

# Romoppvarming i lavenergi kontorbygninger

**Fredrik Gram**

Master i energi og miljø

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Hans Martin Mathisen, EPT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for energi- og prosesseteknikk



EPT-M-2012-35

## MASTEROPPGAVE

for

Stud.techn. Fredrik Gram

Våren 2012

### Romoppvarming i lavenergi kontorbygninger

*Space heating in low energy office buildings*

#### Bakgrunn og målsetting

I moderne godt isolerte kontorbygninger vil varme fra personer, lys og PC være nok til å dekke transmisjonsvarmetapet, selv ved lave utetemperaturer. For å dekke behovet for romoppvarming når rommene ikke er i bruk installeres vanligvis lokale varmeavgivere som er dimensjonert for å dekke hele effektbehovet. I forhold til brukstid blir dette en relativt kostbar løsning.

Klimakjøling av bygninger krever også ofte kostbare installasjoner og er energikrevende, men dersom termisk lagring/nedkjøling utnyttes effektivt kan installasjon av mekanisk kjøling unngås og energibruken reduseres. Firmaet Energi & Miljø AS har utviklet en himlingsløsning "Kjølehimling" hvor termisk masse i etasjeskiller kjøles ned løpet av natten og akkumulerer varme i løpet av dagen.

Energi & Miljø AS ønsker å undersøke hvilke muligheter det er for å bruke en modifisert utgave av systemløsningen "Kjølehimling" til romoppvarming vha omluft.

Arbeidet er en videreføring av kandidatens masteroppgave.

#### Mål

Målet med oppgaven er å undersøke om det mulig å oppnå tilfredsstillende termisk komfort i moderne norske kontorbygninger ved at ventilasjonssystemet brukes til å holde en grunntemperatur gjennom vinteren og at lokale varmeavgivere (panelovner) kun brukes til individuell regulering av romtemperaturen. Videre skal energimessige konsekvenser av slike løsninger undersøkes.

#### Oppgaven tenkes bearbeidet ut fra følgende punkter:

1. I et energisimuleringsprogram eller en videreutviklet versjon av programmet som ble utviklet i prosjektoppgaven implementeres en modell hvor ventilasjonssystemet brukes til å holde en grunntemperatur gjennom vinteren og lokale varmeavgivere (panelovner) brukes til individuell regulering av romtemperaturen.

2. Dersom det er mulig innhentes måledata for temperatur i termiske masser (betong) fra en eller flere bygninger. Disse brukes til å verifisere simuleringverktøyene.
3. Utfør simuleringer av energi- og effektbehov til oppvarming og kjøling hvor ulike parametere som termiske masser, ventilasjonsløsning (behovsstyring, luftmengder) o.a. varieres. Dette kan gjøres for ulike romtyper og bruksmønstre. Også oppvarmingsløsningen med hensyn til energibruk og effektbehov vurderes. Termisk komfort analyseres for ulike belastningssituasjoner og vinter, vår/høst og sommer.
4. Finne de beste løsningene i forhold til termisk komfort, effekt- og energibehov. Foreslå eventuelt forbedrede løsninger. Gi anbefalinger knyttet til valg av løsninger og hvordan disse bør driftes.

” - ”

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sende instituttet en detaljert fremdrift- og eventuelt forsøksplan for oppgaven til evaluering og eventuelt diskusjon med faglig ansvarlig/veiledere. Detaljer ved eventuell utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

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

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og eventuelt figurnummer.

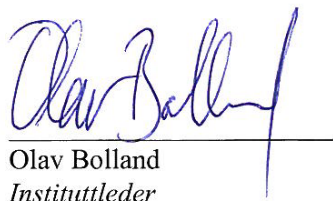
Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosesseteknikk.

Risikovurdering av kandidatens arbeid skal gjennomføres i henhold til instituttets prosedyrer. Risikovurderingen skal dokumenteres og inngå som del av besvarelsen. Hendelser relatert til kandidatens arbeid med uheldig innvirkning på helse, miljø eller sikkerhet, skal dokumenteres og inngå som en del av besvarelsen.

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

Besvarelsen leveres digitalt i DAIM. Et faglig sammendrag med oppgavens tittel, kandidatens navn, veileders navn, årstall, institutt navn, og NTNUs logo og navn, leveres til instituttet som en separat pdf-fil. Etter avtale leveres besvarelse og evt. annet materiale til veileder i digitalt format.

NTNU, Institutt for energi- og prosesssteknikk, 16. januar 2012



Olav Bolland  
*Instituttleder*



Hans Martin Mathisen  
*Faglig ansvarlig/veileder*

Medveileder(e)  
Kjell Kolsaker

## Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Institutt for energi- og prosessteknikk ved NTNU – Norges tekniske-naturvitenskaplige universitet våren 2012

Jeg vil gjerne takke firmaet Energi&miljø for muligheten til å skrive om en problemstilling som var spennende og utfordrende på mange plan. Problemstillingen var knyttet direkte til videreutvikling av en ventilasjonsløsning de har utviklet. Spesielt vil jeg takke daglig leder, Fridtjov Holm, som har støtte og motivert meg underveis i oppgaven.

I tillegg vil jeg rette en stor takk til veilederen min, Hans Martin Mathisen, som har hjulpet med diverse problemer som har oppstått underveis. Han har også vært en støttespiller som har prøvd å guide meg i riktig retning.

Natasa Djuric fortjener også en stor takk for all hjelpen med simuleringsprogrammet EnergyPlus.

Til slutt vil jeg takke min samboer Sissel og min familie for støtte og oppmuntring. De fortjener også en stor takk for korrekturlesningen av denne oppgaven.



Fredrik Gram, 14.06.12 Trondheim



## Sammendrag

Denne oppgaven omhandler et plenumbasert omrøringsventilasjonsløsning. Dette plenumbaserte ventilasjonssystemet er utstyrt med en perforert aluminiumshimling med en lufttett akustisk duk og en innfelte diffusor i himlingplaten. Himlingsvolumet blir brukt som tilluftskanal og har eksponert termiske masser i betongdekket i taket. Denne løsningen har blitt testet og dokumentert av Sintef som svært effektiv i forhold til kjøling uten å gå på bekostning av inneklimate. Det har også blitt vist gjennom simuleringsresultater fra Sintef at det er mulig å eliminere all mekanisk kjøling ved hjelp av nattventilasjon og avkjøling av betongen i taket i plenumet.

Firmaet Energi&miljø AS bruker en slik tilluftsløsning i deres system kalt «kjølehimling». De ønsket å undersøke muligheten for å bruke varmluftsoppvarming i denne typen ventilasjonsløsning.

Som case er det tatt utgangspunkt i et reelt kontor i Statens Hus i Stavanger som bruker denne ventilasjonsløsningen. Kontoret ble implementert i programvaren EnergyPlus, et avansert amerikansk simuleringsverktøy, som skal være blant de mest fleksible i forhold til modelleringsvalg. Det ble utviklet en modell med konvensjonell oppvarming for å sammenligne med en modell som brukte varmluftsoppvarming i kombinasjon med en omluftstrategi for å minimere lufttemperaturøkningen.

For å evaluere systemet ble ulike endringer gjort på modellen for å skille ut effektene av termisk lagring i dekket og aluminiumshimlingens varmeoverføringsegenskaper. Ved å erstatte aluminiumshimlingen med en standard 10 mm isolasjonshimling kunne effekten av bruken av aluminium vurderes. Isolasjon ble plassert i taket for å undersøke den termiske lagringen i betongdekket, fordi isolasjonen delvis vil eliminere denne effekten, på grunn av lav konduktivitet og lav diffusivitet. Løsningen med isolasjon i taket kan også grovt sammenlignes med et standardssystem med tilluftkanal montert direkte i himlingen

Det ble gjort grundige simuleringer på tre utvalgte dager som skulle representere ulike typer klima og som dermed skulle utfordre løsningen på forskjellige måter. De tre ulike dagene ble valgt fra klimadataen - den kaldeste dagen i året med et relativt stort soltilskudd, en relativt kald dag uten soltilskudd og den varmeste dagen i året med et stort soltilskudd. Disse dagene ble analysert med hensyn til luft- og operativtemperatur, varmefluks absorbert av himlingen, tillufts- og overflatetemperaturer, luftmengder og effekter på oppvarming. Modellene ble simulert over ett år, hvor energibruken til oppvarming, kjøling, vifter, pumper og interne laster ble evaluert.



De ulike modellene ble deretter sammenlignet med hensyn til termisk komfort, energi- og effektbehov.

Resultatene viste at løsningen med aluminium og eksponert betong i taket komme best ut i forhold til energibruk og termisk komfort. Den totale årlige energibruken var da 82,69 kWh/m<sup>2</sup> 12% lavere enn løsningen med standard isolasjonsplater mellom kontor og plenum. Den operative temperaturen oversteg ikke 26°C og lufttemperaturen oversteg ikke 24,5°C den varmeste dagen. Løsningen med isolasjon mellom plenum og kontoret vil gi det dårligste inneklimaet og den høyeste energibruken. Den operative temperaturen vil med en slik løsning overstige 27°C og lufttemperaturen vil overstige 26,5°C. Den totale årlige energibruken var 94,32 kWh/m<sup>2</sup>.

Varmluftsoppvarming viste seg å ikke fungere i denne typen plenumbasert system fordi den krevde en femdobling av effekten til oppvarming sammenlignet med konvensjonell oppvarming. Med tilluftstemperaturer på 35°C inn i plenum resulterte det i en tilluftstemperatur på 22,5°C inn i kontoret. Settpunktet på 21°C ble ikke nådd på den relativt kalde dagen uten soltilskudd. Varmen ble absorbert i den eksponerte betongen i dekket og bidro bare med en temperaturøkning i betongoverflaten på 1°C, noe som er vanskelig å utnytte. Hovedgrunnen til dette er at konveksjonskonstanten i taket blir høy grunnet høyt luftskifte av volumet i himlingen. Dette, i kombinasjon med store temperaturforskjeller mellom overflate- og lufttemperatur, vil gir en høy varmeoverføring i taket, noe som fører til en økning på over 15 % i energibruk per kvadratmeter sammenliknet med et system som bruker en konvensjonell varmekilde plassert i kontoret.

Det ble også oppdaget svakheter i simuleringstøytet EnergyPlus. Et materiale som aluminium med veldig høy konduktivitet ble under simulering observert til å oppføre seg mindre dynamisk enn forventet. På grunn av dette ble utvalgte verdier fra EnergyPlus brukt i en matematisk varmebalanse for å predikere himlingens overflatetemperatur. Deretter ble den simulerte himlingstemperaturen sammenlignet med den predikerte temperaturen. Denne sammenligningen viste ulik oppførsel av overflatetemperaturen i himlingen for den predikerte og den simulerte temperaturen. Grunnen til dette er trolig at tidsskrittet ikke er tilstrekkelig lavt. Det laveste tidsskrittet i EnergyPlus er på 60 sekunder, noe som er altfor stort til å klare registrere aluminiumens hurtige temperaturendringer.

Energibehovresultatet ble i laveste laget sammenlignet med simuleringer gjort av Energi&miljø som simulerte en energibruk på 114kWh/m<sup>2</sup>. Det var spesielt oppvarmingsbehovet som var veldig lavt. Dette skyldes trolig at det ikke var implementert solavskjerming i det sydvendte kontoret, og at det er konstant tilstedeværelse av en person, lys og utstyr. Det ble derfor også gjort en

simulering av et nordvendt kontor for å undersøke forskjellen i oppvarmingsbehov, det ble også vist med ved implementering en liten pause og en lunsjpause.

Dersom det var mulig skulle det opprinnelig også innhentes måledata fra termiske masser. Disse dataene skulle brukes til verifisering av simuleringsresultatene. Dette viste seg dessverre å være vanskelig da Energi&miljø ikke hadde startet målinger av betongtemperaturer.

## **Abstract**

This master thesis deals with a plenum based ventilation system. The ventilation system is equipped with a perforated aluminum dropped ceiling with an airtight acoustic cover and the diffuser integrated in the ceiling. The volume above the ceiling is used as an air duct which is exposed to thermal masses in the roof. This kind of solution has been documented by a Norwegian research company Sintef to be an efficient way to cool offices without endangering the thermal climate. They have also shown through simulation that this type of solution can eliminate the need for mechanical cooling with correct use of nighttime ventilation to cool down thermal masses in the roof

A company named Energi&miljø AS uses this type of ventilation in their system called “kjølehimling“ (cooled suspended ceiling). They wanted to investigate the possibility of using a heated air strategy in their system.

An office in Statens Hus in Stavanger is used as a case because it uses this ventilation solution. This office is implemented in the American simulation tool EnergyPlus which is an advanced and flexible tool. There were developed two different models, one with conventional heating, and one with heated air in combination with an air recycle strategy.

To evaluate the system, the different models were changed to isolate the effect of thermal storage in the roof, and the aluminum ceiling heat transfer. By replacing the aluminum with standard 10mm isolation, the usage of aluminum can be evaluated. By placing isolation in the roof, the effect of thermal storage can partly be eliminated since isolation has low conductivity and diffusivity. This model can roughly be compared with systems which use conventional air ducts directly coupled to the dropped ceiling.

Three thorough simulations were done on three different days. The three days represented different climates which were supposed to challenge the solution in various ways. Therefore the days picked from the climate data were – the coldest day with relative big solar gains, a cold day with almost no solar gains and the hottest day with big solar gains. These days were analyzed with respect to air and operative temperatures, heat flux absorbed by the ceiling, inlet air temperature for the office and the surface temperature of the roof in the plenum, airflows, and the power effect on the heating devices. The models were also simulated over a year to evaluate the yearly energy usage for heating, cooling, pumps and fans, and internal gains.

The models were then compared with respect to thermal comfort, and energy and power demands.

The results showed that the solution with aluminum and exposed concrete in the roof was the best solution with respect to energy usage and thermal comfort, with a total energy usage of  $82.69\text{kWh/m}^2$  which was 12 % lower than the solution with isolation between the office and the plenum. The operative temperature did not exceed  $26^\circ\text{C}$  and the air temperature did not exceed  $24,5^\circ\text{C}$  on the hottest day. In comparison the solution with isolation separating the office and plenum gave the poorest thermal climate and the highest energy usage. The operative temperature exceeding  $27^\circ\text{C}$ , the air temperature exceeding  $26,5^\circ\text{C}$ , and the energy usage was  $94,32\text{kWh/m}^2$ .

