er kun én tilluftstemperatur som tilføres rom tilkoblet samme aggregat i den forbedrede modellen med forbedret regulering av tilluftstemperaturen. I den reelle bygningen er reguleringen av tilluftstemperaturen kompleks, som beskrevet i delkapittel 4.3.1. I tillegg har den reelle kontorbygningen enkelte aggregater med to ulike soner. Dette skyldes at det er større ulikheter mellom interne laster i disse to sonene, og det kan både være varmebehov og kjølebehov på samme tid i hver av disse sonene. På den måten blir det enklere å regulere tilluftstemperaturen i den reelle bygningen, da hvert enkelt aggregat har separate soner for ulike interne laster. Av den grunn er videre arbeid å lage egne "control macros" i den forbedrede modellen, da det vil være samtidig behov for oppvarming og kjøling i ulike soner. Det er viktig at temperaturfordelingen mellom rommene i den forbedrede modellen er optimal, siden tilluftstemperaturen reguleres etter returtemperaturen i aggregatene og ikke returtemperaturen for hvert rom. Oppsummert er videre arbeid å jobbe med denne typen regulering av tilluftstemperatur i IDA ICE. Dette inkluderer settpunkt for innnetemperatur, returtemperatur, tilluftstemperatur og ikke minst type regulering av luftmengdene.

Den kalibrerte modellen er også forbedret ved å implementere den reversible varmepumpen. Som tidligere skrevet krasjer denne modellen under simulering, og det er nødvendig å jobbe videre med drift av varmepumpen og andre komponenter for å få simuleringen til å kjøre hele året. Dersom dette oppnås er det mulig å analysere varmepumpen, ventilasjonskjøling og hvordan energibruk til ventilasjonsvarmen fordeles mellom varmepumpen og fjernvarmen.

6.2 Effekttopper og forsyningside

Kapittel 5 viser at ventilasjonsvarmen, i tillegg til energiposten pumper og vifter, utgjør en betydelig del av årlig energibruk i kontorbygningen. Interne laster og termisk masse reduserer energibruk for ventilasjonsvarme, og resirkulering av inneluft i aggregatene kunne også gi mindre energibruk. I tillegg viser kapittel 5 at bygningen har potensial for reduksjon av effekttopper for ventilasjonsvarmen gjennom Energi-Temperatur-kurver. Generelt gir høye effekttopper utfordringer for forsyningsiden, både for fjernvarmenettet og strømmettet. Høye effekttopper kan føre til at det til tider må spisses med varme fra andre energikilder for fjernvarmenettet, og det er fortsatt en andel av topplasten som er fossil i Trondheim. Da blir andelen av fornybare kilder lavere ved høye effekttopper. Ved større effekttopper må fjernvarmenettet også ha større kapasitet og dimensjoner på ventiler, pumper og rør, som kan gi større driftsproblemer. For strømmettet kan det være at det må investeres i mer nett for å sikre forsyningen av strøm.

Bruk av flere systemer for energiforsyning, som fjernvarmenett og strømmett, vil være med på å redusere effekttopper for det enkelte system. Likevel er det utfordrende for fjernvarmenettet dersom en bygning har varmepumpe som grunnlast og fjernvarme som topplast for romoppvarming. Dette skyldes at varmepumpen vil dekke romoppvarmingen store deler av året, mens fjernvarmen kun brukes de kaldeste dagene i året. En luft-til-vann-varmepumpe er ikke en god teknisk

løsning dersom effektreduksjon av ventilasjonsvarme ønskes. Dette skyldes at varmpumpens varmeytelse avtar med avtagende utetemperatur, og varmpumpen er også slått av ved en bestemt lav utetemperatur. Dette betyr at ved lav utetemperatur, når det er størst behov for varme-effekt, er ytelsen til varmpumpen lavest. Dermed trenger denne typen varmpumpe betydelig større topplast-effekt og energidekningsgraden er betydelig lavere enn varmpumper med andre varmekilder. Dette medfører at fjernvarmenettet må dimensjoneres for forsyningen på de kaldeste dagene, som gir utfordringer knyttet til fornybarandelen. Fjernvarmeselskap ønsker dermed ikke disse kundene som tar ut høy effekt i kort tid og lite energi. Når det gjelder varmpumpen, drifter ikke en varmpumpe optimalt ved smale effekttopper.

6.3 Demand Response, brukeradferd og smarte indikatorer

Fremtidige energisystemer vil trenge økt fleksibilitet på behovssiden, og skyldes at produksjon av fornybar energi og sluttbruker stadig blir en større del av systemene. Da spiller smarte bygninger en aktiv rolle i energibruk, og effektreduksjon kan i større grad administreres fra behovssiden og i mindre grad fra forsyningssiden. Endring i brukeradferden gjør at utfordringene i delkapittel 6.2 ikke blir like store. Demand Response er definert som endringer i sluttbrukernes energiforbruk, fra deres normale forbruksmønster, som respons på endringer i prisen på energi over tid. For at tekniske installasjoner skal kunne styres, reguleres og overvåkes kan ventilasjonssystem integreres i sentraldriftskontrollanlegg. Da blir driften av bygningen optimalisert, både når det gjelder energibruk og termisk komfort. Bedre oversikt gjør det også mulig å redusere effekttopper ved høy belastning i nettet. Av den grunn er ventilasjonssystem, som er integrert med sentraldriftskontrollanlegg, en god løsning for Demand Response. I tillegg er ventilasjonssystem en god løsning for Demand Response dersom termisk masse i bygningen kan fungere som termisk energilager. Totalt vil dette kunne føre til at sluttbruker frivillig endrer settpunkt for ventilasjonsanlegg og andre anlegg, som respons på høyt effektledd i fjernvarmetariffen og elektrisitetstariffen. Det er sluttbruker som bestemmer hvordan den skal respondere på tariffene. I tillegg vil bedre styring av ventilasjon gi et mer energieffektivt ventilasjonsanlegg.

Kapittel 5 viser at ulike scenarioer for styring av ventilasjon gir redusert effekttopp for ventilasjonsvarmen. Energiposten pumper og vifter påvirkes også ved styring av ventilasjon, og ulike scenarioer viser lavere SFP. Effekttoppene for ventilasjonsvarme er redusert i ulike scenarioer, og scenarioer viser eksempler på de smarte indikatorene Load Shifting og Peak Load Reduction. Load Shifting reduserer effekttoppen uten å redusere energibruket, mens Peak Load Reduction reduserer også energibruket ved reduksjon av effekttopper. Scenarioene er ikke nødvendigvis realistiske scenarioer, da energi- og effektreduksjon kan gå på bekostning av innneklimaet. I tillegg er modellering av en bygning som har oppvarming via ventilasjon kompleks, da reguleringen av tilluftstemperaturen og luftmengden for å oppnå settpunkt for innnetemperatur er kompleks. Riktig tilluftstemperatur og riktig luftmengde er nødvendig for å oppnå god luftvekslingseffektivitet, omrøring, temperaturfordeling i sonene og innnetemperatur. Modellen av bygningen i IDA ICE leg-

ger dermed grunnlag for videre arbeid av reguleringen av tilluftstemperaturen og luftmengden. I tillegg kan videre arbeid inkludere å finne verdier for smarte indikatorer for ulike tiltak innen styring av ventilasjon.

6.4 Kostnadsbesparelser for effektreduksjon

Reviderte fjernvarmetariffer gjør at det kan bli dyrt å benytte fjernvarme som topplast. Tilsvarende gjelder for elektrisitet. Tariffer kan motivere til endringer i brukeradferd hos sluttbruker, og dette blir kalt for prisbasert Demand Response. Resultatene fra kapittel 5 viser at endring i settpunkter for ventilasjon fører til kostnadsbesparelser, både for fjernvarme og elektrisitet. Kostnadsbesparelsene kan både komme av reduserte effekttopper og/eller redusert energibruk.

Resultatene fra kapittel 5 kan benyttes til å diskutere hva som er mest aktuelt for sluttbruker og nettleverandører. Sluttbruker ønsker lav nettleie, mens nettleverandører ønsker det motsatte. Ved å inkludere effektleddet i nettleien, vil både sluttbruker og nettleverandør kunne dra fordel av dette leddet ved prisbasert Demand Response. Sluttbruker kan oppnå kostnadsbesparelser i effektleddet ved å redusere eller flytte effekttopper til perioder med lav etterspørsel, og nettleverandører unngår utfordringene beskrevet i delkapittel 6.2. Dermed vil ulike kostnadsmodeller kunne motivere sluttbruker til å endre brukeradferd som følge av kostnadsbesparelser for effekt, med andre ord prisbasert Demand Response. For eksempel kan en enkel kostnadsmodell være å øke effektprisen for å se hvor mye høyere kostnadsbesparelsen blir. Kostnadsanalysen fra kapittel 5 er basert på data fra nettleverandørene i Trondheim og fra 2019, og dette vil påvirke resultatene for kostnadsberegningen. Videre arbeid inkluderer å utvikle ulike kostnadsmodeller for å studere endring i effekttopper og kostnadsbesparelser for effekt som følge av prisbasert Demand Response.

7 Konklusjon

I denne oppgaven har det blitt studert ulike scenarier for å redusere effekttopper for ventilasjonsvarmen i en kontorbygning med oppvarming via tilluft. Det er brukt simuleringsprogrammet IDA ICE. Ulike scenarier er simulert for en bestemt kald dag og for hele året for å analysere hvordan effektreduksjon påvirker ventilasjonsvarmen, vifteeffekt, inn klima og kostnader for termisk og elektrisk energi. Den første delen av oppgaven omhandler sammenlikning av målte og simulerte resultater, slik at de ulike scenarioene for referansebygningen er så realistiske som mulig. Modellen i IDA ICE baserer seg på å kalibrere modellen ved å sammenlikne reell og simulert varighetskurve for romoppvarming, og resultatene viste at kurvene sammenfaller i stor grad. Dermed blir denne modellen brukt som referanse for effektreduksjon av ventilasjonsvarme for de ulike scenarioene. Målinger av andre parametere som innetemperatur, luftmengde og spesifikk vifteeffekt ble også sammenliknet med de ulike simuleringene, og viste ulikheter, men samme størrelsesorden.

Den andre delen av oppgaven studerer den kalde dagen med fokus på ventilasjonsvarmen. Styling av ventilasjon inkluderer også energiposten pumper og vifter. Det første daglige scenarioet er å øke innetemperaturens settpunkt for oppvarming på natten, og redusere settpunktet på dagen. Det andre daglige scenarioet er å øke minimum settpunkt for luftmengde på natten, og redusere maksimum på dagen. Det tredje daglige scenarioet er å redusere minimum settpunkt for innetemperatur, og øke maksimum settpunkt. Resultatene viste at det første scenarioet har størst effektreduksjon av ventilasjonsvarmen (31%) og redusert effektledd i total kostnad (21%). Scenario 2 har minst effektreduksjon (16%) og redusert effektledd i total kostnad (8%). Scenario 3 har middels effektreduksjon (23%) og redusert effektledd i total kostnad (13%). Energibruk av ventilasjonsvarme økte neglisjerbart for scenario 1, slik at den totale kostnadsbesparelsen for scenario 1 (227 kr) ble mindre enn for scenario 2 (820 kr) og scenario 3 (1005 kr) hvor energibruket ble redusert. For scenario 1 var innetemperatur for lav for ytre kontor og for høy for ytre kontor, men innetemperaturene ble sett på som akseptable. For scenario 2 hadde ytre kontor betydelig lav innetemperatur og indre kontor hadde betydelig høy. For scenario 3 var innetemperaturene akseptable.