The heated air solution did not work for this type of plenum based system, since it required a five-fold increase in power effect compared to the conventional heating system. With an inlet air temperature of  $35^\circ\text{C}$  into the plenum resulted in an inlet air temperature to the office of  $22,5^\circ\text{C}$ . Even then the set point for heating was not reached on the cold day with no solar gains. The heat was absorbed in the concrete in the roof, and only contributed to raise the surface temperature by  $1^\circ\text{C}$  which impossible to utilize in a good way. The main reason for this was a high convection constant for the roof since it is given by the amount of air-changes of the plenum volume in combination with big differential temperatures between the air and the surface. This resulted in an increase in energy usage of over 15% per square meter compared to a system using a conventional heating placed in the office.

Weaknesses were also discovered in the simulation tool EnergyPlus. Aluminum material has very high conductivity and was shown through simulation not to behave as dynamically as expected. Therefore a set of values from EnergyPlus were used in a heat balance equation to predict the surface temperature of the ceiling. Then the predicted temperature and the value from EnergyPlus were compared. This comparison showed different behavior for the two. The most obvious reason for this is probably the lack of low enough time-steps in the simulation, since the lowest time-step for EnergyPlus is 60 seconds which is rather high for a material type like aluminum which will change temperature with great speed.

The energy use results were rather low compared to simulation done by Energi&miljø which was only  $112,4\text{kWh/m}^2$ . In the simulation in EnergyPlus it was especially the need for heating which was low. The reason for this is probably the lack of sun shading in a south facing office and the fact that there were a constant presence of a person, light and equipment. This was shown through simulation of a north facing office and a simulation which also include a small break and a lunch break.

If it was possible, it was originally supposed to be collect measurement data from thermal masse to verify the simulation result. This was sadly enough not possible because Energy&miljø had not yet started to measure these temperatures.

## **Innholdsfortegnelse**

Forord .....	i
Sammendrag .....	iii
Abstract .....	vi
1 Innledning .....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Mål .....	1
1.3 Begrensninger .....	2
1.4 Oppbygging .....	2
2 Plenumbasert ventilasjonssystem .....	4
2.1 Ventilasjonssystem .....	4
3 Teori og praksis .....	5
3.1 Termisk lagring .....	5
3.1.1 Materialers termiske egenskaper .....	6
3.1.2 Varmeoverføring .....	7
3.1.3 Fordeler og ulemper - tunge bygg .....	8
3.2 Unike komponenter .....	9
3.2.1 Himling .....	9
3.2.2 Plenum .....	10
3.2.3 Annen forskning utført på plenumbasert ventilasjon .....	12
3.3.4 Varmluft .....	12
4 Modelloppbygging .....	14
4.1 Statens Hus Stavanger .....	14
4.1.1 Kontor 4010 .....	14
4.2 Valg av simuleringsprogram .....	15
4.3 Varmebalanse for kontor .....	16
4.4 EnergyPlus .....	18
4.4.1 Tilleggsprogrammer .....	19

4.5 Designprosess.....	20
4.6 Geometri, materialer og konstruksjoner.....	20
4.6.1 Geometri.....	20
4.6.2 Materialer .....	22
4.6.3 Konstruksjoner .....	22
4.7 Indre og ytre laster og inneklima.....	26
4.7.1 Indre laster.....	26
4.7.2 Ytre laster - værdata.....	27
4.7.3 Sonenivå.....	28
4.7.4 Luft.....	29
4.8 Installasjoner .....	31
4.8.1 Varmeovn.....	31
4.8.2 Sentralt luftanlegg .....	31
4.8.3 Varme- og kjølebatteri .....	32
4.8.4 Vifter .....	33
4.8.5 OutdoorAirMixer .....	33
4.8.6 Varmegjenvinner.....	34
4.8.7 AirLoop.....	34
4.8.8 Fjernvarme/kjøling.....	35
4.8.9 Vannkretser .....	35
4.8.10 Pumper .....	35
4.8.11 Sammenligning til TEK .....	36
4.9 Varmebalansemetode, konveksjon og utfordringer .....	37
4.9.1 Valg av varmebalansemetode .....	37
4.9.2 Konveksjon .....	37
4.9.3 Utfordringer med EnergyPlus underveis.....	37
5 Simuleringer .....	39
5.1 Konvensjonell oppvarming .....	39

5.2 Varmluftsoppvarming .....	41
6 Simuleringsresultater.....	42
6.1 Resultater fra dagssimuleringer.....	44
6.1.1 Aluminiumshimling .....	44
6.1.2 Standard isolasjonshimling .....	46
6.1.3 Isolasjon i tak .....	48
6.1.4 Varmluft aluminiumshimling.....	50
6.1.5 Varmluft isolasjon i tak.....	52
6.2 Sammenligning av de tre løsningene i dagsperspektiv .....	54
6.2.1 Operativ temperatur .....	54
6.2.2 Varmefluks.....	54
6.2.3 Tilluftstemperatur og temperatur i taket .....	55
6.2.4 Luftmengde .....	56
6.2.5 Effekt ovn.....	56
6.3 Energisimuleringer .....	57
6.3.1 Aluminiums himling .....	57
6.3.2 Standard isolasjonshimling .....	58
6.3.3 Isolasjon i tak .....	59
6.3.4 Varmluft aluminiumshimling.....	60
6.4 Sammenligning av årlig og månedlig energibruk .....	61
6.4.1 Sammenligning årlig energibruk uten varmluft .....	61
6.5 Sammenligning av den årlige termiske komforten .....	65
7 Sammenligning av EnergyPlus og varmebalanse.....	66
7.1 Test av matematisk modell med data fra EnergyPlus .....	67
7.1.1 Aluminiumshimling .....	67
7.1.2 Standard himling.....	68
8 Diskusjon.....	70
8.1 Diskusjon omkring best og verst, energi- og effektbehov og termisk komfort.....	70



8.2 Sentrale spørsmål om materialer, plassering, overflatetemperaturer og energibruk .....	72
8.3 Usikkerheter .....	73
9 Konklusjon .....	74
10 Anbefalinger til videreføring av arbeid .....	76
11 Referanser.....	78
12 Vedlegg .....	81

## Figurliste

Figur 1 T.v konvensjonell tilluftsløsning t.h plenumbasert tilluftsløsning illustrert av Rasmus Z. Høseggen .....	4
Figur 2 Det komplekse bilde av varmeoverføringer i et kontor illustrert av Rasmus Z. Høseggen ..	7
Figur 3 Innfelt diffuser i himlingen. Bilde hentet fra Meta hjemmeside (Meta).....	10
Figur 4 Statens Hus bildet hentet fra (bygg.no) .....	14
Figur 5 Kontor 4010 fra tegninger av Statens Hus.....	14
Figur 6 Varmebalansemodell for plenumsløsning .....	16
Figur 7 EnergyPlus ulike beregninger.....	18
Figur 8 Bilde av IDFeditor, Resultviewer og VoloViewer .....	19
Figur 9 Kontorets geometri gjennnitt i VoloViwer .....	21
Figur 10 Sandwich element.....	22
Figur 11 Tegning av Rasmus Z. Høseggen (Mathisen and Høseggen 2011).....	23
Figur 12 Interne laster aktive fra 8:00-18:00.....	26
Figur 13 Værdata verdier .....	27
Figur 14 Temperatur, direkte og diffus solinnstråling 2.feb, 21.nov og 3.aug.....	28
Figur 15 Driftsstrategi oppvarming og kjøling.....	29
Figur 16 Drift minimum og maksimum luftmengde med hensyn til driftstid .....	30
Figur 17 Kontor illustrert fra EnergyPlus perspetiv .....	31
Figur 18 Sentralt lufteanlegg sett fra EnergyPlus perspetiv .....	32
Figur 19 Driftstemperatur sommer og vinter.....	32
Figur 20 Varmegjenvinner og omluftsspjeld i OutdoorAirSystem .....	34
Figur 21 Varme- og kjølebatteri med tilhørende fjernvarme og fjernkjøling krets.....	35
Figur 22 Illustrasjoner av de ulike plasseringene av isolasjon .....	40

Figur 23 Aluminiumshimling: Luft- og operativtemperatur, varmekraft til himling, tillufts- og betongtemperatur, luftmengde og effekt på ovn den 2.feb, 11.nov og 3.aug .....	44
Figur 24 Standard isolasjonshimlingen: Luft- og operativtemperatur, varmekraft til himling, tillufts- og betongtemperatur, luftmengde og effekt på ovn den 2.feb, 11.nov og 3.aug .....	46
Figur 25 Isolasjon i taket: Luft- og operativtemperatur, varmekraft til himling, tillufts- og betongtemperatur, luftmengde og effekt på ovn den 2.feb, 11.nov og 3.aug .....	48
Figur 26 Aluminiums himling varmluft: Luft- og operativtemperatur, varmekraft til himling, tillufts- og betongtemperatur, luftmengde og effekt på ovn den 2.feb, 11.nov og 3.aug .....	50
Figur 27 Isolasjon i taket varmluft: Luft- og operativtemperatur, varmekraft til himling, tillufts- og betongtemperatur, luftmengde og effekt på ovn den 2.feb, 11.nov og 3.aug .....	52
Figur 28 Sammenligning av operativ temperatur for de ulike løsningene .....	54
Figur 29 Sammenligning av varmekraften i himlingen .....	54
Figur 30 Sammenligning av tillufts- og overflatetemperatur .....	55
Figur 31 Sammenligning av luftmengder.....	56
Figur 32 Ovn effekt .....	56
Figur 33 Aluminiumshimling: Månedlig energibruk over hele året.....	57
Figur 34 Aluminiumshimling: Månedlig energibruk for hele måneder med vinterdrift .....	57
Figur 35 Aluminiumshimling: Månedlig energiforbruk for hele måneder med vinterdrift utelatt lys og utstyr .....	57
Figur 36 Standard isolasjonshimling: Månedlig energibruk over hele året. ....	58
Figur 37 Standard isolasjonshimling: Månedlig energibruk for hele måneder med vinterdrift. ....	58
Figur 38 Standard isolasjonshimling: Månedlig energiforbruk for hele måneder med vinterdrift utelatt lys og utstyr. ....	58
Figur 39 Isolasjon i taket: Månedlig energibruk over hele året.....	59
Figur 40 Isolasjon i taket: Månedlig energibruk for hele måneder med vinterdrift. ....	59
Figur 41 Isolasjon i taket: Månedlig energiforbruk for hele måneder med vinterdrift utelatt lys og utstyr.....	59
Figur 42 Aluminiumshimling varmluft: Månedlig energibruk over hele året.....	60
Figur 43 Aluminiumshimling varmluft: Månedlig energibruk for hele måneder med vinterdrift. ....	60
Figur 44 Aluminiumshimling varmluft: Månedlig energiforbruk for hele måneder med vinterdrift utelatt lys og utstyr. ....	60
Figur 45 Sammenligning av årlig energibruk med og uten varmluftsoppvarming .....	61
Figur 46 Total årlig energiforbruk for de ulike løsningene .....	61
Figur 47 Månedlig energiforbruk for de 3 ulike løsningene med månedlig gjennomsnittstemperatur.....	62

Figur 48 Månedlig oppvarmingsbehov for de tre ulike løsningene .....	62
Figur 49 Månedlig kjølebehov for de tre ulike løsningene .....	63
Figur 50 Månedlig energibruk vifter for de tre ulike løsningene .....	63
Figur 51 Sammenligning av den totalte årlig energibruken for oppvarming, kjøling, vifter og pumper for de tre casene .....	64
Figur 52 Energiforbruk oppvarmingsmåned .....	64
Figur 53 Timer hvor settpunkt ikke er møtt for oppvarming. ....	65
Figur 54 Timer hvor settpunkt ikke er møtt for kjøling. ....	65
Figur 55 Aluminiumshimling: Sammenligning av resulater fra EnergyPlus og ligning 4.6 den 21.november 00:00-24:00 .....	67
Figur 56 Aluminiumshimling: Dynamikk i himling gitt av EnergyPlus den 21.november 00:00-24:00.....	67
Figur 57 Aluminiumshimling: Sammenligning av av romtemperaturen og overflatetemperatur gitt av varmebalanse .....	68
Figur 58 Standard isolasjonshimling: Sammenligning av resulater fra EnergyPlus og fra ligning 5.6 den 21.november 00:00-24:00.....	69
Figur 59 Standard isolasjonshimling: Sammenligning av av romtemperaturen og overflatetemperatur gitt av varmebalanse .....	69
Figur 60 Årlig temperaturutvikling for kontoret (svart kurve) og plenumet (blå kurve) for de tre løsningene fra venstre Aluminiumshimling, standard isolasjon i himling og isolasjon i taket.....	72

## Tabelliste

Tabell 1 Konveksjonskoeffisient for ulike flater gitt av luftskrifte .....	11
Tabell 2 Fujita og Tomiie: Konveksjonskoeffisienten i et plenum.....	11
Tabell 3 Implementerte materialer .....	22
Tabell 4 Materiale egenskaper hulldekket.....	23
Tabell 5 Skillevegg tykkelser .....	24
Tabell 6 Inputverdi for glassene i EnergyPlus .....	25
Tabell 7 Interne laster.....	26
Tabell 8 EnergyPlus komponent implementert .....	29
Tabell 9 Tabell over krav TEK07, 10 og verdier for Statens hus.....	36

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Bakgrunnen for denne oppgaven er et plenumbasert omrøringsventilasjonsystem som bruker plenumet over himlingen som tilluftskanal. Himlingen er laget av perforert aluminium med en lufttett akustisk duk på oversiden og diffusoren er innfelt i himlingen. Himlingsvolumet fungerer som et plenumskammer som har eksponert betong i etasjedekket. Løsningen kan derfor utnytte den eksponerte betongens termiske egenskaper til å påvirke tilluftstemperaturene inn til kontoret og aluminiumen vil fungere som en kald strålingsflate på grunn av den lave konduktiviteten.

Denne løsningen har blitt testet og dokumentert av Sintef som en god løsning i forhold til effektivt ventilasjonskjøling uten å gå på bekostning av inneklimate. Sintef har også gjort simuleringer av denne løsningen som viser at med riktig bruk av nattventilasjon kan den termiske massen i taket kjøles tilstrekkelig ned slik at den mekaniske kjølingen kan elimineres på sommerstid.

Firmaet Energi&miljø leverer en slik løsning og ønsket å undersøke muligheten for å bruke varmluftsoppvarming i et slikt system.

## 1.2 Mål

Denne ventilasjonsløsningen skal evalueres ved hjelp av EnergyPlus som er et avansert simuleringsverktøy. Ved å ta utgangspunkt i et reelt kontor i Statens Hus i Stavanger som bruker denne ventilasjonsløsningen skal det utvikles to modeller. En konvensjonell oppvarmingsmodell og en modell med varmluftsoppvarming i kombinasjon med en omluftsstrategi.

Simuleringsverktøyet skal også brukes til å undersøke effekten av den eksponerte betongens påvirkning av tilluftstemperaturen inn i kontoret. Dette skal evalueres ved å isolere betongoverflaten som delvis vil eliminere effekten av betongens termiske egenskaper. Aluminiumshimlingens påvirkning skal også undersøkes ved hjelp av isolasjon. Ved å bruke standard isolasjonshimling istedenfor aluminium kan dens effekt bli analysert. På grunn av dette skal det utvikles tre ulike oppsett av kontoret som skal evalueres med hensyn til effekt- og energibehov og termisk komfort. Kontor oppsettene skal testes med og uten varmluftsoppvarming

For å evaluere den termiske komforten skal tre utvalgt dager velges som representerer ulike klimapåkjenninger som skal sette løsningens termiske komfort på prøve. Dagene skal være: den varmeste sommerdagen med et stort soltilskudd, den kaldeste vinterdagen som har klarvær med et

stort soltilskudd og en kald overskyet dag. De ulike oppsettene av løsningen skal bli evaluert med hensyn til luft- og operativ temperatur, varmeflukser til himlingen, tillufts- og betongoverflatetemperaturer, luftmengder og effektbehov.

Resultatene fra de ulike oppsettene skal deretter bli sammenlignet for å evaluere den termiske komfort og effektbehov. Det skal også gjøres analyser av årlige energibehov for de ulike løsningene, hvor de ulike energipostene skal undersøkes og sammenlignes. Ved hjelp av disse sammenligningene skal det gis anbefalinger basert på analysene.

Dersom det var mulig skulle det også innhentes måledata fra termiske masser for å verifisere simuleringresultatene. Dette viste seg å ikke være mulig siden temperaturmålingene i de termiske massen i Statens Hus startet for sent.

### **1.3 Begrensninger**

Det er flere begrensninger i forhold til oppgaven. Simuleringsprogrammets funksjonalitet kan være en begrensning i forhold til å modellere denne typen plenumbasert system, hvorvidt det er mulig å lage en modell som representerer det virkelige systemet. Spesielt siden det ikke er en konvensjonell ventilasjonsløsning.

Det er også begrensninger i forhold til lave nok simuleringstidskritt for å simulere dynamikken i aluminiumshimlingen som har svært høy konduktivitet og vil oppføre seg annerledes enn de fleste typiske bygningsmaterialer.

En annen begrensning er verifisering av simuleringresultater med hensyn til målinger. Dette viste seg i ettertid å ikke være mulig.

### **1.4 Oppbygging**

Oppgaven starter med å introdusere det plenumbaserte ventilasjonssystemet. Deretter følger en teori- og praksisdel som tar for seg litt om termisk lagring, og ulike varmeoverføringer som er relevant både i forhold til lagring og til varmeoverføringsdynamikken i bygg. Det blir nevnt fordeler med termisk tunge bygg og hvorfor slike bygg har vist seg å være gunstig.

Oppgaven går deretter inn på de ulike komponentene som er unike med denne type løsningen. Målet er å prøve å belyse noen av utfordringene som må tas hensyn til i slike systemer. Forskningen av Sintef som er blitt utført på oppdrag av Energi&miljø på deres løsning blir

oppsummert. Deretter blir det gjort noen få betraktninger rundt bruken av varmluft som oppvarming.

De neste kapitlene i oppgaven omhandler modelloppbyggingen som tar for seg bygget Statens Hus og kontoret som er brukt som case. Deretter blir valget av simuleringsprogram begrunnet, og en enkel varmebalanse for kontoret blir presentert. EnergyPlus og tilleggsprogrammer blir presentert. Resten av kapitlet omhandler det som er implementert i EnergyPlus modellen.

Kapitel 6 gjør rede for de ulike kontor oppsettene og valgene for de ulike simuleringene.

Kapitel 7 presenterer simuleringsresultater både med hensyn til detaljerte dagssimuleringer og årlige energibruk. Resultatene for de ulike oppsettene blir deretter sammenlignet.

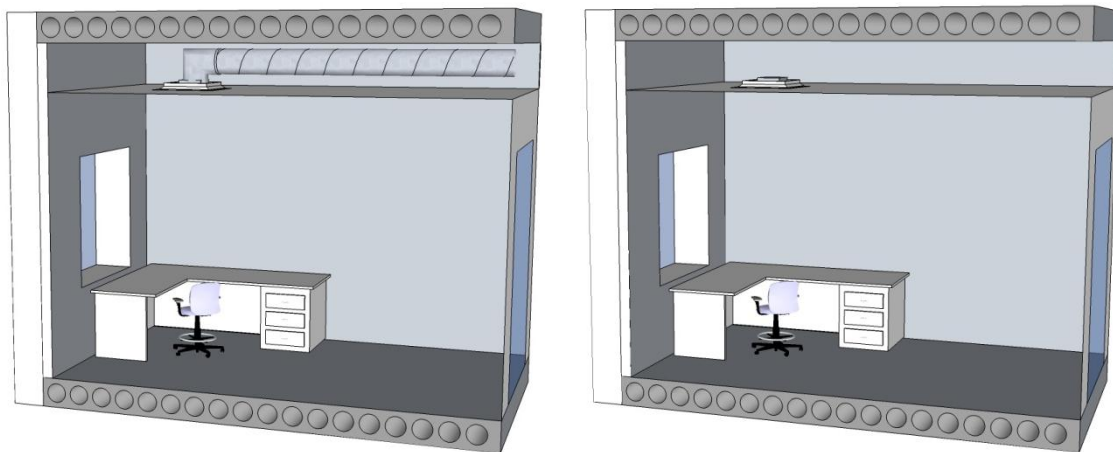
Kapitel 8 sammenligner resultater fra EnergyPlus og resultater fra en varmebalanse

De neste kapitlene er diskusjon av resultatene og konklusjon. Oppgaven avsluttes med å gi noen anbefalinger til videre arbeid.

## 2 Plenumbasert ventilasjonssystem

### 2.1 Ventilasjonssystem

Ventilasjonsløsningen er et plenumbasert system som bruker plenumet som tilluftskanal. Himlingplatene er laget av perforert aluminium og har innfelt diffusor i himlingsoverflaten som er dekket av en tynn lufttett akustisk duk på oversiden. Plenumskammeret har eksponert betong i taket som vil påvirke tilluftstemperaturen inn til kontoret. Modellen til høyre i figur 1 viser en standardløsning med tilluftskanalen koblet direkte i himlingene. Modellen til høyre viser det plenumbaserte systemet som bruker plenumet som tilluftskanal.



Figur 1 T.v konvensjonell tilluftsløsning t.h plenumbasert tilluftsløsning illustrert av Rasmus Z. Høseggen

Systemet til høyre er et VAV/DCV (Varibale Air Volume/Demande Control Ventilation) system som styres ved hjelp av en tilstedeværelsessensor og en termostat. Når kontoret er tomt vil luftmengdene bli satt til minimum og dersom temperaturen i kontoret når settpunkt for kjøling vil luftmengden gradvis bli økt for å holde settpunkt for kjøling. Systemet bruker konstante tilluftstemperaturer på 19/17°C i vinter- og sommerdrift. Kontoret har eksponert betong i veggen som grenser mot uteomgivelsene og i takdekket. Kontorcellen er skilt av lettvegger av gips og isolasjon. Det er også utstyr med en radiator under vinduet, og normalt kontorutstyr. Dette kontoret vil bli nærmere beskrevet i kapittel 4.

### **3 Teori og praksis**

I dette kapitlet vil ulike faktorer som termiske masser og ulike varmeoverføringer bli gjennomgått da dette er basisen for å forstå det essensielle for en plenumbasert løsning. Termiske masser i kombinasjon med et plenumbasert tilluftssystem er hovedårsaken til at et slikt ventilasjonsløsning kan være gunstig med hensyn til riktig utnyttelse av de termiske massene i taket.

#### **3.1 Termisk lagring**

Termisk lagring er et gammelt fenomen som har vært brukt i mange tusen år, spesielt i Midtøsten og Sør-Europa hvor klimaet er varmt. På grunn av mye sol og høye utetemperaturer kan tunge bygg absorbere varme gjennom dagen slik at konstruksjonen gradvis blir «ladet» opp. Når kvelden kommer og utetemperaturene synker, vil bygget avgi varme til omgivelsene, og samtidig eliminere behovet for varme innendørs på grunn av høye temperaturer i konstruksjonen. Denne effekten oppstår på grunn av materialets egenskap til å transportere varme og i termisk tunge bygg vil hastigheten varmen transporteres gjennom konstruksjonen skje sakte slik at bygge holdes kaldt på dagtid og varmt på kveldstid. Historisk sett har det i kaldere klima vært mindre vanlig å utnytte termisk lagring i bygg (Hawes, Banu et al. 1989).

Med termiske masser menes de ulike konstruksjonene i rommet som vegger, tak og gulv. Når det gjelder termiske masser i et bygg er det viktig å skille mellom interne og eksterne masser. I et kaldt klima vil de eksterne ikke ha stor innvirkning på temperaturforløpet inne siden varmen alltid vil transporteres ut til omgivelsene. Men siden moderne bygg stadig blir mer isolert og passive interne laster kan være større enn varmetapet til omgivelsene har de interne termiske massene fått mer relevans. Da kan de interne massene absorbere overskuddsvarmen og derfor redusere varmebehovet utenfor drift. De interne massene kan også brukes i kombinasjon med nattventilasjon for å avkjøle bygningskonstruksjonen på sommerstid. Derfor er det i denne oppgaven fokus på de interne termiske massene og hvorvidt disse er eksponert.

Lufttemperaturen i et rom er bestemt av ulike faktorer som utetemperatur, soltilskudd og varmetilskudd fra interne laster som lys, utstyr og personer. For å kontrollere romtemperaturen må det enten tilføres eller fjernes varme.

Hastigheten til temperaturforløpet i et rom er bestemt av hvilke materialer rommet består av, samt egenskapene til disse materialene. Rommets varmekapasitet bestemmer hvor hurtig temperaturen vil stige eller synke. Dersom rommet har høy varmekapasitet, vil materialene absorbere varme og dempe temperaturstigningen og kan derfor redusere kjølebehovet på sommerstid. På vintertid vil



termisk tunge bygg kunne akkumulere varme fra de interne lastene, og noe av soltilskuddet kan lagres for å senke varmebehovet på nattestid. Dette vil også bidra til å lettere holde temperaturene innenfor komfortkriterier.

Bruken av nattventilasjon hvor bygningsmassen blir avkjølt på sommerstid har vist seg å ha en positiv effekt på maksimal innetemperatur, og kan minimere innetemperaturen med 2-6K (Givoni 1998; Ghiaus and Allard 2006). Energibruk til kjøling kan da reduseres med 5-36 % i ulike klimaer (Høseggen 2008).

En matematisk studie av Yang og Li viser at kjølebehovet er sensitivt i forhold korrekt mengde termisk masse, inn- og utvendigkonveksjon og plassering av de termiske massene med hensyn til best utnyttelse (Yang and Li 2008).

### 3.1.1 Materialers termiske egenskaper

Materialenes egenskaper til å lagre varme er basert på fysiske parametere som tetthet  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) og den spesifikke varmekapasiteten til materialet  $c_p$  ( $\text{J/kgK}$ ). Disse parameterne i kombinasjonen med tykkelsen på materialet  $d$  (m) bestemmer hvor mye energi som kreves for å løfte temperaturen med 1 K.

$$C_T = d\rho c_p \quad (\text{J/m}^2\text{K}) \quad (2.1)$$

Materialenes rekkefølge i en vegg vil også ha en betydelig effekt på hvordan en vegg vil ta opp energi. Konduktiviteten  $\lambda$  ( $\text{W/mK}$ ) beskriver varmetransporten i bredderetning av materialet med hensyn til temperaturdifferansen mellom materialets ytre grenser. Derfor vil en flates evne til å absorbere eller avgi varme være avhengig av hvilken type materiale som grenser til rommet. Hvorvidt det er betong, gips eller isolasjon, betyr enten stor eller liten evne til å absorbere energi.

Termisk diffusivitet  $\kappa$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) og termisk effusivitet  $\beta$  ( $\text{Ws}^{\frac{1}{2}}/\text{m}^2\text{K}$ ) forteller om andre materialeegenskaper, hvor den førstnevnte forteller hvor fort en varmekraft vil bevege seg gjennom materialet. Den sistnevnte forteller hvor fort et materiale vil absorbere en varmekraft. Denne kalles ofte for varmelagringsevne.

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left( \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) \quad (2.2)$$

$$\beta = \sqrt{\lambda c_p} \left( \frac{\text{Ws}^{\frac{1}{2}}}{\text{m}^2\text{K}} \right) \quad (2.3)$$

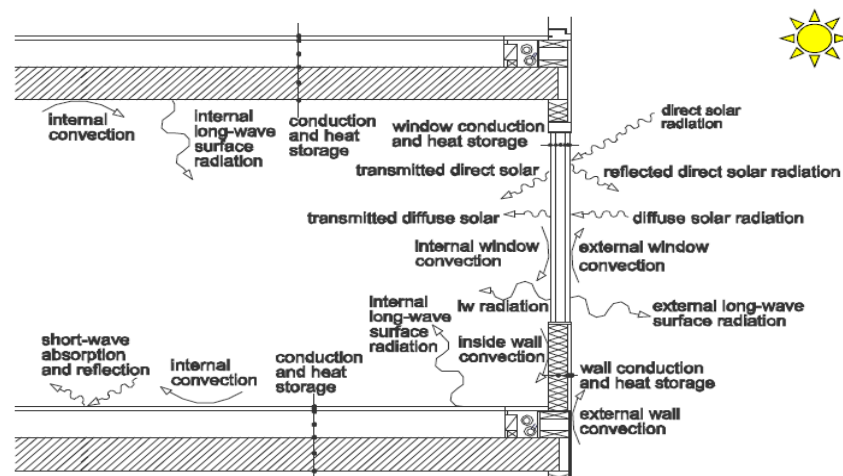
Disse egenskapene vil i sammenheng med de ulike varmeoverføringene bestemme hvordan et temperaturforløp i et rom vil utvikle seg og hvor hurtigheten temperaturøkningen vil skje. Dersom en temperaturøkning på 1K er ønsket i rom kun bestående av isolasjon vil dette skje ekstremt mye hurtigere enn et rom kun bestående av betong. På grunn av de termiske egenskapene vil ikke isolasjonen kunne absorbere og lagre energien slik betong gjør.

### 3.1.2 Varmeoverføring

Det er tre mulige måter varmetransport kan forekomme i et bygg. Det er ved konduksjon, konveksjon eller ved stråling.