Den tredje delen av oppgaven studerer hele året med fokus på å se om bygningen har potensial for effektreduksjon av ventilasjonsvarme, og se hvor energieffektivt ventilasjonssystemet er. Resultater av profiler av ventilasjonsvarmen, profiler av tilluftstemperaturen og Energi-Temperaturkurver viste potensial for effektreduksjon av ventilasjonsvarme, og ulike scenarier gav lavere spesifikk vifteeffekt. Det første årlige scenarioet er å forflytte profiler av tilluftstemperaturen, det andre årlige scenarioet er å redusere større økninger i tilluftstemperaturen, det tredje årlige scenarioet er å redusere minimum settpunkt og øke maksimum settpunkt for innetemperatur og det fjerde årlige scenarioet er å redusere maksimum settpunkt for luftmengde. Resultatene viste at det første scenarioet har minst effektreduksjon av ventilasjonsvarmen (12%) og middels redusert effektledd i total kostnad (10%). Scenario 2 har nest størst effektreduksjon (20%) og minst redusert

effektledd i total kostnad (4%). Scenario 3 har nest minst effektreduksjon (16%) og middels redusert effektledd i total kostnad (10%). Scenario 4 har størst effektreduksjon (33%) og størst redusert effektledd i total kostnad (16%). Energibruk av ventilasjonsvarme økte for scenario 1, mens det ble redusert for scenario 2, scenario 3 og scenario 4. Den totale kostnadsbesparelsen for scenario 1 (13528 kr) ble mindre enn scenario 2 (19600 kr), som ble mindre enn scenario 3 (139484 kr), som ble mindre enn scenario 4 (151070). Spesifikk vifteeffekt ble ikke betydelig endret i noen av scenarioene. Innetemperaturen ble generelt for høy for scenario 1 og scenario 4, og akseptabel for scenario 2 og scenario 3.

Den tredje delen av oppgaven inkluderer også et femte årlig scenario, som er å regulere tilluftstemperaturen mellom minimum og maksimum settpunkt for å oppnå et settpunkt for returtemperatur i aggregatene. Dette blir sett på som en bedre måte å regulere tilluftstemperaturen på, da det i referansemodellen benyttes målt tilluftstemperatur som settpunkt. I tillegg reguleres luftmengdene etter innetemperatur og CO₂-nivå i referansemodellen. Scenario 5 er delt inn i tre, hvor scenario 5.1 kun endrer regulering av tilluftstemperatur. Scenario 5.2 endrer regulering av tilluftstemperatur, i tillegg til at minimum settpunkt for innetemperatur reduseres og maksimum settpunkt økes. Scenario 5.3 endrer regulering av tilluftstemperatur, i tillegg til at luftmengdene reguleres etter CO₂-nivå. Resultatene viste ingen effekt- eller energireduksjon for ventilasjonsvarmen, men en betydelig effektreduksjon for pumper og vifter for scenario 5.1 (57%), scenario 5.2 (82%) og scenario 5.3 (95%). Redusert effektledd i kostnaden for elektrisk energi er minst for scenario 5.1 (30%), middels for scenario 5.2 (35%) og størst for scenario 5.3 (37%). I tillegg er både energibruk til pumper og vifter og spesifikk vifteeffekt betydelig redusert. Det er ingen total kostnadsbesparelse for scenario 5. Dette skyldes kostnadsøkning for fjernvarme, da scenario 5 sammenlignes med referansemodellen hvor settpunktet for tilluftstemperaturen ikke tar hensyn til interne laster og varmebalansen i modellen. Likevel er det en kostnadsbesparelse for elektrisitet i scenario 5, da det brukes betydelig lavere luftmengder. Resultater for inneklimate viste akseptable innetemperaturer.

De ulike scenarioene gir ulik endring i effekt både når det gjelder termisk og elektrisk energi. Den smarte indikatoren Load Shifting reduserer last og har ingen forbruksendring, mens Peak Load Reduction reduserer også forbruket. Styring av ventilasjon kan være en konsekvens av at det ønskes et mer energieffektivt ventilasjonsanlegg. Styring av ventilasjon kan også være en konsekvens av at det ikke ønskes høyt effektledd i fjernvarme- og elektrisitetstariffen. Den kan også være en konsekvens av prisprediksjon og prisvariasjoner for elektrisitet ettersom det ønskes å flytte forbruket til perioder med lavere priser, men for fjernvarme benyttes månedsmiddel slik at sluttbruker ikke påvirkes av døgnvariasjoner i prisen. Som respons på høye priser for effektleddet, kan sluttbruker endre settpunkt for ventilasjon. Dette blir kalt for prisbasert Demand Response. På den måten blir sluttbruker motivert til å flytte energibruket av ventilasjon til perioder med lavere belastning i nettet for å oppnå kostnadsbesparelser for effekt. Dermed blir utfordringer knyttet til overbelastning i nettet redusert som følge av prisbasert Demand Response.

Referanser

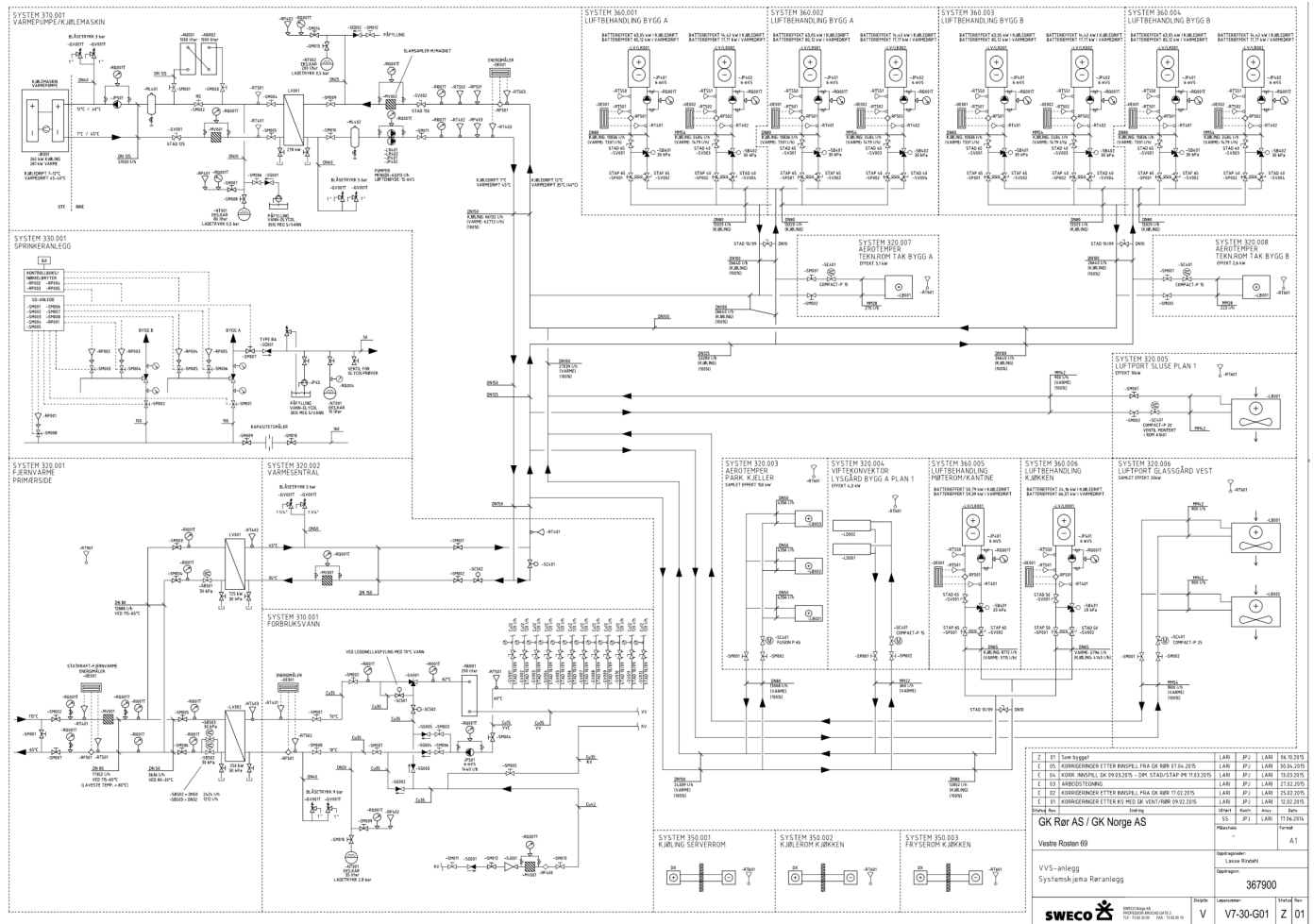
- [1] NVE. *Samlet energibruk*. 2019. URL: <https://www.nve.no/energibruk-effektivisering-og-teknologier/energibruk/samlet-energibruk/?ref=mainmenu> (sjekket 12.12.2020).
- [2] NVE. *Energibruk i bygg*. 2020. URL: <https://www.nve.no/energibruk-effektivisering-og-teknologier/energibruk/energibruk-i-bygg/?ref=mainmenu> (sjekket 12.12.2020).
- [3] Regjeringen. *Forbud mot fossil fyringsolje til oppvarming av bygninger*. 2019. URL: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/forbud-mot-oljefyr--til-oppvarming/id2678986/> (sjekket 12.12.2020).
- [4] Regjeringen. *Hva kan byggebransjen gjøre for å redusere klimautslippene?* 2020. URL: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/hva-kan-byggebransjen-gjore-for-a-reducere-klimautslippene/id2692924/> (sjekket 12.12.2020).
- [5] Arnstad M. et al. *Representantforslag om en sterkere satsing på arbeidet for å nå målet om 10 TWh energieffektivisering*. 2017. URL: <https://www.stortinget.no/no/Saker-og-publikasjoner/Publikasjoner/Representantforslag/2016-2017/dok8-201617-067s/?all=true> (sjekket 12.12.2020).
- [6] TEK17. *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning. Kapittel 14 Energi*. 2017.
- [7] European Commission. *Energy performance of buildings directive*. 2020. URL: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en?redir=1 (sjekket 12.12.2020).
- [8] Regjeringen. *Direktiv om endringer i bygningsenergidirektivet*. 2020. URL: <https://www.regjeringen.no/no/sub/eos-notatbasen/notatene/2016/des/revisjon-av-direktiv-om-bygningers-energiytelse/id2540198/> (sjekket 12.12.2020).
- [9] Brekke T. et al. *EPBD implementation in Norway*. 2016. URL: <https://epbd-ca.eu/wp-content/uploads/2018/08/CA-EPBD-IV-Norway-2018.pdf> (sjekket 12.12.2020).
- [10] Mohammed N. Albadic M. *Demand response in electricity generation planning*. 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1040619020300919> (sjekket 14.09.2020).
- [11] Mishraab A. et al. *Demand response events in district heating: Results from field tests in a university building*. 2019. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670718320845> (sjekket 28.11.2020).
- [12] NS-EN 15232:2012. *Innvirkning ved bruk av bygningsautomatisering på energiytelsen i bygninger. Veiledning til NS-EN 15232:2012*. 2012.
- [13] SN/TS 3031:2016. *Bygningers energiytelse - Beregning av energibehov og energiforsyning*. 2016.
- [14] Stene J. *Dimensjonering av varmepumper- for oppvarming og kjøling*. 2020.
- [15] Aschehoug Ø. et al. *Enøk i bygninger*. 2014.
- [16] Hiroshi Y. et al. *IEA EBC Annex 53: Total Energy Use in Buildings – Analysis and Evaluation Methods*. 2017. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817318716> (sjekket 20.09.2020).