Konduksjon er varmeoverføring basert på at temperaturdifferansen mellom to grensebetingelser er forskjellig – noe som vil føre til at varmen vil transporteres i retning fra varmt til kaldt. Dette er fysisk beskrevet i termodynamikkens andre lov, selv om det fra gammelt av har vært kjent gjennom observasjoner.

Konveksjon er basert på luftens bevegelse over en flate – det vil si temperaturskjellen mellom luften og flaten. Varmemengden som blir overført fra luften til flaten vil være avhengig av en konveksjonskoeffisient  $h_c (\frac{W}{m^2K})$  som beregnes ut fra strømningstypen som vil dominere over flaten. Luftstrømningen kan være naturlig eller tvungen. Med naturlig strømning menes vanligvis strømningen over store flater med liten temperaturdifferanse mellom flate og luft. Tvungen strømning er enten drevet av store temperaturskjeller mellom flaten og luften, som for en radiatorflate, eller ved mekaniske drivkrefter som styrer luftstrømningen. Dersom det er mekaniske drivkrefter vil konveksjonskoeffisient være bestemt av lufthastigheten eller luftskiftet i rommet.



Figur 2 Det komplekse bilde av varmeoverføringer i et kontor illustrert av Rasmus Z. Høseggen

Stråling kan deles i to – intern og ekstern stråling. Den eksterne strålingen er kortbølgestråling fra solen som enten er direkte, reflektert eller diffus ståling fra skyer.

Den interne stålingen er langbølgestråling mellom de ulike flatene i rommet. Her er vil det være emissiviteten  $\varepsilon$  som bestemmer hvor mye stråling som blir avgitt av flaten. Materialtypen vil være avgjørende for hvor mye flaten vil utveksle av langbølget stråling.

### **3.1.3 Fordeler og ulemper - tunge bygg**

Plassering av de termiske massene er sentralt i forhold til hvor stor innvirkning de har på temperaturen i rommet. Termiske masser er vanligvis plassert enten i tak, vegg eller gulv. Den minst effektive plasseringen har vist seg å være i gulvet siden konveksjon ved gulvet vil være lavest. Dersom diffusor ikke er innfelt i taket vil ytterveggen være den mest effektive plasseringen, men ellers vil taket være den mest effektive plasseringen. Taket vil da bli en kald strålingsflate. Dess tyngre bygg blir, dess mindre betydning vil den termiske massens plassering ha (Høseggen 2008).

Nattkjøling av termisk tunge bygg er en effektiv metode for å redusere kjølebehovet på sommerstid. Ved å utnytte temperaturdifferansen mellom dag og natt, kan bygningsstrukturen bli avkjølt for å senke kjølebehovet i løpet av dagen. Dette vil også bidra til å senke den operative temperaturen i driftstiden siden den er avhengig av overflatetemperaturene til de ulike flatene.

Utetemperaturen vil svinge mellom dag og natt. Temperaturdifferansen mellom høyeste og laveste utendørstemperatur mellom dag- og nattestid, vil gi en amplitude. Den har vist seg å være en indikator på hvor effektiv en nattventilasjonsstrategi kan være for ulike klima på sommerstid. Dess høyere amplitude, dess høyere kjøleeffekt kan man oppnå med nattventilasjon. Ifølge Pfafferott som refererer til en sveitsisk håndbok om frikjøling utgitt av EMPA som gir kjølingspotensialet ved hjelp av denne amplituden (Pfafferott, Herkel et al. 2003). Med differansetemperatur lavere enn 5K, kan man oppnå frikjøling på 150Wh/m<sup>2</sup> per dag og 250 Wh/m<sup>2</sup> per dag hvis differansen er større enn 10K.

Tunge bygg vil også ha en innvirkning på hvordan effekten til oppvarming og kjøling fordeles utover dagen. Tunge bygg vil bidra til en effektlastskiftning. Det har derfor vist seg at nattsinking av temperaturer i tunge bygg ikke er veldig gunstig på grunn av at store effekter må tilføres for å øke temperaturen ved dagens start i tunge bygg. På grunn av dette er det ikke anbefalt å bruke store nattsinkingstemperaturer i tunge bygg (Aschehoug, Aune et al. 2007 ).

## 3.2 Unike komponenter

I dette kapittelet vil diverse elementer i et plenumbasert system bli gjennomgått og gjort betraktninger rundt. Dette er for å gi et innblikk i problemstillinger som må tas hensyn til i forhold til slike løsninger.

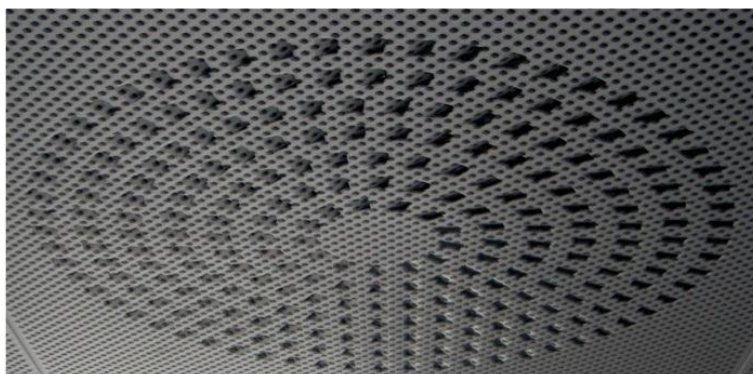
### 3.2.1 Himling

Himling er svært vanlig å bruke i norske kontorbygg, spesielt i bygg som ikke bruker fortrenningsventilasjon. Det er to hovedgrunner for å bruke himling: 1) Skjule installasjoner som tilluftkanaler, sprinkelanlegg og elektriske kabler som vanligvis befinner seg oppe under taket, og 2) bedring av akustisk miljø.

Himlingene er vanligvis laget av enten glassull, gips, mineralfiber eller metall. En av hovedfunksjonene til himlingsplatene er å absorbere lyd og lage et bedre akustisk klima for bygget. Dette er spesielt aktuelt for tunge betongbygg siden betong ikke har gode akustiske egenskaper. Perforerte metallhimlinger må være utstyrt med en akustisk duk for å hindre uheldige akustiske egenskaper.

I systemer som bruker himlingsløsninger er det normalt å koble luftventilene i taket direkte til tilluftskanal slik at luften strømmer direkte inn i rommet. Dersom det er termiske masser i taket i plenumet vil de bli "frakoblet" rommet og vil ikke kunne bidra like effektivt som eksponert termisk masse (Peperkamp and Vercaammen 2009). Kontakten mellom romluften og de termiske massene vil da bli mindre, og eventuelle effekter fra termiske egenskaper er vanskelige å utnytte i forhold til nattventilasjon.

En studie ble gjort av Høseggen et al (Høseggen, Mathisen et al. 2009) for å se på effekten av eksponert betong med hensyn til energibruk og termisk komfort, hvor himlingplater av isolasjon ble fjernet i et kontor for å eksponere betong i taket. Denne studien ble foretatt i et moderne kontorbygg utenfor Trondheim, hvor det ble gjort målinger av temperatur og energibruk. Disse målingene ble brukt for å verifisere en simulering gjort på samme kontor i EsP-r. Resultatene fra simuleringene viste at ved fjerning av himling ville det årlige oppvarmingsbehovet synke med 7%, den maksimale temperaturen på den varmeste dagen ville senkes med mer enn 1K. Den operative temperaturen vil svinge med 3 K uten himling og 5 K med himling i løp av dagen. Deres resultater med nattventilasjon uten himling viste også at luftmengdene kunne halveres på dagtid med de samme interne lastene.



**Figur 3 Innfelt diffuser i himlingen. Bilde hentet fra Meta hjemmeside (Meta)**

Firmaet Energi&miljø bruker et plenumbasert ventilasjonssystem som beskrevet i kapitel 2. Himlingen som blir brukt er en perforert aluminiumhimling som kan ses i figur 3. Den har også en lufttett akustisk duk på oversiden for å bedre det akustiske miljøet. Deres system bruker en diffusor som er innfelt i himlingen, og himlingsplatene er levert av Meta AS (Meta).

Bruken av aluminium i himlingen vil kunne gi en positiv effekt fordi massen i taket blir minst mulig "frakoblet" rommet på grunn av aluminiumets svært høye konduktivitet. Bruken av et plenum som tilluftskanal i kombinasjon med nattventilasjon vil ha en positiv innvirkning på utnyttelse av betongen siden det skjer mange luftskifter i det lille volumet.

Aluminiumen vil også minke strålingsutvekslingen mellom tak og gulv da aluminiumen har lavere emissivitet enn andre typiske himlingsmaterialer og rommet vil derfor være kaldere (Bauman, Jin et al. 2006).

### **3.2.2 Plenum**

Bruken av plenum som tilluftskanal i omrøringsventilasjon med diffusor i taket er en mindre vanlig ventilasjonsløsning. Det er svært lite litteratur innenfor dette feltet og om denne typen løsning. De systemene som bruker plenumsbaserte systemer er fortrenningsventilasjon med plenum under gulvet, ofte betegnet som UFAD (Under Floor Air Distribution). Det er derfor brukt litteratur innen dette felt da mange av problemstillingene er like.

En av utfordringene knyttet til å bruke et plenumskammer som tilluftskanal er overflatetemperaturens innvirkning på tilluftstemperaturen inn til rommet. Dette er tydelig siden flatens areal er store og volumet av kammeret er relativt lite. Flatens areal vil gi store kontaktflate for luften, og det høye luftskiftet gir en konveksjon som er basert på mekaniske drivkrefter.

Derfor vil konveksjonskoeffisienten  $h_c(\frac{W}{m^2K})$  være best beskrevet ved hjelp av antall luftskifter eller hastighet.

Fischer-Pedersen har ved hjelp av fullskala forsøk i laboratorium utviklet noen ligninger for å beregne konveksjonskoeffisienten for ulike flater i et kontor. Disse ligningene er gitt av en konstant for de ulike flatene og er avhengig av antall luftskifter opphøyd i 0,8 (gitt i tabell 1). Konstantene er funnet ved diffusor plassert i taket mens plenumsammer vanligvis vil ha lufttilførsel fra en av veggene (Daniel E. Fisher 1997).

**Tabell 1 Konveksjonskoeffisient for ulike flater gitt av luftskifte**

Overflate type	$h_c$ (W/m <sup>2</sup> K)
Vegg	$0,19ACH^{0.8}$
Tak	$0,49ACH^{0.8}$
Gulv	$0,13ACH^{0.8}$

Fujita og Tomiie utviklet en matematisk modell for et UFAD system som de verifiserte ved hjelp av en fullskala testrigg. Deres resultater tar hensyn til lufttilførselen ved veggene, og viste at konveksjonskoeffisienten for den termiske massen i gulvet av plenumet var best beskrevet av Jurge's ligning dersom hastighetene var høyere enn 2m/s. Dersom hastighetene var lavere var den best beskrevet ved hjelp av hastighet og Archimeds tallet Ar (Fujita and Tomiie 1999).

**Tabell 2 Fujita og Tomiie: Konveksjonskoeffisienten i et plenum**

	$v < 2m/s$	$v > 2m/s$
Gulv	$h_c = 10.3(1.45Ar + 0.42)v_m + 1.54$	$h_c = 5.8 + 3.9v$

Lufttemperaturen ut av plenumet vil da være avhengig av konduktivitet, konveksjon og ståling. Denne innvirkningen på plumbaserte systemer blir i litteraturen kalt for termisk nedbryting (thermal decay) (Lee, Schiavon et al. 2011). Det har ved hjelp av CFD (Computational fluid dynamics) simuleringer av UFAD systemer blitt påvist, at den termiske nedbrytingen i plenumsammeret er for stor til å ignoreres. En studie av Kwang Ho Lee et al viser samspillet mellom konduktivitet, konveksjon og ståling i et UFAD plenumsammer, og illustrere deres

påvirkning på lufttemperaturen ut av plenumskammeret (Lee, Schiavon et al. 2012). Deres resultater fra simuleringsprogrammet EnergyPlus viser at medianen for temperaturdifferansen for lufttemperaturen inn og ut av plenumet deres er på 3.7 K. Dette vil resultere i høyere luftmengder og derfor øker vifte- og kjøleenergibruken sammenlignet med et system som ikke tar hensyn til den termiske nedbrytningen i plenumet. Plenumet deres strekker seg over en etasje og er også indirekte påvirket av solinnstråling på oversiden av plenumet. På grunn av dette vil deres median trolig være betraktelig større enn systemet beskrevet i kapittel 2.

### **3.2.3 Annen forskning utført på plenumbasert ventilasjon**

På oppdrag fra firmaet Energi&miljø har Sintef skrevet to rapporter om plenumbasert ventilasjonsløsning som beskrevet i kapittel 2. Dette er den eneste litteraturen for et slikt system og blir det derfor referert til med tillatelse fra oppdragsgiver.

Den første rapporten omhandler termisk komfort for en slik løsning. Målinger ble gjort i et kontor med denne plenumsløsningen i kombinasjon med aluminiumshimling. Forsøkene ble gjort i NTNUs laboratorier og konkluderte med at løsningen gir tilfredstillende komfort med hensyn til vertikale temperaturforskjeller i rommet. Løsningen takler høye varmebelastninger i oppholdsonen uten fare for trekk i oppholdssonen. Luften som blåses inn fra diffusor klebrer til aluminiumshimlingen og klarte å fjerne opp til  $60\text{W/m}^2$ . Forsøkene ble gjort uten termiske masser i taket (Mathisen and Høseggen 2009).

Den andre rapporten er en simuleringsrapport som konkluderer med at løsning ved riktig bruk nattventilasjon kan klare å eliminere det mekaniske kjølebehovet. Dersom nattventilasjonen kjøler ned massen i taket tilstrekkelig trengs i realiteten ikke kjølebatteriet. Dette fordi løsningen kan utnytte overflatetemperaturene i plenumet for å oppnå lave nok tilluftstemperaturer i driftstiden uten at det går på bekostning av inneklimaet (Mathisen and Høseggen 2011).

### **3.3.4 Varmluft**

Bruken av varmluft som oppvarmingsmedium i kontorer er i et ventilasjonsperspektiv sett på som svært ukonvensjonelt i europeisk ventilasjonstradisjon. Det eksisterer svært lite litteratur innenfor feltet siden det er uvanlig, og har en del uheldige konsekvenser.

Bruk av varmluft innenfor brukstiden av et bygg vil være uheldig i forhold til hvordan luftkvaliteten oppleves av bruker av bygget. Å ventilere med varmluft vil senke den opplevde luftkvaliteten i kontoret da luft oppleves best som tørr og kald (Nilsson 2003). Dersom varmluft

skal brukes, er det trolig mest fornuftig å bruke dette utenfor driftstid. Et annet problem med bruken av varmluft, er at varm luft er lettere enn kald luft – noe som vil føre til at den varme luften vil legge seg opp under taket. Det trenges derfor en relativt høy lufthastighet for at varmluften effektivt skal kunne "blandes" med luften i rommet.

En annen faktor som gjør oppvarming med varmluft til en utfordring, er den lave spesifikke varmekapasiteten til luft. Dette gjør at det kreves rimelig høye temperaturer, eller relativt store mengder luft, for å tilføre tilstrekkelig effekt. Dette vil øke både vifte- og pumpeeffekten til et slikt system i motsetning til et vannbasert system.

Fordelen med et varmluftssystem er at det ikke krever noen ekstra installasjoner med hensyn til distribusjon av oppvarmingsmedium siden det er ventilasjonssystemet som transporterer varmen. Men ved bruk av alminnelige kanalnett vil nok varmetapet til omgivelse under transport være betydelig. Derfor vil nok et system med varmluft måtte ha isolerte kanaler for å klare å oppnå tilstrekkelig høye tilluftstemperaturer i rommet (Feist, Schnieders et al. 2005). Dette vil da kreve større investeringer i kanalnettet. Et varmluftssystem vil også ha større investeringskostnader på grunn av økt størrelse av varmebatteriet i og med at luften skal varmes opp med 10-20K.

En av hovedårsakene til bruk av ovner plassert under vinduet var å eliminere kaldraset. Dagens vinduer er blitt svært gode i forhold til u-verdi slik at kaldras fra vinduer ikke lenger er et problem når u-verdien er lavere enn  $1,4 \frac{W}{m^2K}$  ved normalt høye vinduer (Fasadeforeningen 2007).

Dersom et varmluftssystem skal kunne driftes mest optimalt, må vifteeffekten minimeres og effekten for oppvarming av luften minimeres. For å oppnå dette kan eventuelle omluftsstrategier bli brukt da det vil minske temperaturstigningen i luften som blir oppvarmet. Men omluftsløsninger er ifølge Arbeidstilsynet ikke gunstig med hensyn til forurensinger i luften som kan hoppe opp i bygget og lagres i porøse materialer. Selv med friskluftstilførsel før arbeidsdagen starter er ikke dette anbefalt fra deres side (Arbeidstilsynet 2003)

For at en omluftsløsning skal kunne fungere må materialvalgene i bygget være nøye valgt med hensyn til emisjon fra materialene i bygget, men alt i alt har varmluft og omluft uheldige konsekvenser som må veies mot eventuelle vinninger.



## 4 Modelloppbygging

Statens Hus er valgt som case fordi dette bygget bruker en plumbasert tilluftsløsning lik den som er beskrevet i kapitel 2.1

### 4.1 Statens Hus Stavanger

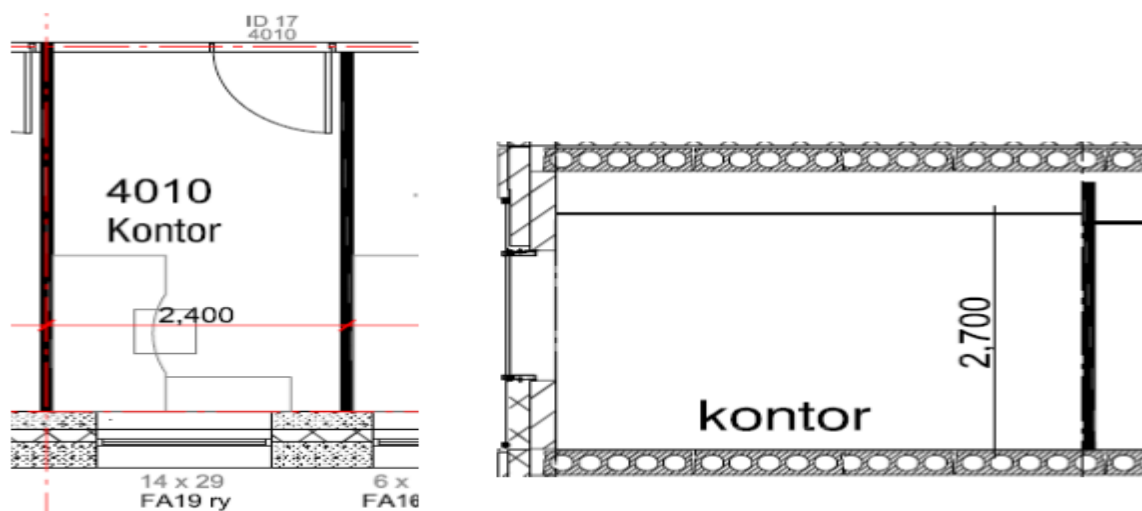
Simuleringsmodellen tar utgangspunkt i Statens Hus i Stavanger hvor Energi&miljø AS har levert og designet ventilasjonssystemet. Dette bygget ble ferdigstilt 1. september 2010, og har et simulert energibruk på  $114\text{kWh/m}^2$ , noe som vil klassifisere bygget i energimerkingsklassen B. Bygget har et samlet areal på  $21000\text{m}^2$ , og er fordelt på 5 etasjer. Bygget er laget av sandwich betonelementer levert av Block Berge AS.



Figur 4 Statens Hus bildet hentet fra (bygg.no)

#### 4.1.1 Kontor 4010

Det er i denne oppgaven tatt utgangspunkt i kontor 4010 i Statens Hus som er et standard cellekontor på ca  $10\text{m}^2$ . Rommet inneholder standard kontormøbler, lys, utstyr og en person.



Figur 5 Kontor 4010 fra tegninger av Statens Hus

## 4.2 Valg av simuleringsprogram

Ventilasjonsløsningen som skulle modelleres ble introdusert i kapittel 2. Parameterinputen i modellen bruker kontoret i figur 5 som basis. Valget av simuleringsprogram stod mellom EnergyPlus, IDAICE og ESP-r.

Utfordringene knyttet til modellering av en slikt plumbasert tilluftsløsning i et simuleringsprogram er mange. Programmet må være fleksibelt nok eller ha innebygde muligheter til å implementere et plenumkammer som brukes som tilluftskanal. Det må også være mulig å endre måten programmet beregner konveksjonskoeffisienten i plenumskammeret på. Programmet bør også kunne klare å beregne tilluftstemperaturen inn i kontoret etter at tilluften er påvirket av overflatetemperaturene i kammeret. Temperaturutviklingen i de termiske massene og himlingen skal også kunne analyseres. Tidskrittet i simuleringen bør kunne settes tilstrekkelig lavt for å oppnå riktig dynamikk i aluminiumen som har svært høy konduktivitet. Programmet bør også ha muligheter til å analysere både termisk komfort og energibruk.

Valget falt på EnergyPlus fordi det har de fleste av disse mulighetene og det er enkelt å implementere et plenum. Det er også programmet med flest muligheter og fleksibilitet i følge Crawley og Hand som sammenliknet diverse simuleringsprogrammer (Crawley, Hand et al. 2008). Det er i tillegg mulig å sette tidskrittet i simuleringen på 60 sekund.

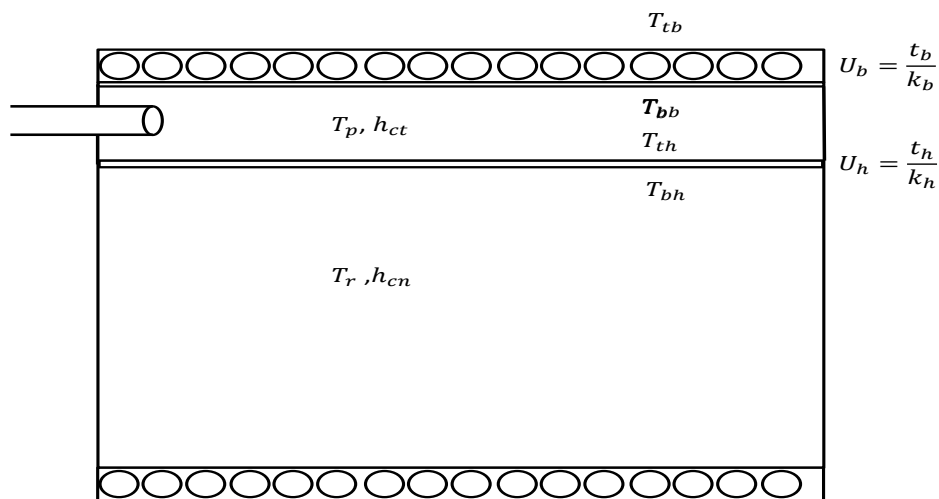
Plenumet modelleres som en sone i EnergyPlus hvor de ulike varmeovergangene kan overvåkes og undersøkes. Det er også gjort lignende studier på plumbaserte systemer som har valgt å bruke EnergyPlus (Lee, Schiavon et al. 2012).

### 4.3 Varmebalanse for kontor

For å sammenligne resultater fra simuleringer ble en enkel matematisk modell utviklet. Denne modellen er basert på en forenklet modell fra ASHRAs studie av varmeoverføringene i UFAD system (Bauman, Jin et al. 2006).

Denne statiske varmebalansen for de ulike flatene i kontoret utelater stråling. Modellen er basert på varmeovergangen mellom plenum og kontor, plenum og betongoverflaten i tak. Her er det to konveksjonskoeffisienter  $h_{cn}$  som er naturlig konveksjon og  $h_{ct}$  som er tvungen konveksjon i plenumskammeret. Det er fire ulike overflatetemperaturer  $T_{bh}$ ,  $T_{th}$ ,  $T_{bb}$  og  $T_{tb}$  som er bunn- og toppemperaturer for henholdsvis himling og betongtaket. Flatene har en tykkelse  $t$  (m) og en konduktivitet  $k$  (mK/W). Det er to lufttemperaturer som er  $T_r$  rom- og  $T_p$  plenumtemperatur. Dette er illustrert i figur 6.

Positiv retning for varmetransporten er oppover.



Figur 6 Varmebalansmodell for plenumsløsning

Varmetransporten mellom nedre flate av himlingen og kontoret vil være avhengig av konveksjon og konduksjon. Konveksjonen blir satt til å være naturlig siden modellen er enkel, men vil i realiteten være tvungen siden luften ut av diffusoren vil kleber til taket (Mathisen and Høseggen 2009). Derfor vil varmetransporten inn i nedre flate av himlingen være avhengig av konveksjonskoeffisient  $h_{cn}$  mellom flaten av rommet og temperaturdifferansen mellom rommet og flaten som grenser mot rommet. Varmetransporten ut av flaten vil være avhengig av

temperaturdifferansen mellom topp og bunn av himling og materialegenskapene til himlingen.

Konveksjon (inn) = konduksjon (ut)

$$h_{cn}(T_r - T_{bh}) = \frac{(T_{bh} - T_{th})}{\frac{t_h}{k_h}} \quad (4.1)$$

Varmebalansen på øvre overflaten av himlingen vil få konduksjon inn fra rommet og tvungen konveksjon ut på oversiden av plenumet. Konduksjon (inn) = konveksjon (ut)

$$\frac{(T_{bh} - T_{th})}{\frac{t_h}{k_h}} = h_{ct}(T_{th} - T_p) \quad (4.2)$$

Bunnen av betongflaten vil ha samme form som ligning 5.1 bare at det er de ulike betongtemperaturene som erstatter himlingstemperaturene. Materialegenskapene vil også endres.

$$h_{ct}(T_{bb} - T_p) = \frac{T_{bb} - T_{tb}}{\frac{t_b}{k_b}} \quad (4.3)$$

Toppen av betongflaten vil ha samme form som ligning 5.2 bare at det er naturlig konveksjon for gulv som gjelder for denne flaten. Materialegenskapene vil også endres.

$$\frac{T_{bb} - T_{tb}}{\frac{t_b}{k_b}} = h_{cng}(T_r - T_{tb}) \quad (4.4)$$

Ved å løse med hensyn til  $T_{th}$  fra ligning 5.1 får man ligning 5.5

$$T_{th} = T_{bh} - \frac{h_{cn}}{U_h}(T_r - T_{bh}) \quad (4.5)$$

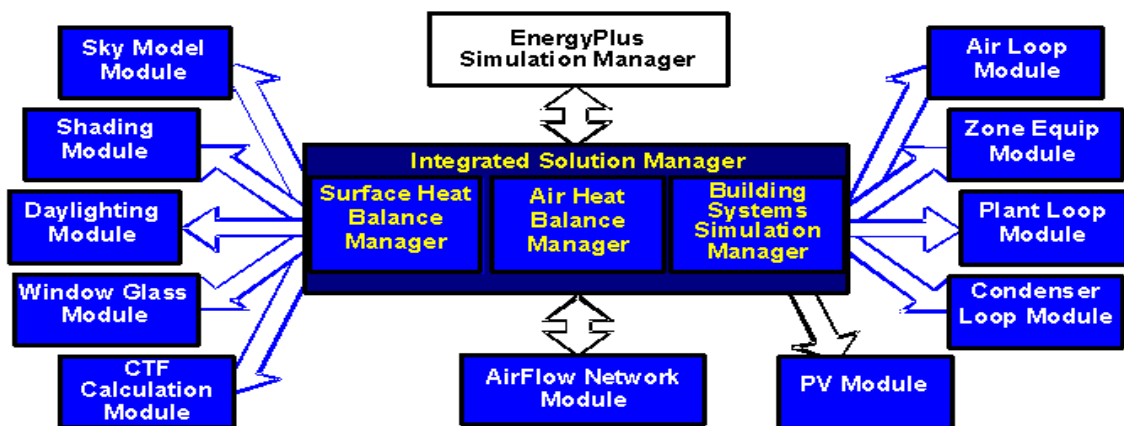
For å finne overflatetemperaturen på undersiden av himlingen bare ved hjelp av konveksjon, konduktivitet, rom- og plenumstemperatur, kan ligning 5.5 bli satt inn i ligning 5.2 for å finne  $T_{bh}$ . Dette gir ligning 5.6 som gir overflatetemperaturen.

$$T_{bh} = T_r \frac{\left(h_{cn} + \frac{h_{ct}h_{cn}}{U_h}\right)}{\left(h_{cn} + h_{ct} + \frac{h_{ct}h_{cn}}{U_h}\right)} + T_p \frac{h_{ct}}{\left(h_{cn} + h_{ct} + \frac{h_{ct}h_{cn}}{U_h}\right)} \quad (4.6)$$

Denne ligningen kan brukes til å predikere himlingstemperaturen til rommet ved hjelp av konveksjonskoeffisient, u-verdi i himlingen og de to lufttemperaturene. Disse verdiene kan EnergyPlus gi og deretter kan de brukes i ligning 5.6 for å sammenligne med himlingstemperaturen som EnergyPlus gir ut.