- [17] Nord N. et al. *Building Energy Demand and Energy Planning*. 2018.
- [18] Stene J. *Varmepumper og bygningsklimatisering*. 2020.
- [19] Stene J. *Varmekilder for varmpumper*. 2020.
- [20] Statkraft Varme. *Om fjernvarme*. 2020. URL: <https://www.statkraftvarme.no/om-fjernvarme/> (sjekket 29.11.2020).
- [21] Statkraft Varme. *Returtemperatur og volum*. 2020. URL: <https://www.statkraftvarme.no/prодукter-og-tjenester/prismodell/returtemperatur-og-volum/> (sjekket 08.11.2020).
- [22] Statkraft Varme. *Trondheim fjernvarme*. 2020. URL: <https://www.statkraft.no/om-statkraft/hvor-vi-har-virksomhet/norge/trondheim-fjernvarme/> (sjekket 29.11.2020).
- [23] Bjartnes M. *Mailkorrespondanse*. 2020. (Sjekket 09.11.2020).
- [24] Ingebrigtsen S. *Ventilasjonsteknikk Del 1*. 2015.
- [25] Byggforsk. *Behovsstyrt ventilasjon (DCV). Prinsipper*. 2016. URL: https://www.byggforsk.no/dokument/535/behovsstyrt_ventilasjon_dcv_prinsipper?gclid=CjwKCAjw-5v7BRamEiwAJ3Dpu07dWl55k2rWIjJY4hpW6-RwZtMs4F-tupcfL-7FYR0CVVlr59lrfhoCLJAQAvD_BwE (sjekket 21.09.2020).
- [26] Ingebrigtsen S. *Ventilasjonsteknikk Del 2*. 2016.
- [27] Thunshelle K. *Oppvarming via tilluft*. 2016.
- [28] TEK17. *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning. Kapittel 13 Inneklima og helse*. 2017.
- [29] Arbeidstilsynet. *Veiledning om Klima og luftkvalitet på arbeidsplassen*. 2016. URL: <https://www.arbeidstilsynet.no/contentassets/3f86f6d2038348d18540404144f76a22/luftkvalitet-pa-arbeidsplassen.pdf> (sjekket 21.09.2020).
- [30] NS-ISO 7730. *Ergonomi i termisk miljø - Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort*. 2015.
- [31] Byggforsk. *Prosjektering av energieffektive ventilasjonsanlegg*. 2021. URL: https://www.byggforsk.no/dokument/2960/prosjektering_av_energieffektive_ventilasjonsanlegg (sjekket 23.05.2021).
- [32] Miljødirektoratet. *Energieffektivisering og -omlegging i eksisterende bygg*. 2020. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/myndigheter/klimaarbeid/kutte-utslipp-av-klimagasser/klima-og-energitiltak/bygg-og-anlegg/energieffektivisering-og-omlegging-eksisterende-bygg/> (sjekket 21.09.2020).
- [33] NVE. *Vurdering av atferdsvirkemidler som kan bidra til reduksjon av effekttopper*. 2019. URL: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/nytt-fra-rme/nyheter-reguleringsmyndigheten-for-energi/vurdering-av-atferdsvirkemidler-som-kan-bidra-til-reduksjon-av-effekttopper/> (sjekket 04.10.2020).
- [34] Knudsen M. *Evaluation of Price-based Demand Response Potential using Economic Model Predictive Control for Residential Heating*. 2016. (Sjekket 05.10.2020).
- [35] Statkraft Varme. *Fjernvarme*. 2010. URL: https://www.statkraftvarme.no/globalassets/old-contains-the-old-folder-structure/documents/faktaark_tcm84-14828.pdf (sjekket 28.11.2020).

- [36] Cai H. et al. *Agent-based distributed demand response in district heating systems*. 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919320902> (sjekket 28.11.2020).
- [37] Romanchenko D. et al. *Impacts of demand response from buildings and centralized thermal energy storage on district heating systems*. 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720307289> (sjekket 28.11.2020).
- [38] Wu Y. et al. *Demand response of district heating using model predictive control to prevent the draught risk of cold window in an office building*. 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220334884> (sjekket 28.11.2020).
- [39] Byggforsk. *Generelt om passivhus. Valg og konsekvenser*. 2013. URL: https://www.byggforsk.no/dokument/4108/generelt_om_passivhus_valg_og_konsekvenser (sjekket 10.12.2020).
- [40] Dakheel J. et al. *Smart buildings features and key performance indicators: A review*. 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720305497> (sjekket 28.11.2020).
- [41] Verbeke S. et al. *FINAL REPORT ON THE TECHNICAL SUPPORT TO THE DEVELOPMENT OF A SMART READINESS INDICATOR FOR BUILDINGS*. 2020. URL: https://www.buildup.eu/sites/default/files/content/mj0320335enn.en_.pdf (sjekket 29.11.2020).
- [42] Statnett. *Kraftsystemet i Finnmark*. 2016. URL: <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/planer-og-analyser/kraftsystemet-i-finnmark.pdf> (sjekket 10.12.2020).
- [43] Nordpool. *Day-ahead prices*. 2020. URL: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/N0/Hourly/?dd=N03&view=table> (sjekket 08.11.2020).
- [44] Tensio. *Nettleiepriser bedrift gjeldende fra 1. januar 2019*. 2019. URL: <https://ts.tensio.no/kunde/nettleie-priser-og-avtaler/2019-nettleie-bedrift> (sjekket 09.11.2020).
- [45] Statkraft Varme. *Priser*. 2020. URL: <https://www.statkraftvarme.no/produkter-og-tjenester/prismodell/priser/> (sjekket 08.11.2020).
- [46] Statkraft Varme. *Prismodell*. 2020. URL: <https://www.statkraftvarme.no/produkter-og-tjenester/prismodell> (sjekket 08.11.2020).
- [47] Enova. *Energioppfølging i næringsbygg - en innføring*. 2004. (Sjekket 20.02.2021).
- [48] Institutt for matematiske fag NTNU. *Enkel lineær regresjon*. 2020. URL: <https://wiki.math.ntnu.no/tma4245/tema/begreper/regression> (sjekket 17.03.2021).
- [49] Hyndman R. et al. *Forecasting Principles and Practice*. 2021. URL: <https://otexts.com/fpp3/> (sjekket 07.03.2021).
- [50] Microsoft. *RETTLINJE (funksjon)*. 2021. URL: <https://support.microsoft.com/nb-no/office/rettlinje-funksjon-84d7d0d9-6e50-4101-977a-fa7abf772b6d> (sjekket 17.03.2021).
- [51] EQUA. *IDA Indoor Climate and Energy*. 2020. URL: <https://www.equa.se/en/ida-ice> (sjekket 01.12.2020).
- [52] Voll Arkitekter. *OM PROSJEKTET*. 2020. URL: http://vollark.no/portfolio_page/vr69/ (sjekket 21.09.2020).

- [53] Gjertsen R. *Mailkorrespondanse*. 2020. (Sjekket 07.10.2020).
- [54] GK. *Behovsstyrt ventilasjon sparer energi*. 2020. URL: <https://www.gk.no/fag-losninger/fag/ventilasjon/> (sjekket 27.11.2020).
- [55] Grefstad R. *Mailkorrespondanse*. 2020. (Sjekket 09.11.2020).

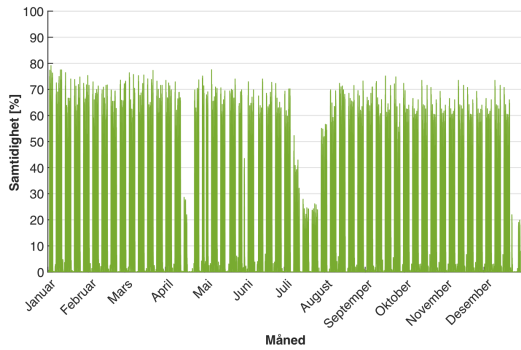
A Referansebygning



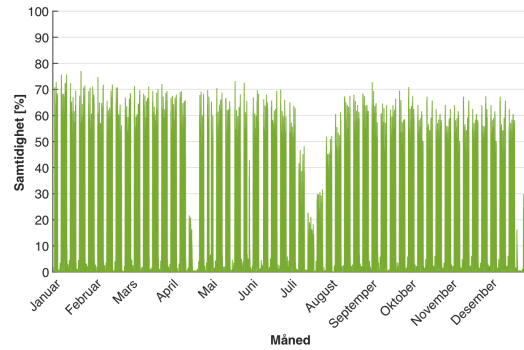
Figur 100 Systemskjema for referansebygning

B Tidsplaner for interne laster

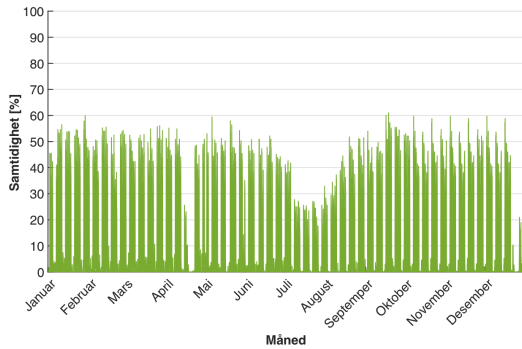
Personer



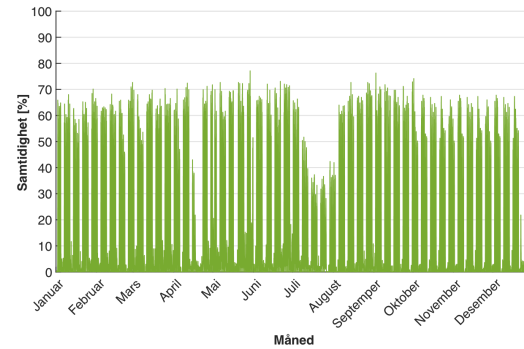
(a) Personer del A_{vest} (AHU1)



(b) Personer del A_{ost} (AHU2)



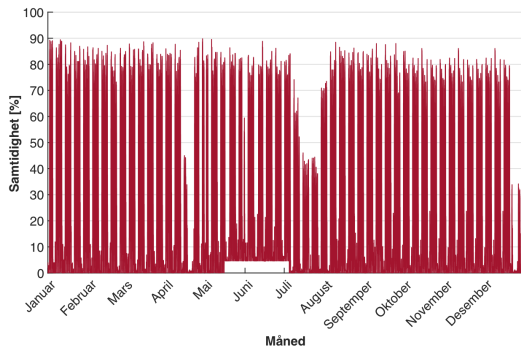
(c) Personer del B_{vest} (AHU3)



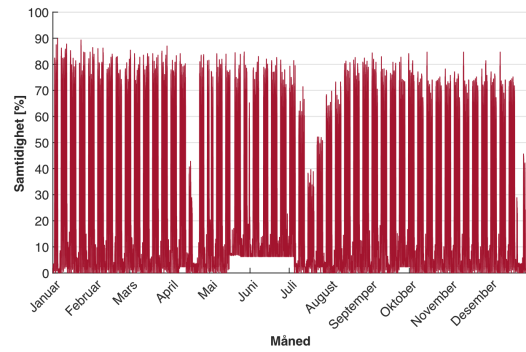
(d) Personer del B_{ost} (AHU4)

Figur 101 Målt gjennomsnittlig samtidighet for personer for hver sone (2019)