## 4.4 EnergyPlus

EnergyPlus er et amerikansk simuleringsprogram utviklet av DOE (Department of Energy). Det er et avansert og fleksibelt simuleringsprogram med mange muligheter med hensyn til hva som skal simuleres. EnergyPlus kan brukes til enkle energianalyser med ideelle laster, men kan også brukes til detaljerte analyser av for eksempel enkeltkomponenter, detaljert analyse av enkelt rom, termisk komfort, termisk miljø, naturlig lys osv. Mulighetene er mange i EnergyPlus, og avgrensingene av hva som skal undersøkes må derfor evalueres nøye.



Figur 7 EnergyPlus ulike beregninger

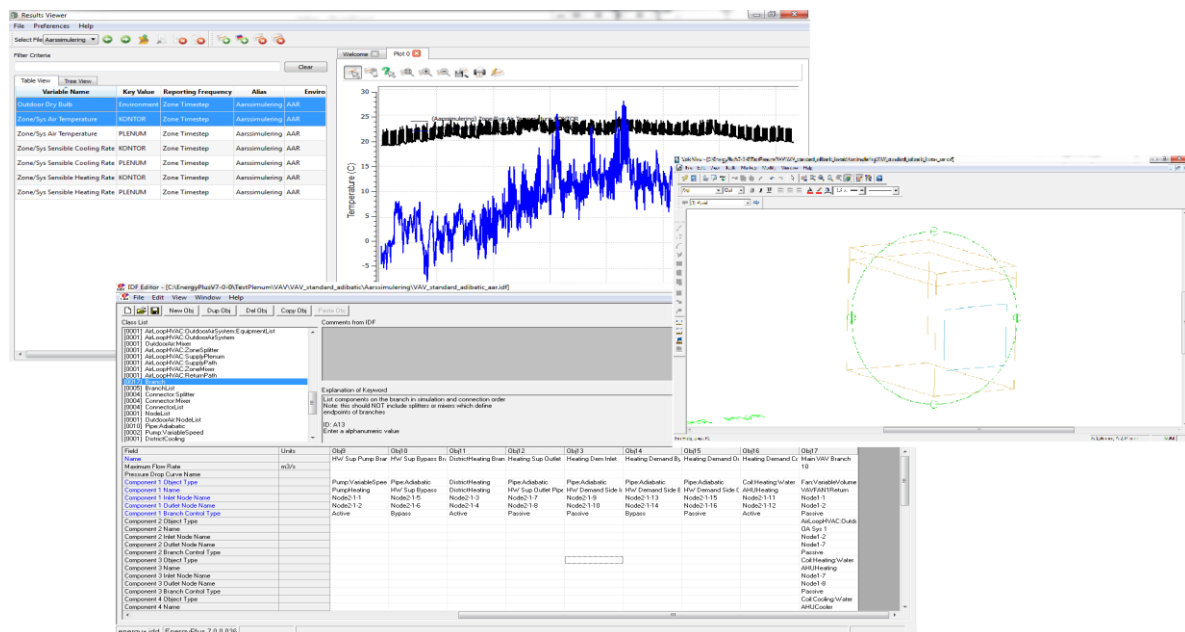
I EnergyPlus er geometrien enkel å sette opp, materialene er enkle å lage og å sette inn. Å konstruere et luftsystem er litt mer komplekst. Dersom man skal ta utgangspunkt i det faktiske systemet møter man på noen utfordringer. Det er derfor vanlig å bruke såkalte «work arounds» for å løse problemer som oppstår. Det er vanskelig å forutsi hvilke problemer som kommer til å oppstå underveis da EnergyPlus krever relativt store inputdata i forhold til hvorvidt en simulering kan kjøres. Modellen må derfor være rimelig komplett før eventuelle feilsøking og «work arounds» kan starte. Dette gjør prosessen med simulering i første omgang til en gamblingssituasjon i forhold til hvordan man velger å løse ulike problemstillinger som ikke har et klart svar i dokumentasjonen eller som er intuitive. Det er lite innebygget hjelp i EnergyPlus som er basert på filosofien GIGO (Garbage In, Garbage Out) og derfor krever hver enkelt implementering stor input i et stort spekter. Det blir på grunn av dette ikke en skrittvis utvikling i første designprosess av modellen (EnergyPlus).

### 4.4.1 Tilleggsprogrammer

Det er flere tilleggsprogrammer som kan brukes sammen med EnergyPlus for å lage modellen, analysere data, og tolke geometrien. Det følger med et grensesnitt for implementering av objekter som skal inn i modellen som heter IDFeditor. Dette programmet er svært enkelt å bruke og har en objekt-orientert struktur. Hver implementering er som en byggekloss som må defineres og plasseres riktig for at EnergyPlus skal forstå sammenhengen og brukes riktig. Det er også mulig å bruke en vanlig teksteditor for å lage modeller, dette er i noen tilfeller enklere, men det gjør prosessen mer uoversiktlig siden det ikke er noe objektorientert struktur på tekstfilen.

Det er muligheter for å konstruere geometri gjennom et tilleggsprogram kalt Openstudio som muliggjør bruken av GoogleSketcup til å tegne geometrien. Geometrien kan også bli definert direkte ved hjelp av koordinatsystem i IDFeditoren. Dersom dette gjøres, kan geometrien undersøkes av programmer som kan tolke SVG-filer som VoloViewer.

Dataanalyse kan gjøres i Excel dersom datamengdene er relativt små. Det er også mulighet for å bruke et analyseprogram som også er en del av Openstudio pakken. Dette programmet kalles ResultWiwer og kan ta inn store datamengder i SQL fil format. Det er et enkelt og praktisk verktøy for analyse av data. Dette er det beste verktøyet å bruke dersom det kun er grafer som skal analyseres.



Figur 8 Bilde av IDFeditor, Resultviewer og VoloViewer

## **4.5 Designprosess**

Første steg i en modelleringsprosess er å starte med en enklest mulig modell. Deretter kan modellen gradvis utvides med hensyn til styring, bruksmønster, ventilasjonsstrategier osv. For å oppnå ønsket kompleksitet i modellen.

For å få en best mulig oversikt over hvordan systemet konstrueres underveis, ble en grafisk tilnærming brukt. Dette er fordi valgene som blir tatt underveis i designprosessen blir synliggjort. Det er en enkel og oversiktlig metode i forhold til å ha kontroll over helheten i systemet. Spesielt i første del av designprosessen er det en god måte å bli kjent med EnergyPlus som programvare. Ved å tegne og skrive underveis i designprosessen tydeliggjøres valgene som blir tatt med hensyn til hvordan systemet blir bygget opp steg for steg. Det vil da også være lettere å holde oversikt over hva som blir implementert i programmet. Spesielt siden EnergyPlus sine kretser og looper er definert av noder. Noder er koblingspunkter mellom ulike komponenter i loopene og kretsene som det skal gjøres beregninger på. I hver node kan det hentes verdier for temperatur, massestrøm, tykk, osv. På grunn av dette vil den grafiske tilnærmingen synliggjøre koblingene og plasseringene til de ulike nodene.

## **4.6 Geometri, materialer og konstruksjoner**

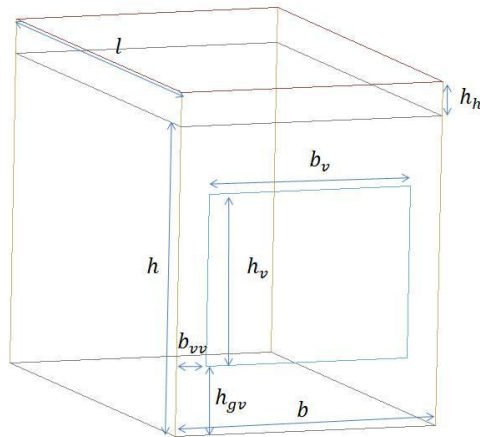
### **4.6.1 Geometri**

Første steg i designprosessen var å sette opp geometrien for kontoret det skulle gjøres simuleringer på. Geometrien må også bli tildelt en sone som det skal gjøres energiberegninger på.

En sone er et volum med gitte grensebetingelser som det skal utføres dynamiske energiberegninger på. Dette innebærer kontinuerlige beregninger av varmeovergangene i sonen som innebærer alt fra konduksjon, stråling, og konveksjon som endres med hvert tidsskritt. Energibalansen til systemet – energi inn og ut av systemet.

I første omgang ble tegneprogrammet Google SketchUp brukt til å definere geometrien. Dette ble linket opp med EnergyPlus ved hjelp av tilleggsprogrammet Openstudio. I konvertering fra SketchUp via Openstudio til EnergyPlus ble det gjort noen omforminger som ikke tjente modellen. Valget falt derfor på å definere geometrien til kontoret direkte i EnergyPlus, siden kontoret som skulle modelleres var enkelt og ikke inneholdt kompleks geometri. Det vil også gi en innsikt i hvordan EnergyPlus definerer og bruker geometrien og vil gi oversikt og mulighet til å definere alt i EnergyPlus.

EnergyPlus bruker et koordinatsystem hvor hver flate har fire punkter og hvert punkt har en bredde, lengde og høyde (x, y, z). Hvert sett av punkter må starte på et forhåndsbestemt punkt ut ifra normalen til flaten. Deretter må punktene bli gitt i rekkefølge etter klokken eller mot klokken.



$l$	4
$b$	2,4
$h$	2,7
$h_v$	1,5
$h_h$	0,3
$h_{gv}$	0,6
$b_v$	1,85
$b_{vv}$	0,275

**Figur 9** Kontorets geometri gjenngitt i VoloViwer

Over er kontoret med de to sonene som er plenumet og selve kontoret.

Når geometrien er gitt, må hver flate få tildelt egenskaper. Dette gjøres ved å konstruere materialer med ulike egenskaper som tykkelse, overflaterøffhet, konduktivitet, tetthet, og spesifikk varmekapasitet. Ved å bruke disse materialene kan det lages konstruksjoner ved å bruke materialene lagvis. Når hver flate har fått en konstruksjon kan man gå videre i designet.



#### 4.6.2 Materialer

Materialene i tabell 3 ble implementert i EnergyPlus og er hentet fra en bok om bygningssimulering fra J.Clarke (Clarke 2001)

**Tabell 3 Implementerte materialer**

Material	Konduktivitet $\lambda \left( \frac{W}{mK} \right)$	Tetthet $\rho \left( \frac{kg}{m^3} \right)$	Spesifikk
			Varmekapasitet $c_p \left( \frac{J}{kgK} \right)$
Aluminium	203	2700	880
Tung betong	1.3	2000	840
Gips	0.16	800	1090
Steinull	0.033	100	710
Ekstrudert polyester	0.035	25	1470
Syntetisk teppe	0.06	160	2500
Glass	1.05	2500	750

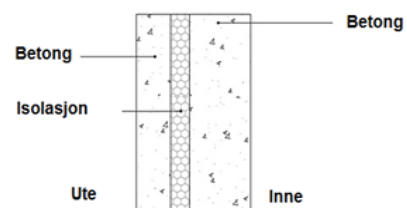
#### 4.6.3 Konstruksjoner

Ved hjelp av disse materialene kan diverse vegger bli bygget opp lagvis. Det er greit å bruke enkle beregninger for å oppnå ønsket U-verdi på veggene i forhold til diverse tykkelser på de ulike materialene. EnergyPlus vil kunne gi U-verdien når modellen simuleres.

##### Yttervegger

Ytterveggen i Statens Hus er sandwichelementer med stein på fasaden av estetiske grunner

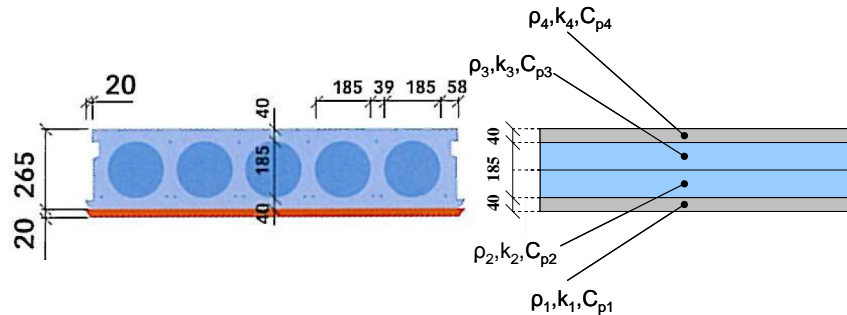
Material	Tykkelse	$R \left( \frac{m^2K}{W} \right)$	U-verdi $\left( \frac{W}{m^2K} \right)$
Betong	80mm	0.062	
Ekstrudert polyester	190mm	5.43	
Betong	80mm	0.062	
Sum	350mm	5.55	0.18



**Figur 10 Sandwich element**

## Hulldekket

Statens Hus har gulv som er hulldekkeelementer med teppe på gulvene. For å konstruere disse ble en forenkling av termiske egenskaper brukt for å unngå varmeoverføring med hensyn til hullene i dekket. Dette påvirker også magasineringsvevne i dekket. Derfor ble en modell utviklet av COIN for realistisk modellering av denne typen dekke. Dette er samme modell som er brukt i rapport om Statens Hus (Mathisen and Høseggen 2011). Dette er en 4 noders modell med ulik konduktivitet og tetthet på de 2 ulike lagene.



Figur 11 Tegning av Rasmus Z. Høseggen (Mathisen and Høseggen 2011)

Tabell 4 Materiale egenskaper hulldekket

Material	Konduktivitet $\lambda \left( \frac{W}{mK} \right)$	Tetthet $\rho \left( \frac{kg}{m^3} \right)$	Spesifikk	
			Varmekapasitet $c_p \left( \frac{J}{kgK} \right)$	Tykkelse $d \text{ (mm)}$
Betong	1.8	2350	1050	40
Hulldekke	0.45	1050	1050	92.5
Hulldekke	0.45	1050	1050	92.5
Betong	1.8	2350	1050	40

Det ble også lagt et 5 mm teppe på gulvet i kontoret.

### ***Innervegger***

Innerveggene er skillevegger som i hovedsak skal skille rom. Hovedfunksjonen er å skille kontorer og dempe eventuelle lydoverføringer mellom kontorer. Disse materialene har nesten ingen termisk lagring..

**Tabell 5 Skillevegg tykkelser**

Material	Tykkelse
Gips	15mm
Isolasjon	68mm
Gips	15mm

Innerveggene ble satt til å være adiabatisk. Det vil si at temperaturforløpet er likt på den andre siden av veggen. Alternativet er at veggen grenser til utendørs. At to kontorer som grenser til hverandre har akkurat samme bruksmønster og temperaturforløp er ikke realistisk, men er det beste alternative for en enkel kontormodell.