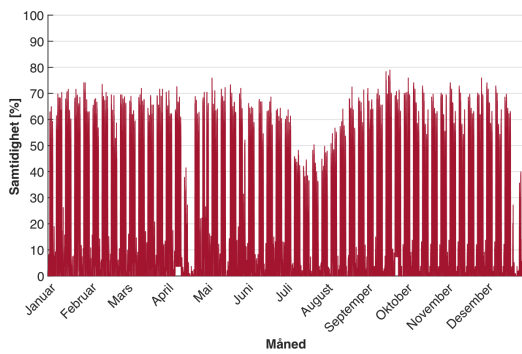
Belysning



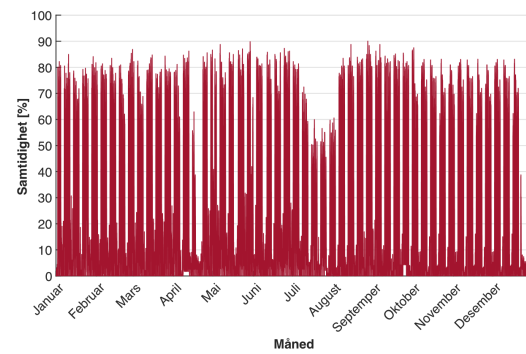
(a) Belysning del A_{vest} (AHU1)



(b) Belysning del A_{ost} (AHU2)



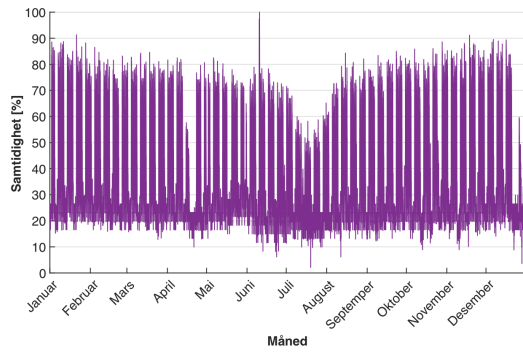
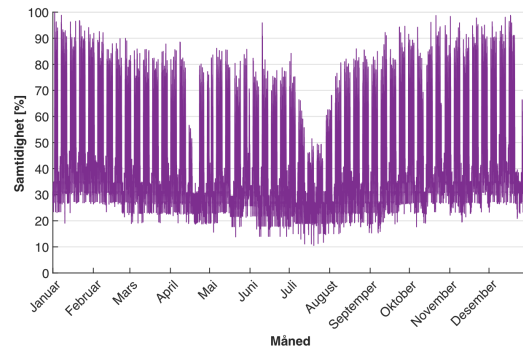
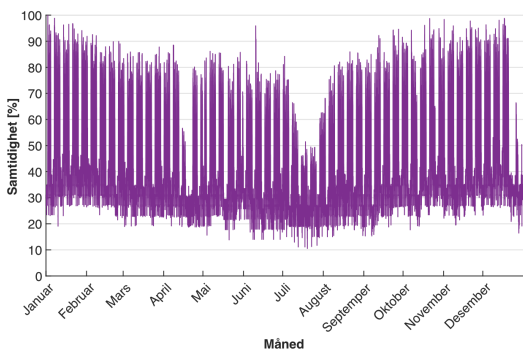
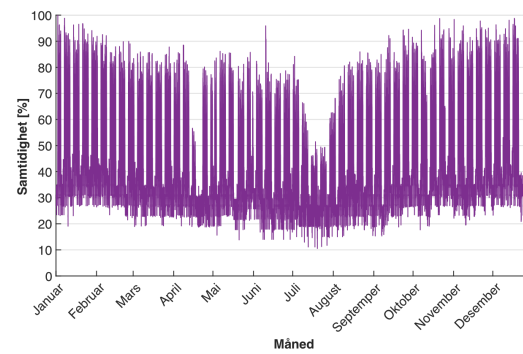
(c) Belysning del B_{vest} (AHU3)



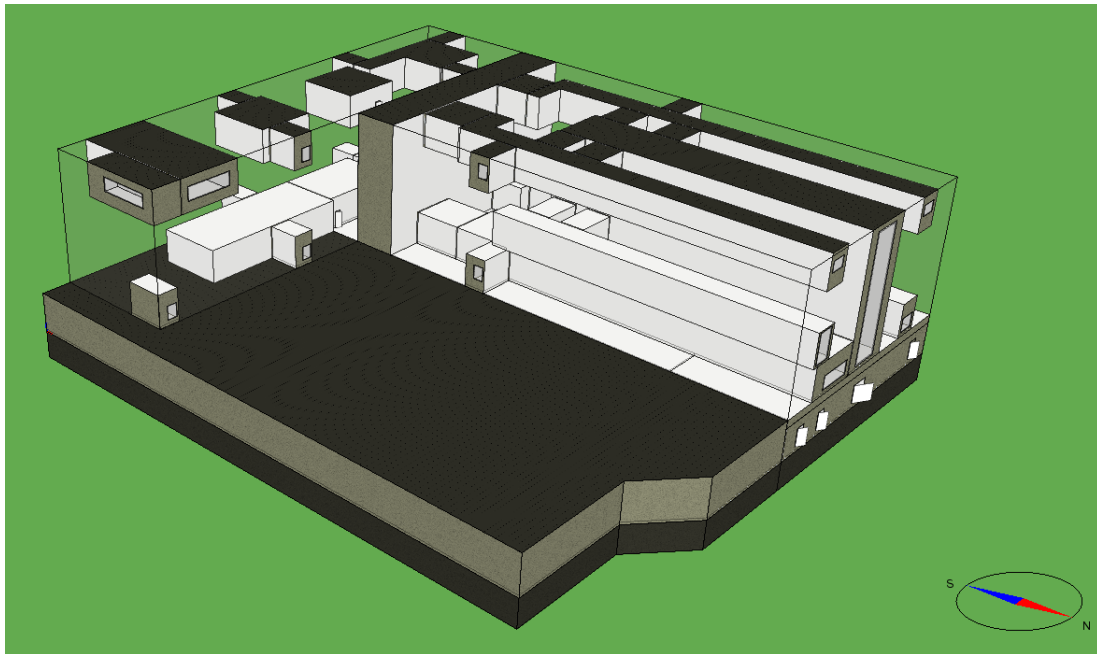
(d) Belysning del B_{ost} (AHU4)

Figur 102 Målt gjennomsnittlig samtidighet for belysning for hver sone (2019)

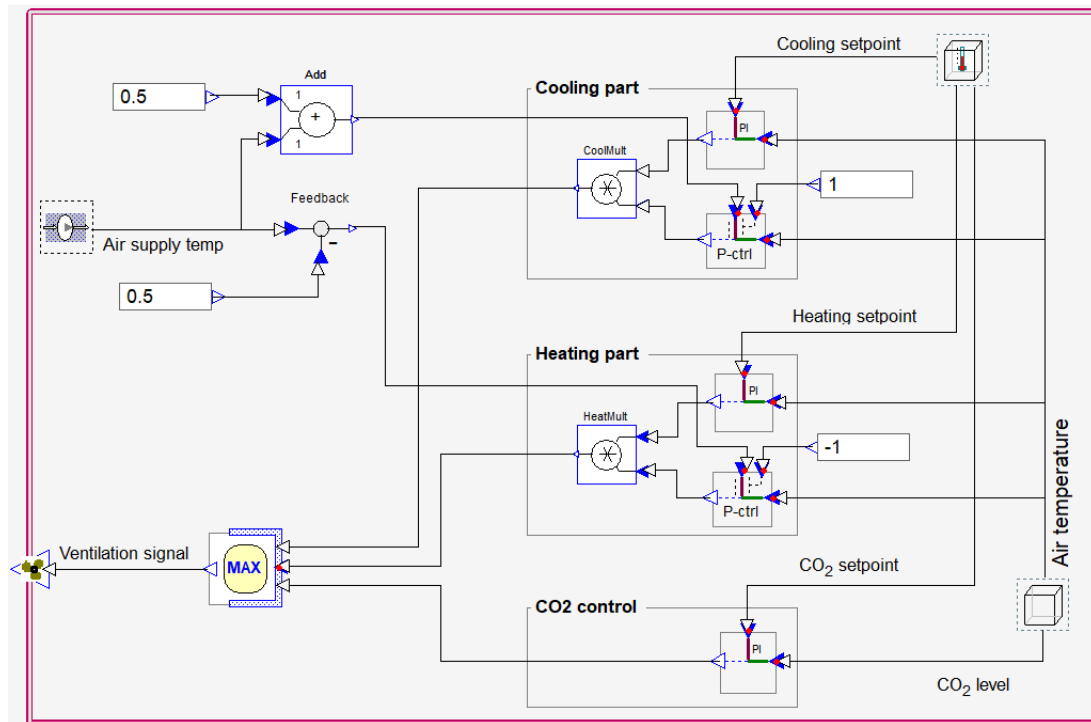
Teknisk utstyr

(a) Teknisk utstyr del A_{vest} (AHU1)(b) Teknisk utstyr del A_{ost} (AHU2)(c) Teknisk utstyr del B_{vest} (AHU3)(d) Teknisk utstyr del B_{ost} (AHU4)**Figur 103** Målt gjennomsnittlig samtidighet for teknisk utstyr for hver sone (2019)

C IDA ICE

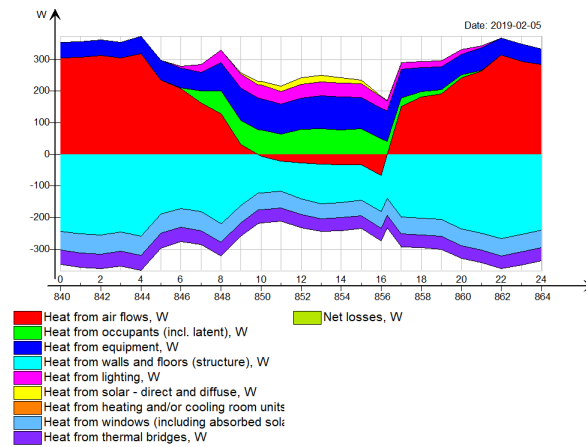


Figur 104 Referansebygningen i IDA ICE

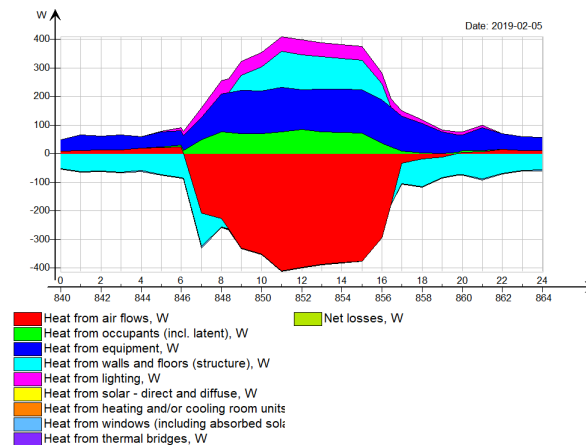


Figur 105 VAV temperatur- og CO₂-regulering i IDA ICE

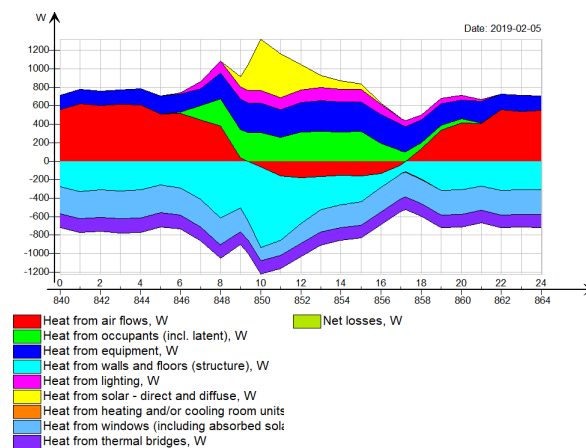
D Varmebalanse for kald dag



Figur 106 Varmebalanse for spesifisert ytre kontor kald dag (Kalibrert modell)