### ***Himling***

Aluminiumshimlingen er svært tynn med 1mm aluminium med en tynn akustisk duk på oversiden. Materialeegenskaper til duken var det vanskelig å finne noen konkrete data for, derfor ble det bare tatt utgangspunkt i at denne har de samme egenskapene som isolasjon.

Det ble også konstruert standard himlingsplater av 50mm isolasjon for å undersøke et mer standard himlingsmateriale.

### ***Vindu***

Vinduene i Statens Hus er levert av leverandøren Pilkington og er et to-lags glass med Aragon fylling med et solavskjermende glass med U-verdi 1,2 som heter Suncool.

EnergyPlus krever relativt store datamengder for å modellere vindu på en riktig måte. Dataene er mer detaljerte enn databladet til Pilkington på vinduet. Derfor brukes dataen fra simuleringsrapport gjort av Sintef for Energi&miljø (Mathisen and Høseggen 2011). Symbolet f står for foran og er innsiden av glasset mot rommet, og b står for bak og er baksiden av glasset.

**Tabell 6 Inputverdi for glassene i EnergyPlus**

	Lys			Solenergi						Fysisk		
	Transmisjon	Refleksjon		Transmisjon	Refleksjon		Infrarød	Transmisjon	Emissivitet		Tykkelse	Konduktivitet
		f	b		f	b			f	b		
Utside glass	0.297	0.536	0.447	0.537	0.26	0.356	0	0.034	0.836	5.9	1	
Aragon										16		
Innside glass	0.0747	0.12	0.112	0.825	0.151	0.147	0	0.833	0.84	5.6	0.01375*	

\*Måtte settes svært lavt for at EnergyPlus skulle gi riktig U-verdi på 1,2 på vinduet

## 4.7 Indre og ytre laster og inneklimate

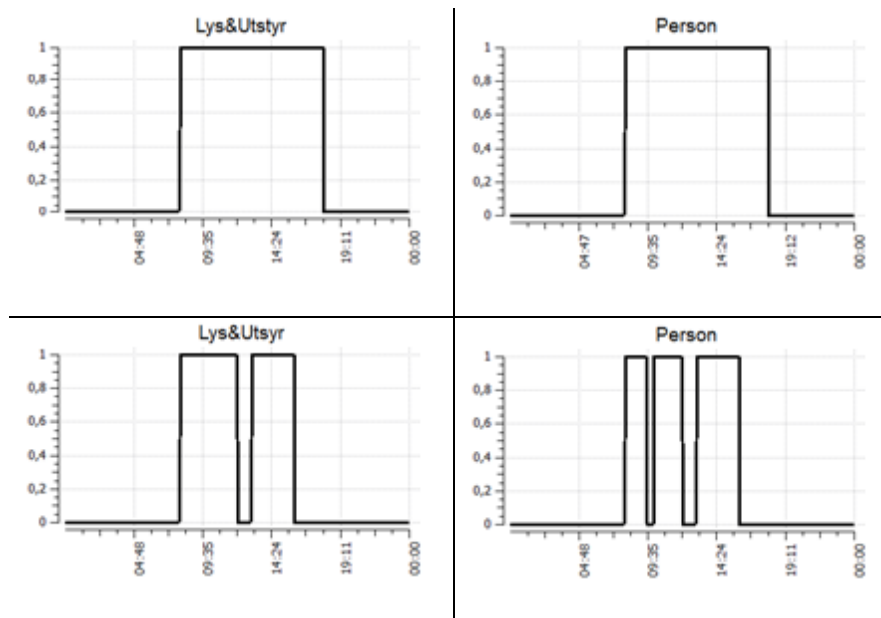
### 4.7.1 Indre laster

Interne laster er viktig for modellen med hensyn til hvor mye oppvarming kontoret trenger i løpet av driftstiden. I moderne bygg vil også tilstedeværelsen være avgjørende for om utstyr og lys blir skrudd av, og modellen må derfor knyttes opp til en «schedule» som angir når lastene er på eller av.

Tabell 7 Interne laster

Last	Lys	Utstyr	Person
Effekt ( $\frac{W}{m^2}$ )	8	11	10

Det ble brukt to ulike bruksmønstre for de interne lastene. Begge er litt ekstreme siden de har 100 % tilstedeværelse når kontoret er i drift. Den første tilstedeværelsen har en konstant tilstedeværelse over hele arbeidsdagen mens det i den andre ble det lagt inn en liten pause fra kl 09:00-09:30 hvor utstyret ikke får tid til å slås av og en lunsjpause fra kl 12:00-13:00. Begge disse bruksmønstrene er ikke veldig realistiske siden det vanligvis er mer aktivitet for en bruker av kontoret.

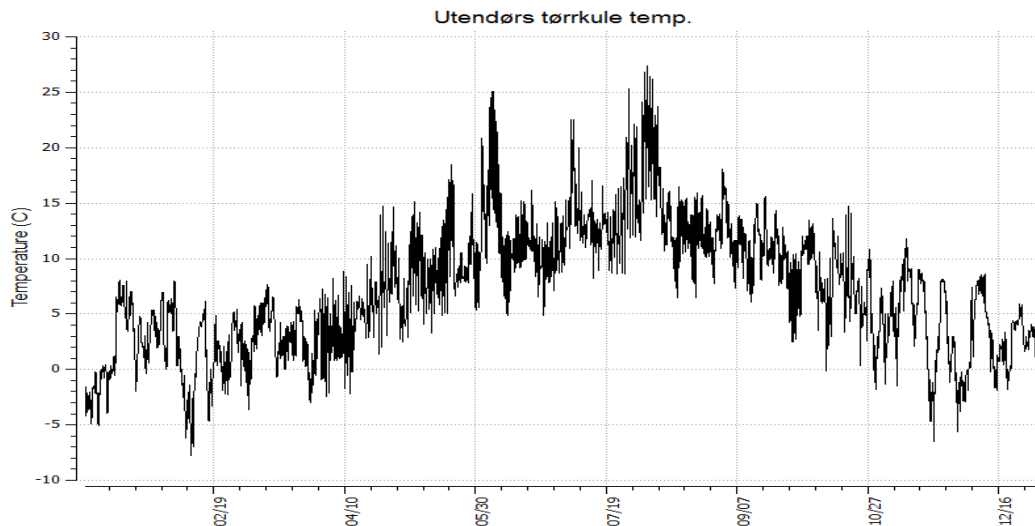


Figur 12 Interne laster aktive fra 8:00-18:00

Lastene i kontoret var aktive fra 8:00-18:00 alle hverdagene i året.

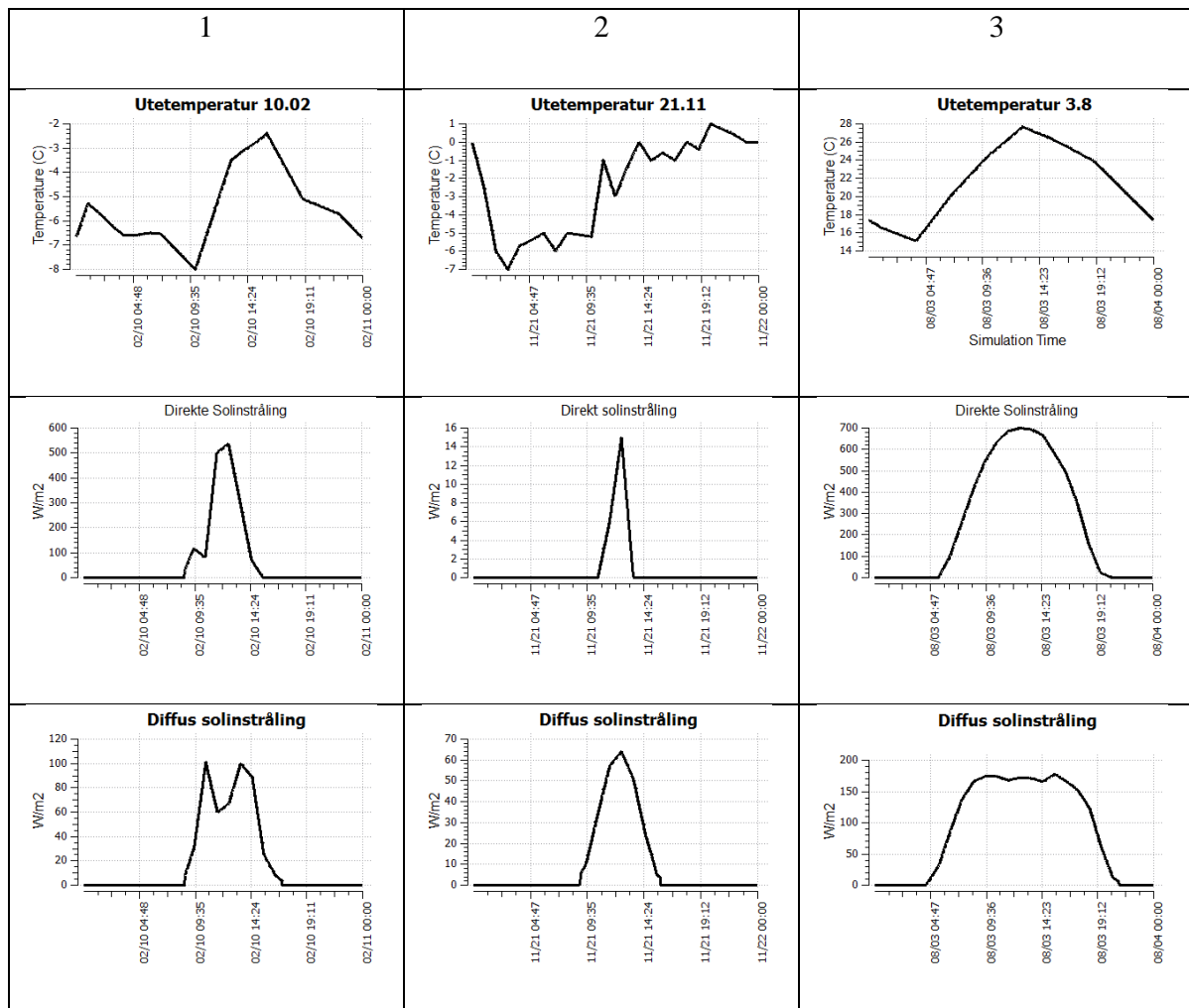
#### 4.7.2 Ytre laster - værdata

Referanseklimaet er fra Bergen da det ikke fantes klimadata fra Stavanger. Alternativet var Oslo, men Bergen har et klima som er mye mer sammenlignbart med Stavanger. Figur 13 viser utendørstemperaturen over året for Bergen som er i ASHRAE formatet IWEC (International Weather for Energy Calculations). Dette formatet er tolv typiske metrologiske måneder som representerer et gjennomsnittsklima over de siste 18 årene (1982-1999). Dataene er timesverdier fra DATSAV3-databasen som er samlet inn av National Climatic Data Center



Figur 13 Værdata verdier

Systemene blir også analysert ved tre ulike dager med forskjellige ytre påvirkninger. Det ble derfor valgt tre dager som representerer ekstreme dagsklima i klimadataene. Disse er: 1) kaldeste dagen i året men med et stort soltilskudd 2) en kald dag uten noe stort soltilskudd og 3) varmeste sommerdag. De ulike klimapåvirkningene er vist i tabellen med figurer under for de tre ulike dagene.



Figur 14 Temperatur, direkte og diffus solinnstråling 2.feb, 21.nov og 3.aug

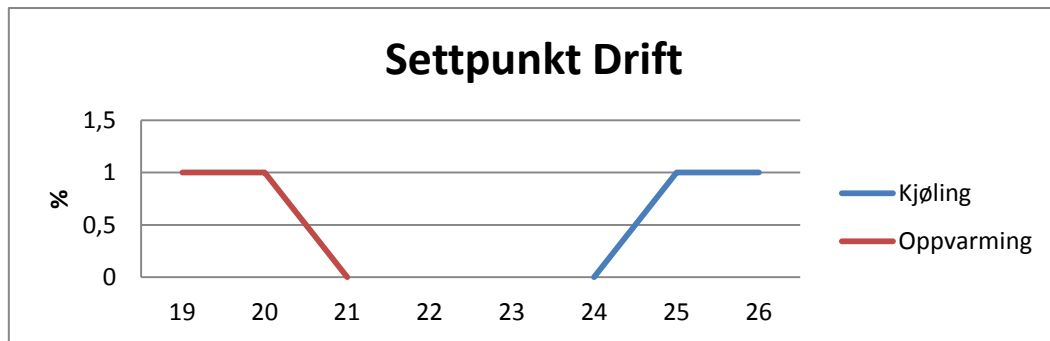
#### 4.7.3 Sonenivå

Det som tjener sonen direkte er luft- og oppvarmingssystemet som vil prøve å nå settpunkt med tilgjengelig kapasitet på ovner, varme- og kjølebatterier. Det er også mulighet for å implementere ulike komponenter i diffusoren som er koblet til sonen den betjener. Det kan være spjeld med eller uten lokalt kjøle- eller varmebatteri. Denne komponenten bestemmer også hvorvidt det er et CAV- eller VAV-system og hvordan det styres.

Det må også implementeres et oppvarmingssystem som tjener sonen. Dette kan være ulike typer ovner eller radiatorer. Disse vil betjene sonen for å holde settpunkt.

Settpunkt i rommet i driftstid (06:00-18:00) er satt til 21°C for oppvarming og 24°C på kjølingssiden fordi dette er det optimale temperaturintervallet for en termisk komfort som spesielt fremmer produktivitet (Seppanen, Fisk et al. 2006). Disse settpunktene skal kunne klare å holde den operative temperaturen mellom 21-24°C på vinterstid og mellom 23-26°C på sommerstid,

som er grensene for at det er mindre enn 10 % som er misfornøyde med den termiske komforten (Nilsson 2003) – dette er illustrert i figur 13 under. Nattsenkning er satt til 19°C fordi det ikke vil lønne seg med et lavere settpunkt siden bygget er relativt tungt (Aschehoug, Aune et al. 2007 ).



Figur 15 Driftsstrategi oppvarming og kjøling

#### 4.7.4 Luft

Det er ulike komponenter som kan implementeres fra EnergyPlus. Disse vil oppføre seg på forskjellige måter for å møte kjøle- og oppvarmingsbehovet i sonen.

Det ble i denne modellen brukt en standard VAV-løsning for modellen uten varmluftsoppvarming som vil øke luftmengdene når det er et kjølebehov i rommet.