Figur 107 Varmebalanse for spesifisert indre kontor for kald dag (Kalibrert modell)



Figur 108 Varmebalanse for spesifisert møterom for kald dag (Kalibrert modell)

E Kostnadsberegning for kald dag

Tabell 33 Spotpris for 05.02.19 [43]

Time	Strømpris [øre/kWh]
00.00-01.00	46,26
01.00-02.00	46,00
02.00-03.00	45,89
03.00-04.00	46,03
04.00-05.00	46,30
05.00-06.00	48,23
06.00-07.00	49,79
07.00-08.00	53,54
08.00-09.00	53,36
09.00-10.00	53,13
10.00-11.00	52,86
11.00-12.00	52,41
12.00-13.00	51,83
13.00-14.00	51,75
14.00-15.00	51,95
15.00-16.00	51,97
16.00-17.00	52,84
17.00-18.00	55,35
18.00-19.00	54,90
19.00-20.00	53,48
20.00-21.00	52,03
21.00-22.00	50,97
22.00-23.00	49,32
23.00-24.00	48,04

Dato	Rom- oppvarming [W]	Rom- kjøling [W]	Teknisk utstyr [W]	Pumper og vifter [W]	Belysning [W]	Tappevann [W]	Total termisk [W]	Total elektrisk [W]
05.02.2019 00:00	183174	0	40846	17652	377	6865	190039	58875
05.02.2019 01:00	192797	0	41593	18329	270	6865	199662	60192
05.02.2019 02:00	197753	0	41868	18256	232	6865	204618	60356
05.02.2019 03:00	201371	0	42663	18505	329	6865	208236	61497
05.02.2019 04:00	206623	0	42476	18281	38	6865	213488	60795
05.02.2019 05:00	199100	0	44235	17542	628	6865	205965	62405
05.02.2019 06:00	190979	0	50094	16182	6002	6865	197844	72278
05.02.2019 07:00	207739	0	55573	33629	18284	6913	214652	107486
05.02.2019 08:00	258411	0	107262	65199	29061	13762	272173	201522
05.02.2019 09:00	266834	0	126201	92388	30324	15965	282799	248913
05.02.2019 10:00	293159	0	136996	111217	31562	13733	306892	279775
05.02.2019 11:00	271562	0	133559	114493	30290	14190	285752	278342
05.02.2019 12:00	254834	0	135429	114907	30715	14684	269518	281051
05.02.2019 13:00	238704	0	126378	113564	31412	15180	253884	271354
05.02.2019 14:00	224902	0	123305	112426	30608	18002	242904	266339
05.02.2019 15:00	209392	0	108553	108003	30494	15935	225327	247050
05.02.2019 16:00	207510	0	108257	85745	23862	9118	216628	217864
05.02.2019 17:00	151874	0	94313	27070	13596	8217	160091	134979
05.02.2019 18:00	137691	0	77108	21844	9011	6865	144556	107963
05.02.2019 19:00	140686	0	66792	20981	8004	6865	147551	95777
05.02.2019 20:00	141378	0	53500	16349	7592	6865	148243	77441
05.02.2019 21:00	142191	0	57320	16243	5138	6865	149056	78701
05.02.2019 22:00	158131	0	46779	16702	0	6865	164996	63481
05.02.2019 23:00	164898	0	41141	17325	386	6865	171763	58852
Totalt	4841693	0	1902241	1212832	338214	234939	5076632	3453287

Figur 109 Energibruk per energipost for kald dag (Kalibrert modell)

Elektrisk energi [kr]

05.feb	Nettleie fastledd [kr]	Nettleie energiledd [kr]	Nettleie effektledd [kr]	Strømkostnad energiledd [kr]	Strømkostnad påslag [kr]	Total [kr]
00.00	1,00	15,33	30,31	34,05	2,21	82,90
01.00	1,00	15,67	30,31	34,61	2,26	83,86
02.00	1,00	15,72	30,31	34,62	2,26	83,92
03.00	1,00	16,01	30,31	35,38	2,31	85,02
04.00	1,00	15,83	30,31	35,19	2,28	84,61
05.00	1,00	16,25	30,31	37,62	2,34	87,53
06.00	1,00	18,82	30,31	44,98	2,71	97,83
07.00	1,00	27,99	30,31	71,93	4,03	135,27
08.00	1,00	52,47	30,31	134,43	7,56	225,77
09.00	1,00	64,81	30,31	165,31	9,33	270,77
10.00	1,00	72,85	30,31	184,86	10,49	299,52
11.00	1,00	72,47	30,31	182,36	10,44	296,59
12.00	1,00	73,18	30,31	182,10	10,54	297,13
13.00	1,00	70,65	30,31	175,52	10,18	287,66
14.00	1,00	69,35	30,31	172,95	9,99	283,60
15.00	1,00	64,33	30,31	160,49	9,26	265,39
16.00	1,00	56,73	30,31	143,90	8,17	240,11
17.00	1,00	35,15	30,31	93,39	5,06	164,91
18.00	1,00	28,11	30,31	74,08	4,05	137,56
19.00	1,00	24,94	30,31	64,03	3,59	123,87
20.00	1,00	20,16	30,31	50,36	2,90	104,75
21.00	1,00	20,49	30,31	50,14	2,95	104,90
22.00	1,00	16,53	30,31	39,14	2,38	89,36
23.00	1,00	15,32	30,31	35,34	2,21	84,19
Total	24	899	727	2 237	129	4 017

Figur 110 Beregning av elektrisitetskostnad for kald dag (Kalibrert modell)

Termisk energi

05.feb	Nettleie fastledd [kr]	Nettleie energiledd [kr]	Nettleie effektledd [kr]	Varmekostnad energiledd [kr]	Varmekostnad påslag [kr]	Total [kr]
00.00	0,00	49,48	32,86	104,83	7,13	194,30
01.00	0,00	51,99	32,86	110,14	7,49	202,47
02.00	0,00	53,28	32,86	112,87	7,67	206,68
03.00	0,00	54,22	32,86	114,87	7,81	209,76
04.00	0,00	55,59	32,86	117,77	8,01	214,22
05.00	0,00	53,63	32,86	113,62	7,72	207,83
06.00	0,00	51,51	32,86	109,14	7,42	200,93
07.00	0,00	55,89	32,86	118,41	8,05	215,21
08.00	0,00	70,87	32,86	150,14	10,21	264,07
09.00	0,00	73,63	32,86	156,00	10,60	273,10
10.00	0,00	79,91	32,86	169,29	11,51	293,56
11.00	0,00	74,40	32,86	157,63	10,72	275,61
12.00	0,00	70,18	32,86	148,67	10,11	261,82
13.00	0,00	66,11	32,86	140,05	9,52	248,53
14.00	0,00	63,25	32,86	133,99	9,11	239,21
15.00	0,00	58,67	32,86	124,30	8,45	224,27
16.00	0,00	56,40	32,86	119,50	8,12	216,88
17.00	0,00	41,68	32,86	88,31	6,00	168,86
18.00	0,00	37,64	32,86	79,74	5,42	155,66
19.00	0,00	38,42	32,86	81,39	5,53	158,20
20.00	0,00	38,60	32,86	81,77	5,56	158,79
21.00	0,00	38,81	32,86	82,22	5,59	159,48
22.00	0,00	42,96	32,86	91,02	6,19	173,02
23.00	0,00	44,72	32,86	94,75	6,44	178,77
Total	0	1 322	789	2 800	190	5 101

Figur 111 Beregning av fjernvarmekostnad for kald dag (Kalibrert modell)

F Kostnadsberegning for et år

Tabell 34 Gjennomsnittlig månedlig spotpris for 2019 [43]

Måned	Strømpris [øre/kWh]
Januar	51,30
Februar	44,13
Mars	40,56
April	39,84
Mai	38,20
Juni	25,56
Juli	32,69
August	36,53
September	33,21
Oktober	36,65
November	41,91
Desember	36,71

Måned	Maks termisk [kW]	Maks elektrisk [kW]	Utrekning Effektledd Termisk [kr]				Utrekning Effektledd Elektrisk [kr]					
Januar	302	299	200	60	102	53	21726	200	60	99	53	21552
Februar	307	294	200	60	107	53	22082	200	60	94	53	21206
Mars	283	295	200	45	83	40	15403	200	45	95	40	16019
April	156	296	156	45	0	40	8754	200	45	96	40	16073
Mai	87	302	87	45	0	40	4903	200	45	102	40	16326
Juni	18	270	18	45	0	40	1029	200	45	70	40	14739
Juli	18	289	18	45	0	40	1029	200	45	89	40	15718
August	18	277	18	45	0	40	1029	200	45	77	40	15077
September	56	301	56	45	0	40	3158	200	45	101	40	16306
Oktober	112	292	112	45	0	40	6279	200	45	92	40	15830
November	238	310	200	60	38	53	17506	200	60	110	53	22276
Desember	276	288	200	60	76	53	20030	200	60	88	53	20828
Totalt [kr]			122929				211950					

Figur 112 Beregning av effektledd for termisk og elektrisk energi for 2019 (Kalibrert modell)

Måned	Rom-oppvarming [kWh]	Teknisk utstyr [kWh]	Pumper og vifter [kWh]	Belysning [kWh]	Varmt tappevann [kWh]	Total termisk [kWh]	Total elektrisk [kWh]
Januar	78872	51556	31313	7827	6379	85251	90697
Februar	48430	45078	29883	6944	5673	54104	81906
Mars	49416	47377	33746	7408	6149	55565	88531
April	17802	44327	38494	6177	6143	23945	88998
Mai	6250	47174	36038	7515	6377	12627	90728
Juni	0	43484	31668	7160	5915	5915	82312
Juli	0	42523	34902	5531	6378	6378	82956
August	0	45810	32887	7020	6261	6261	85717
September	1652	45677	26238	7167	6028	7680	79082
Oktober	23022	49227	25937	7466	6379	29400	82631
November	38058	47830	26677	6812	6023	44081	81319
Desember	67742	47950	26238	5342	6263	74005	79530
Totalt	331244	558015	374022	82369	73967	405212	1014406

Figur 113 Energibruk per energipost for 2019 (Kalibrert modell)

Elektrisk energi [kr]						
Måned	Nettleie fastledd [kr]	Nettleie energiledd [kr]	Nettleie effektledd [kr]	Strømkostnad energiledd [kr]	Strømkostnad påslag [kr]	Total [kr]
Januar	733	23615	21552	59324	3401	108626
Februar	733	21326	21206	46172	3071	92509
Mars	733	23051	16019	45290	3320	88413
April	733	23173	16073	45432	3337	88748
Mai	733	23623	16326	44252	3402	88337
Juni	733	21432	14739	28982	3087	68974
Juli	733	21600	15718	34792	3111	75953
August	733	22319	15077	40471	3214	81814
September	733	20591	16306	34289	2966	74885
Oktober	733	21515	15830	39377	3099	80554
November	733	21173	22276	44557	3049	91789
Desember	733	20708	20828	36997	2982	82249
Totalt	8800	264126	211950	499935	38040	1022851

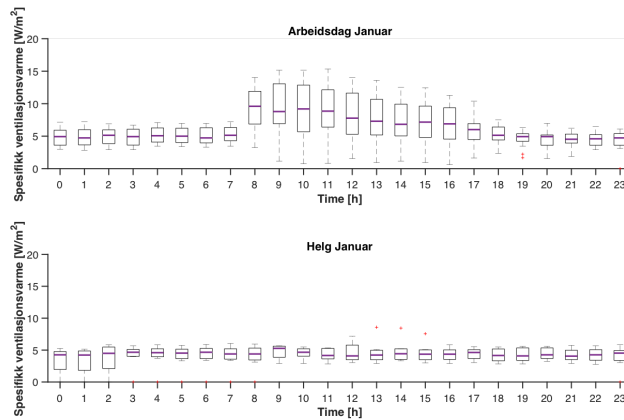
Figur 114 Beregning av elektrisitetskostnad for 2019 (Kalibrert modell)

Termisk energi [kr]						
Måned	Nettleie fastledd [kr]	Nettleie energiledd [kr]	Nettleie effektledd [kr]	Strømkostnad energiledd [kr]	Strømkostnad påslag [kr]	Total [kr]
Januar	0	22197	21726	54663	3197	101783
Februar	0	14087	22082	29847	2029	68045
Mars	0	14468	15403	28170	2084	60124
April	0	6235	8754	11924	898	27810
Mai	0	3288	4903	6030	474	14695
Juni	0	1540	1029	1890	222	4681
Juli	0	1661	1029	2606	239	5535
August	0	1630	1029	2859	235	5752
September	0	2000	3158	3188	288	8634
Oktober	0	7655	6279	13471	1103	28508
November	0	11478	17506	23094	1653	53730
Desember	0	19269	20030	33961	2775	76036
Totalt	0	105507	122929	211703	15195	455334

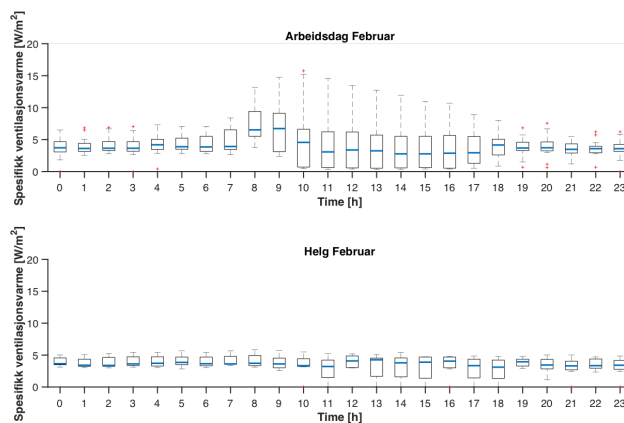
Figur 115 Beregning av fjernvarmekostnad for 2019 (Kalibrert modell)

G Kalibrert modell og målinger

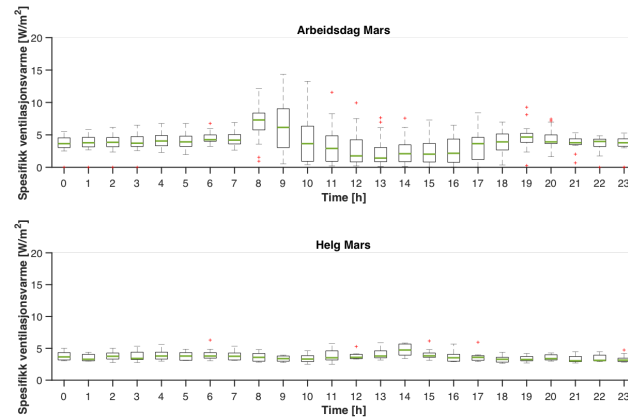
Boksplott av ventilasjonsvarme for vinter-måneder



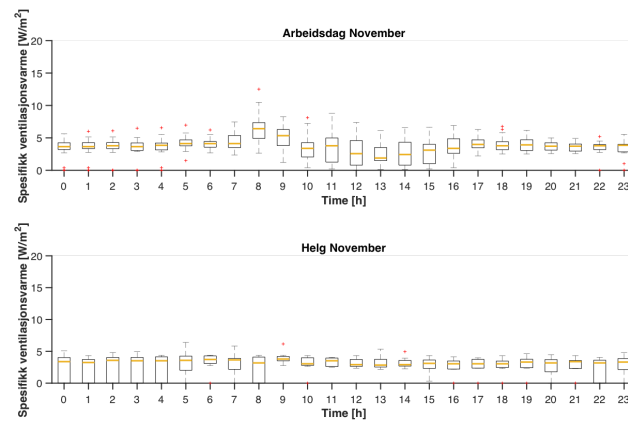
Figur 116 Boksplott av ventilasjonsvarme for januar (Kalibrert modell)



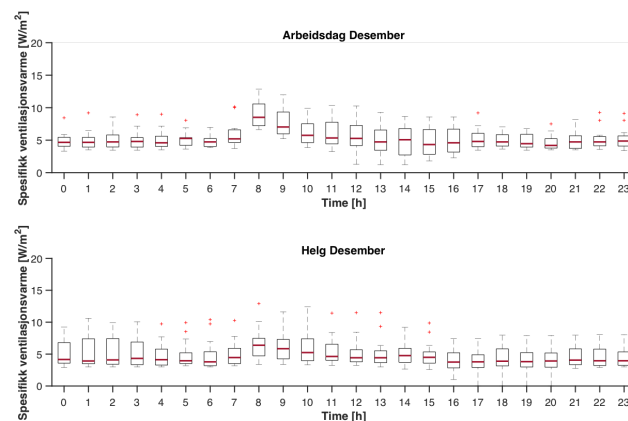
Figur 117 Boksplott av ventilasjonsvarme for februar (Kalibrert modell)



Figur 118 Bokplott av ventilasjonsvarme for mars (Kalibrert modell)

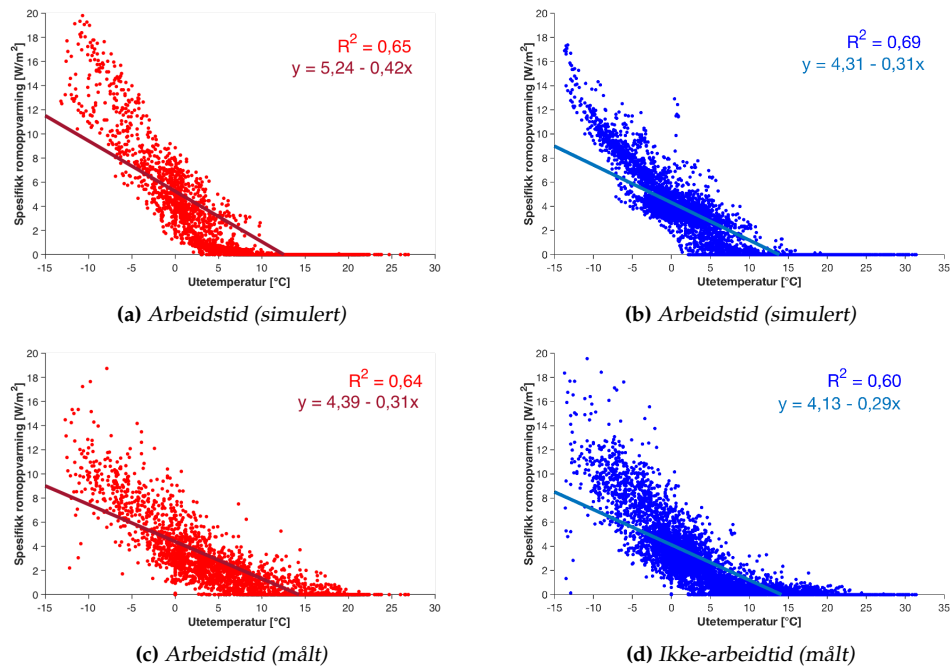


Figur 119 Bokplott av ventilasjonsvarme for november (Kalibrert modell)

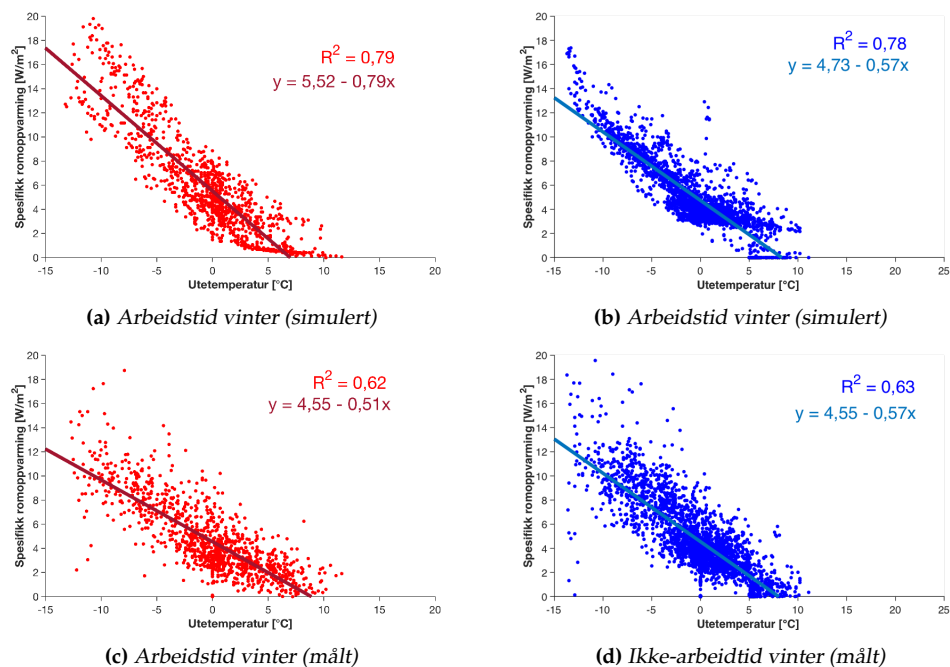


Figur 120 Bokplott av ventilasjonsvarme for desember (Kalibrert modell)

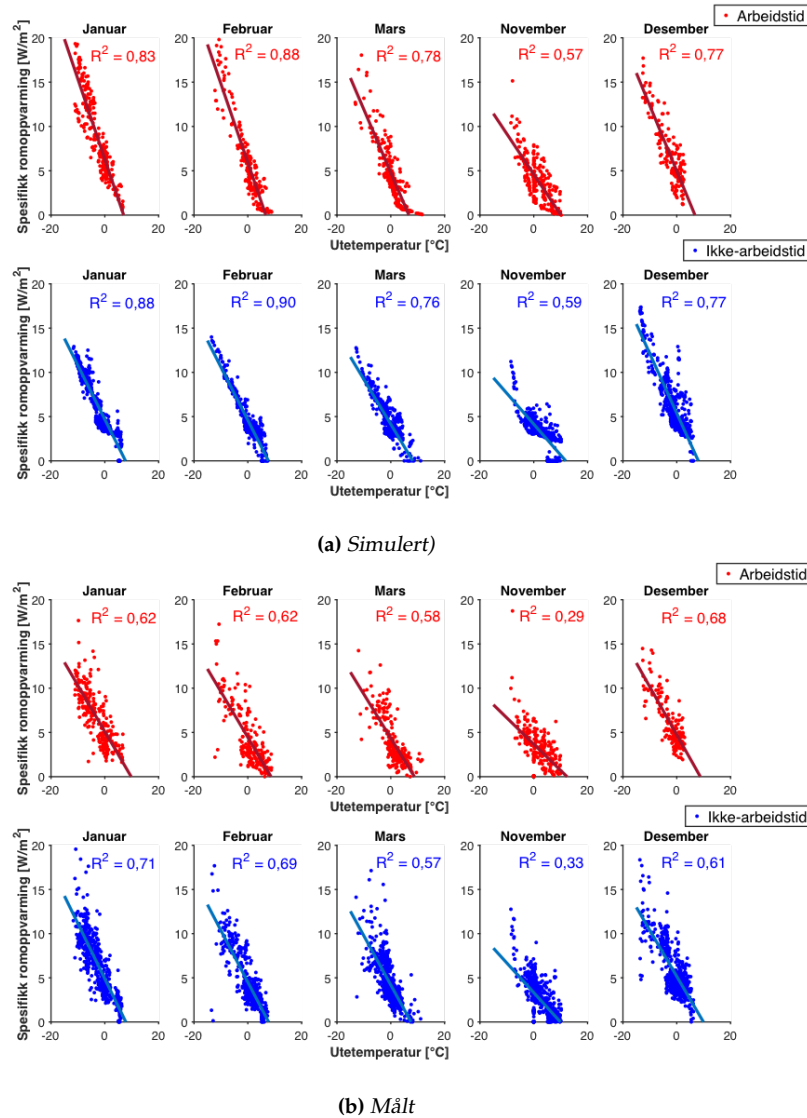
ET-kurver for romoppvarming (målingene er uten elektriske radiatorer)



Figur 121 Simulert og målt ET-kurve (romoppvarming) for arbeidstid og ikke-arbeidstid (året 2019)



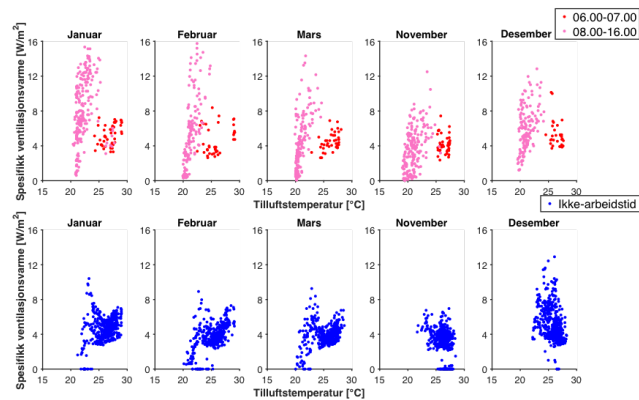
Figur 122 Simulert og målt ET-kurve (romoppvarming) for arbeidstid og ikke-arbeidstid (vinter 2019)



Figur 123 Simulert og målt månedlig ET-kurve (romoppvarming) for arbeidstid og ikke-arbeidstid (vinter 2019)

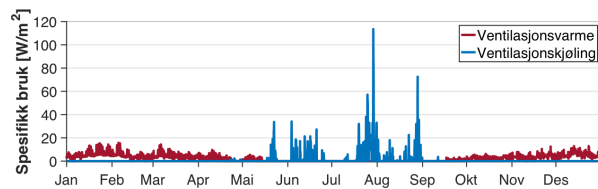
Fra delkapittel 5.3 ble det observert avvik i effekttoppen for energi- og effektmåleren for romoppvarming, og av den grunn er figurene for målte ET-kurver konstruert ved å fjerne punkter hvor spesifikk romoppvarming er over 20 W/m^2 . Dette gjør det enklere å sammenlikne simulert og målt romoppvarming. I tillegg er det brukt samme areal for å finne den spesifikke romoppvarmingen, selv om modellen i IDA ICE har et annet areal enn det faktiske arealet til referansebygningen.

Ventilasjonsvarme mot tilluftstemperatur

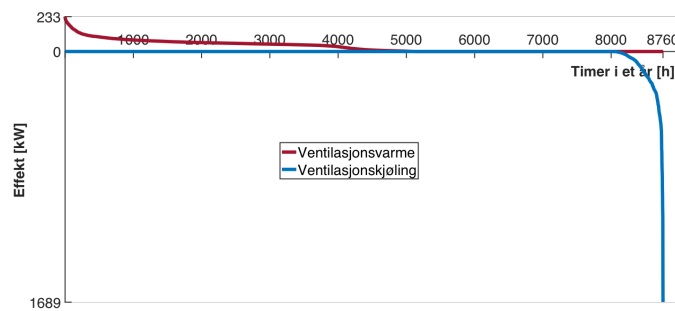


Figur 124 Ventilasjonsvarme mot tilluftstemperatur for vinter-måneder (Kalibrert modell)

Ventilasjonsvarme og ventilasjonskjøling

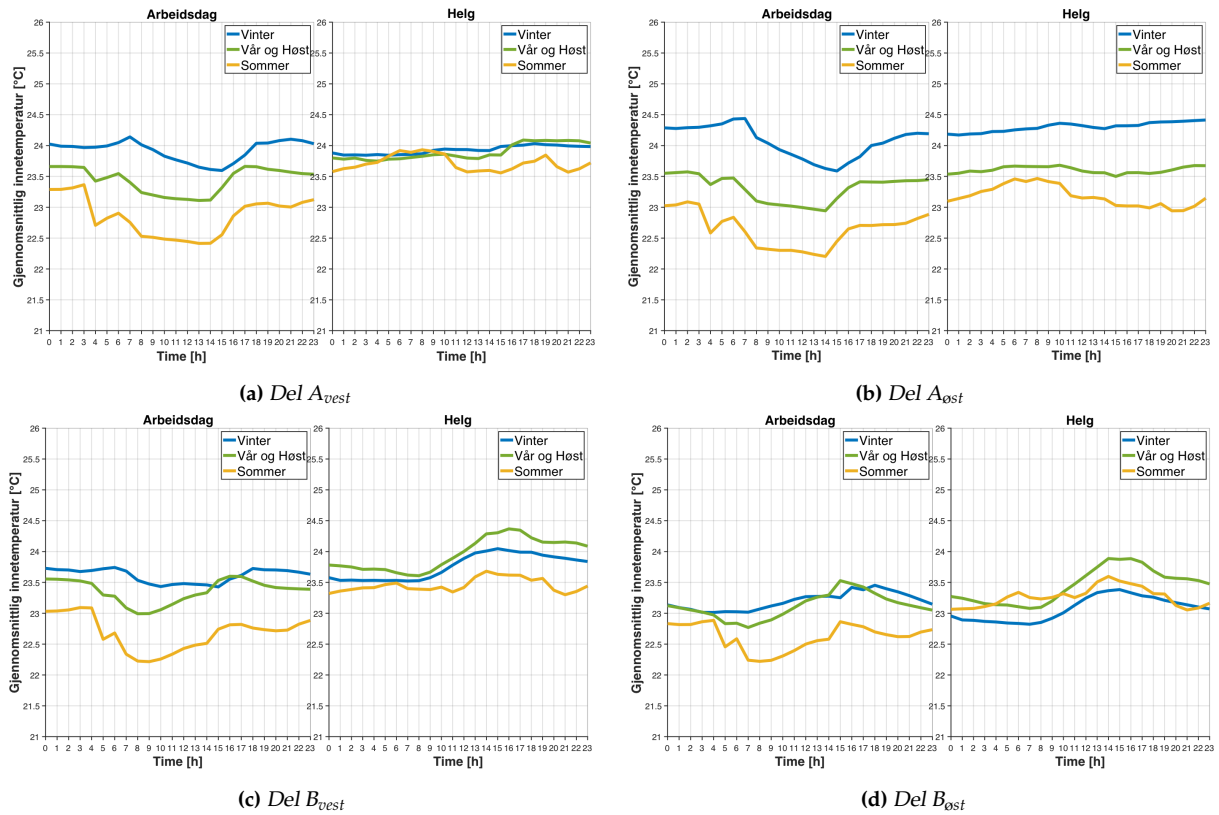


Figur 125 Spesifikk bruk for ventilasjonsvarme og ventilasjonskjøling (Kalibrert modell)



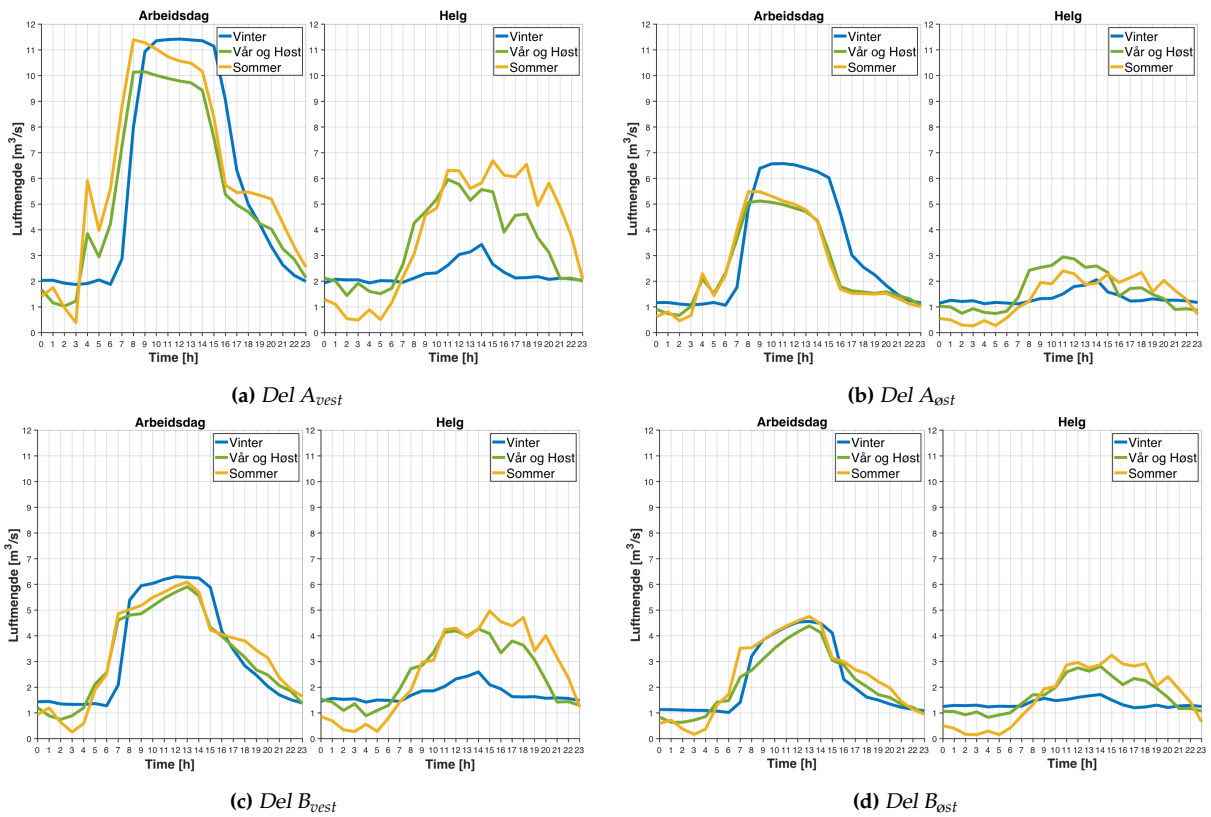
Figur 126 Varighetskurve for ventilasjonsvarme og ventilasjonskjøling (Kalibrert modell)

Profil for innetemperatur



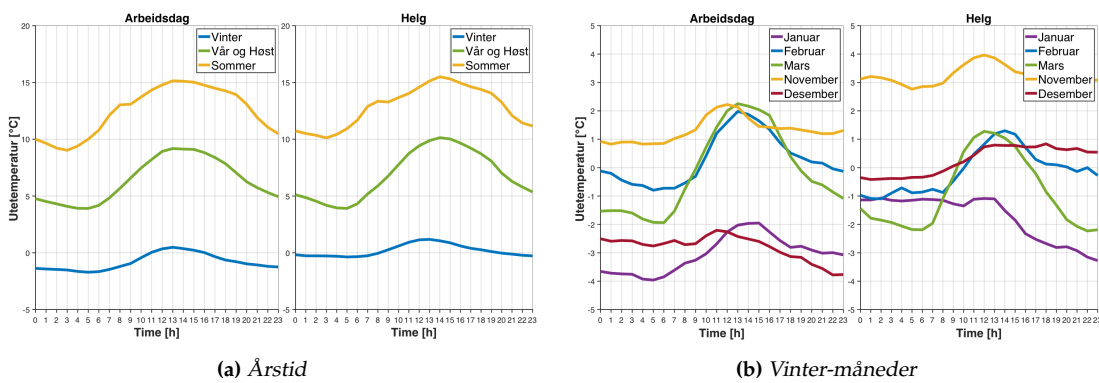
Figur 127 Profil av gjennomsnittlig innetemperatur av hvert rom i hver sone for årstider (Kalibrert modell)

Profil av luftmengde



Figur 128 Profil av luftmengde av hvert rom i hver sone for årstider (Kalibrert modell)

Profil av utetemperatur



Figur 129 Profil av utetemperatur 2019 (Kalibrert modell)

H Årlige scenarier

Definisjon av scenario 2

De kaldeste dagene i januar er 16.01, 17.01, 21.01, 22.01, 23.01, 24.01, 25.01, 28.01, 29.01 og 30.01.

De kaldeste dagene i februar er 04.02, 05.02 og 06.02.

De kaldeste dagene i mars er 05.03, 06.03 og 07.03.

De kaldeste dagene i november er 21.11 og 27.11.

De kaldeste dagene i desember er 11.12, 13.12, 14.12, 16.12, 17.12 og 23.12.

Tabell 35 Tilluftstemperatur for scenario 2 sammenliknet med kalibrert modell

Time	Januar	Februar	Mars	November	Desember
0	+2	+2	+2	+1	+2 / +2
1	+2	+2	+2	+1	+2 / +2
2	+2	+2	+2	+1	+2 / +2
3	+2	+2	+2	+1	+2 / +2
4	+2	+2	+2	+1	+2 / +2
5	-2	+2	+2	-1	+2 / -2
6	-2	-2	-2	-1	-2 / -2
7	-2	-2	-2	-1	-2 / -2
8	-3	-3	-3 / +1	-2	-3
9	-3	-2,5	+2,5 / -3	+2	-3
10	-2,5	-2,5	+2,5	+2	-2,5
11	-2,5	-2,5	+2,5	+2	
12	-2,5	-2,5	+2,5	+2	
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19	+2				
20	+2				
21	+2	+2	+2		/ +2
22	+2	+2	+2 / +1		/ +2
23	+2	+2	+2 / +1		/ +2

Grått i tabell 35 tilsvarer timen for høyeste tilluftstemperatur og høyeste effekttopp for ventilasjonsvarme. Dersom det allerede er lav tilluftstemperatur, eller en effekttopp for ventilasjonsvarmen opptrer på andre tidspunkt enn profilen for ventilasjonsvarmen viser, blir dette tatt hensyn til. Av den grunn er det noen unntak i tabellen markert med / i tabellen som markerer den eneste endringen for disse dagene. For 14.12 som er en lørdag og 23.12 som har lav tilstedeværelse, er det også unntak som ikke er markert i tabellen.

Energibruk og effekttopp for scenarier for vinter-måneder

Tabell 36 Effekttopp og energibruk for ventilasjonsvarmen for kalibrert modell og scenarier (vinter-måneder 2019)

		Januar [kW]	Februar [kW]	Mars [kW]	November [kW]	Desember [kW]
Kalibrert		227	233	212	185	191
Scenario 1	Forskjøvet tilluftstemp.	193	205	194	172	190
Scenario 2	Endret tilluftstemp. ved lav utetemp.	187	172	153	133	149
Scenario 3	$SP_{innertemp} = [21, 24] \text{ } ^\circ\text{C}$	196	185	171	132	147
Scenario 4	$SP_{luftmengde} = [0.7, 3] \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$	157	154	142	125	139
Scenario 5.1	Return air temp. control	1018	1092	1019	932	1077
Scenario 5.2	Return air temp. control med $SP_{innertemp} = [21, 24] \text{ } ^\circ\text{C}$	421	428	367	410	450
Scenario 5.3	Return air temp. control med VAV CO ₂ -regulering	247	252	232	210	277

(a) Effekttopp for ventilasjonsvarme

		Januar [MWh]	Februar [MWh]	Mars [MWh]	November [MWh]	Desember [MWh]
Kalibrert		62	40	42	37	57
Scenario 1	Forskjøvet tilluftstemp.	70	46	49	40	57
Scenario 2	Endret tilluftstemp. ved lav utetemp.	60	40	42	36	56
Scenario 3	$SP_{innertemp} = [21, 24] \text{ } ^\circ\text{C}$	51	34	37	31	44
Scenario 4	$SP_{luftmengde} = [0.7, 3] \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$	50	33	35	31	49
Scenario 5.1	Return air temp. control	336	218	223	201	359
Scenario 5.2	Return air temp. control med $SP_{innertemp} = [21, 24] \text{ } ^\circ\text{C}$	180	130	144	121	170
Scenario 5.3	Return air temp. control med VAV CO ₂ -regulering	123	91	101	84	118

(b) Energibruk for ventilasjonsvarme

Tabell 37 Effekttopp og energibruk for pumper og vifter for kalibrert modell og scenarier (vinter-måneder 2019)

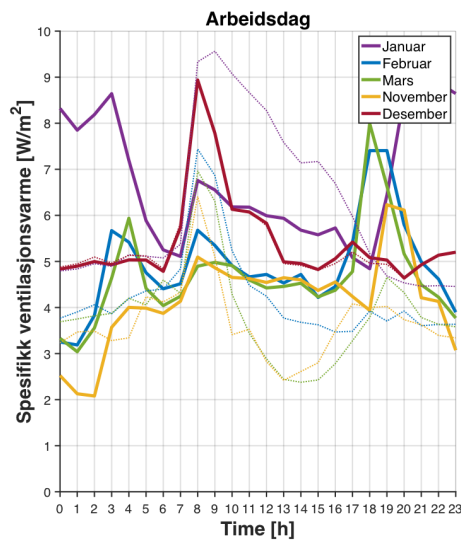
		Januar [kW]	Februar [kW]	Mars [kW]	November [kW]	Desember [kW]
Kalibrert		129	128	130	137	117
Scenario 1	Forskjøvet tilluftstemp.	115	123	124	123	116
Scenario 2	Endret tilluftstemp. ved lav utetemp.	129	128	129	137	117
Scenario 3	$SP_{innertemp} = [21, 24] \text{ } ^\circ\text{C}$	99	100	109	126	80
Scenario 4	$SP_{luftmengde} = [0.7, 3] \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$	79	84	84	84	75
Scenario 5.1	Return air temp. control	30	30	33	28	32
Scenario 5.2	Return air temp. control med $SP_{innertemp} = [21, 24] \text{ } ^\circ\text{C}$	13	15	16	13	13
Scenario 5.3	Return air temp. control med VAV CO ₂ -regulering	8	8	8	7	8

(a) Effekttopp for pumper og vifter

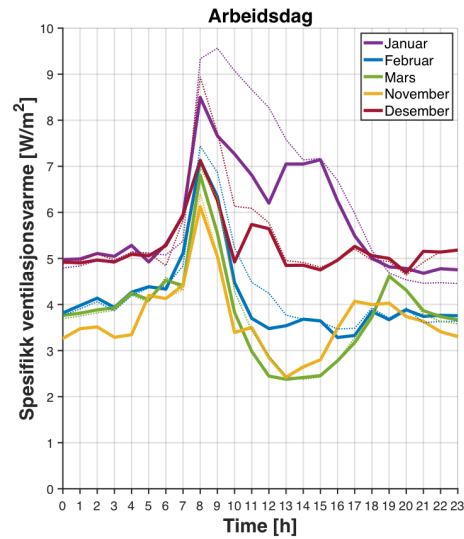
		Januar [MWh]	Februar [MWh]	Mars [MWh]	November [MWh]	Desember [MWh]
Kalibrert		31	30	34	27	26
Scenario 1	Forskjøvet tilluftstemp.	33	31	35	26	27
Scenario 2	Endret tilluftstemp. ved lav utetemp.	30	29	33	27	26
Scenario 3	$SP_{innertemp} = [21, 24] \text{ } ^\circ\text{C}$	24	24	29	22	19
Scenario 4	$SP_{luftmengde} = [0.7, 3] \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$	23	23	26	21	20
Scenario 5.1	Return air temp. control	11	8	8	8	13
Scenario 5.2	Return air temp. control med $SP_{innertemp} = [21, 24] \text{ } ^\circ\text{C}$	6	5	5	5	5
Scenario 5.3	Return air temp. control med VAV CO ₂ -regulering	4	4	4	3	4

(b) Energibruk for pumper og vifter

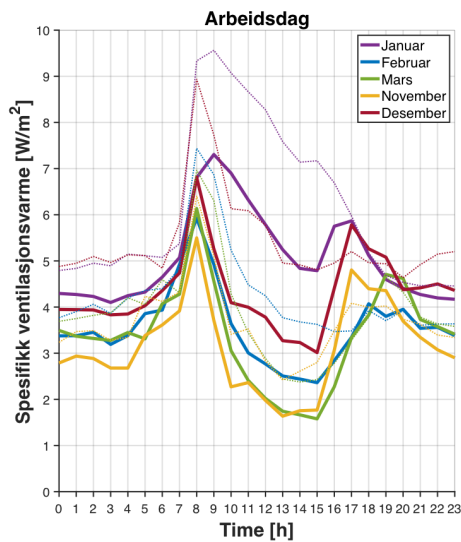
Profil av ventilasjonsvarme for scenarier



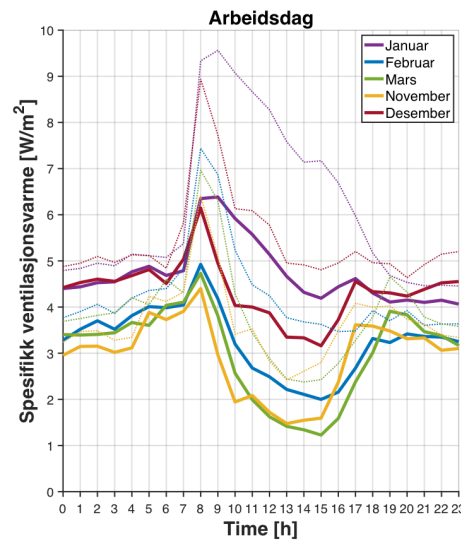
(a) Scenario 1 - Forskjøvet tilluftstemperatur



(b) Scenario 2 - Endret tilluftstemperatur ved lav ute-temperatur



(c) Scenario 3 - Minimum og maksimum settpunkt for innnetemperatur lik 21°C og 24°C



(d) Scenario 4 - Redusert maksimum settpunkt for luftmengde

Figur 130 Profil av ventilasjonsvarme (Scenario 1, Scenario 2, Scenario 3, Scenario 4)

Stiplet linje i figur 130 viser ventilasjonsvarmen for kalibrert modell.