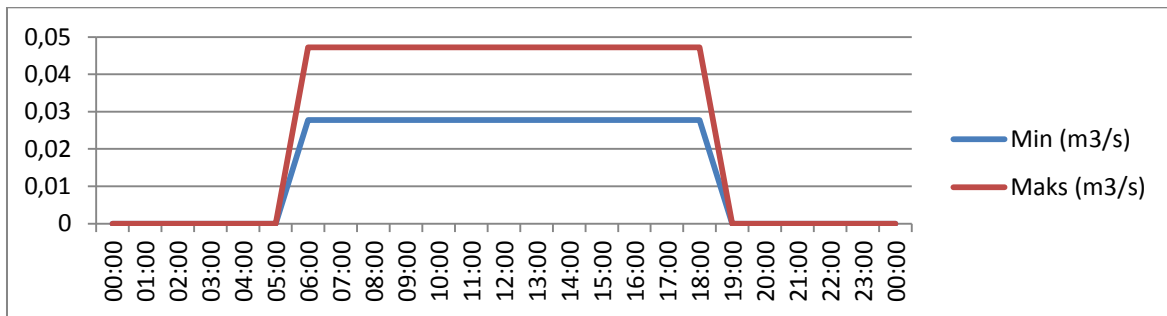
For varmluftsoppvarming ble det implementert en VAV-løsning som både økte tilluftstemperaturen og luftmengden for å nå settpunkt i sonen fra 06:00-08:00. Denne driftstiden ble satt for å unngå mest mulig bruk av viftene som er en stor bidragsyter i energibruken. I samtaler med Energi&miljø som ønsket å undersøke varmluftsoppvarming anbefalte de også en slik strategi (Holm 2012). Dersom varmluftsoppvarmingen viser seg å være gunstig skal dette driftsintervallet gradvis utvides for å finne en optimal drift for en slik oppvarmingsstrategi.

Tabell 8 EnergyPlus komponent implementert

Ventilasjon	EnergyPlus Komponent
Standard VAV	AirTerminal:SingelDuct:VAV:NoReheat
VAV med varmluft	AirTerminal:SingelDuct:VAV:HeatAndCool:NoReheat



Luftmengdene ble satt til 10-17 m<sup>3</sup>/ hm<sup>2</sup> i driftstid utenfor helg fordi den anbefalte spesifikke luftmengden fra NS 3031 er på 10m<sup>3</sup>/ hm<sup>2</sup>, de resterende 7m<sup>3</sup>/ hm<sup>2</sup> blir brukt til kjøling. Dette vil også føre til en god luftkvalitet i kontoret med en PPD på mindre enn 20 %, som vil si at mindre enn 20 % vil være misfornøyde under disse forholdene (NS-EN15251 2007). I figur 14 er verdiene gitt i  $\frac{m^3}{s}$

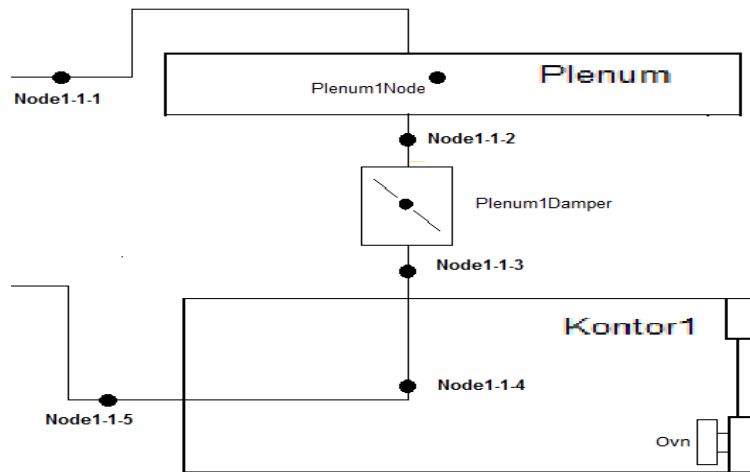


Figur 16 Drift minimum og maksimum luftmengde med hensyn til driftstid

Tilluftstemperaturen er satt til 19°C på vinterstid (1.jan – 15.mai og 15.sep- 31.des), og 17°C på sommertid (15.mai – 15.sep). Vintertemperaturen ble satt til denne verdien fordi det er en typisk tilluftstemperatur i oppvarmingsmånedene (Thyholt, Lien et al. 2001). Sommertemperaturen er satt til denne verdien slik at lufthastighetene ikke skal overstige 0,25 m/s i oppholdssonen og minimums tilluftstemperatur er 16°C for omrøringsventilasjon (Tjelflaaten 2011).

Systemet er også koblet til et plenum som er modellert som en separat sone. Som figur 17 viser er VAV-ventilen plassert etter plenumet som det i realiteten ikke er. Dette er den eneste måten det er mulig å modellere et slikt system på i EnergyPlus.

Plenums- og kontorsonen er koblet sammen av himlingen og vil føre til varmeutveksling mellom de to sonene. Dette vises ikke på figuren da den viser hvordan de ulike nodene på sonenivå henger sammen.



Figur 17 Kontor illustrert fra EnergyPlus perspetiv

## 4.8 Installasjoner

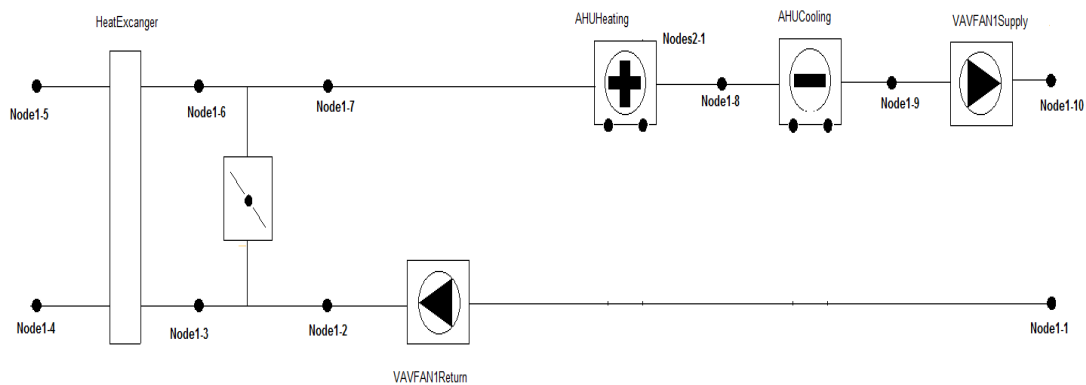
### 4.8.1 Varmeovn

Det ble også modellert inn en elektrisk ovn med en effekt på 250W i sonen, i det virkelige kontoret er det et vannbasert radiatorsystem. Grunnen til at en elektrisk ovn ble modellert istedenfor var på grunn at et vannbasert system krever mer implementering enn en elektrisk ovn og vil gi samme effekt som et vannbasert system.

### 4.8.2 Sentralt luftanlegg

I Statens Hus er det i realiteten 4 store sentrale aggregater med store kapasiteter som tjener hver sin del av bygningen. Varme- og kjølebatteriene er forsynt med fjernvarme og fjernkjøling. Siden denne modellen kun er for et enkelt kontor kan ikke de virkelige størrelsene på de ulike komponentene bli implementert. Alt må skaleres ned for gi realistiske resultater i forhold til hvordan det virkelige systemet ville respondert. Det må også implementeres en omluftsmulighet fordi dette er en innbygget funksjonalitet i EnergyPlus. Det er mulighet for koble denne komponenteten ut, noe som ble gjort i alle casene uten varmluftoppvarming. I varmluftoppvarmingen ble en omluftstrategi implementert.

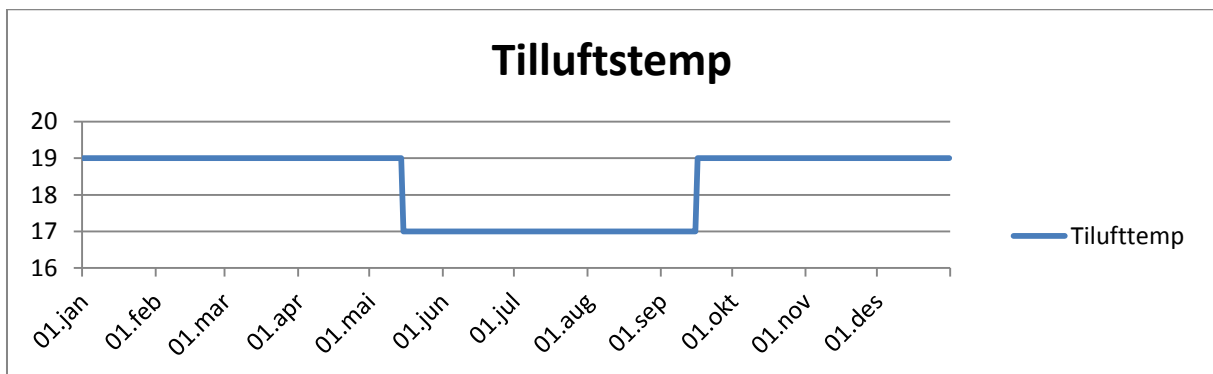
De ulike komponentene i et sentralt aggregat er vifter, varmegjenvinner, varme- og kjølebatteri.



Figur 18 Sentralt lufteanlegg sett fra EnergyPlus perspetiv

### 4.8.3 Varme- og kjølebatteri

Varme- og kjølebatteriet som ble implementert er tilkoblet fjernvarme og fjernkjøling. Disse styres av tilluftstemperaturen etter viften i tilluftskanalen. Settpunktet for tilluftstemperaturen er satt til 19°C/17°C i vinter- og sommerdrift. Temperaturstyringen på varme- og kjølebatteriet må også ta hensyn til temperaturøkningen viften gir.



Figur 19 Driftstemperatur sommer og vinter

#### 4.8.4 Vifter

To variable luftmengdevifter ble implementert i modellen med utgangspunkt i SFP.

$$SFP = \frac{\sum P_{vifter}}{\dot{V}} = 2kW/(m^3/s) \quad (4.7)$$

SFP kan også forenklet uttrykkes ved hjelp av trykkfallet  $\Delta p$  over viften og effektiviteten  $\eta_{tot}$  til viftene (Aschehoug, Aune et al. 2007).

$$SFP = \frac{\Delta p}{\eta_{tot}} \quad (4.8)$$

EnergyPlus har to verdier som kan settes, det er trykkfallet  $\Delta p$  over viften og effektiviteten  $\eta_{tot}$  til viften. Effektiviteten ble satt til 80 % og ut ifra dette kan trykkfallet fordelt over de to viftene finnes ved hjelp av ligningen

$$\Delta p = SFP \cdot \eta = 2000 \cdot 0,8 = 1600Pa \quad (4.9)$$

Motorene ble plassert i luftstrømmen, dette vil bidra til å løfte tilluftstemperaturen og må tas hensyn til i forhold til varme- og kjølebatteriets settpunkttemperaturer. Det ble antatt at vifteeffekten er lineær i forhold til luftmengden  $\dot{V}$ . I realiteten vil viftene ikke være ideelle og vil ha en effektivitet som varierer med luftmengden da viften vil operere ved del-last (Nilsson 2003). Det er muligheter for å implementere en slik del-last kurver men siden det er kun et kontor og luftmengdene er relativt små ble det ikke gjort. Viften er satt til å operere mellom 6:00-18:00 i hverdagene.

Energi fra viften til luftstrømmen blir beregnet ut ifra effektiviteten til motoren gitt at motoren er i luftstrømmen

$$\dot{Q}_{til-luft} = \dot{Q}_{vifte} = \frac{e_{motor} \dot{V} \Delta p}{\eta_{tot}} \quad (4.10)$$

I EnergyPlus blir det også tatt hensyn til luftens entalpi og fuktighet. Ved hjelp av det psykrometriske diagrammet blir dette tatt hensyn til av en subrutine i EnergyPlus.

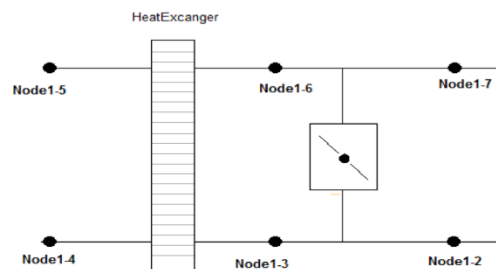
#### 4.8.5 OutdoorAirMixer

OutdoorAirMixer komponenten i EnergyPlus må implementeres for at luftsystemet skal kunne ta inn friskluft fra utendørsluften. I praksis brukes et omluftssjeld som blir ofte kalt «economizer» og er vanlige å bruke i amerikanske ventilasjonsanlegg (Nilsson 2003). Det er mulighet for å

deaktivere omluftmuligheten som ble implementert på modellene uten varmluftsoppvarming. I modellene med varmluftsoppvarming ble en omluftsstrategi fra 06:00-8:00 implementert.

#### 4.8.6 Varmegjenvinner

En varmegjenvinner må kobles til før omluftspjeldet. Varmegjenvinneren er av typen roterende, og virkningsgraden ble satt til å være konstant på 80 %. Det ble ikke implementert noe frostkontroll eller strategi for avfrysning.



Figur 20 Varmegjenvinner og omluftspjeld i OutdoorAirSystem

#### 4.8.7 AirLoop

Når alt er definert på sonenivå, alle komponenter er definert i det sentrale luftsystem, må alt kobles sammen ved hjelp av noder som til slutt vil danne en krets eller loop som EnergyPlus kan gjøres beregninger på. Airloopen er basert på at det sentrale luftsystemet produserer luften mens sonen forbruker luften. Her er det viktig å skille mellom nodene i det sentrale luftanlegget, transportnodene, og nodene på sonenivå.

Dette kan være en tidskrevende prosess dersom man ikke forstår hvordan EnergyPlus «tenker». Her er det regler for plassering av de ulike komponentene og nodene i forhold til hverandre for at programmet skal kunne utføre simuleringen. Hvordan man skal koble sammen ulike deler av systemet er ikke alltid like klart i dokumentasjonen.

Et eksempel på dette er plassering av vifter i loopen. Avkastviften skal vanligvis plasseres etter gjenvinner for å oppnå best trykkfall over gjenvinneren (Aschehoug, Aune et al. 2007). Dette er imidlertid ikke mulig i EnergyPlus på grunn subsystemet «OutdoorAirSystem» som tar seg av friskluftstilførselen og som består av omluftspjeldet og varmegjenvinneren. Årsaken til dette er at EnergyPlus må ha en loop å gjøre beregninger på, dersom det ikke hadde vært denne typen subsystem hadde den eneste mulig måten for å opprettholde loopen på vært å sende avkastluften

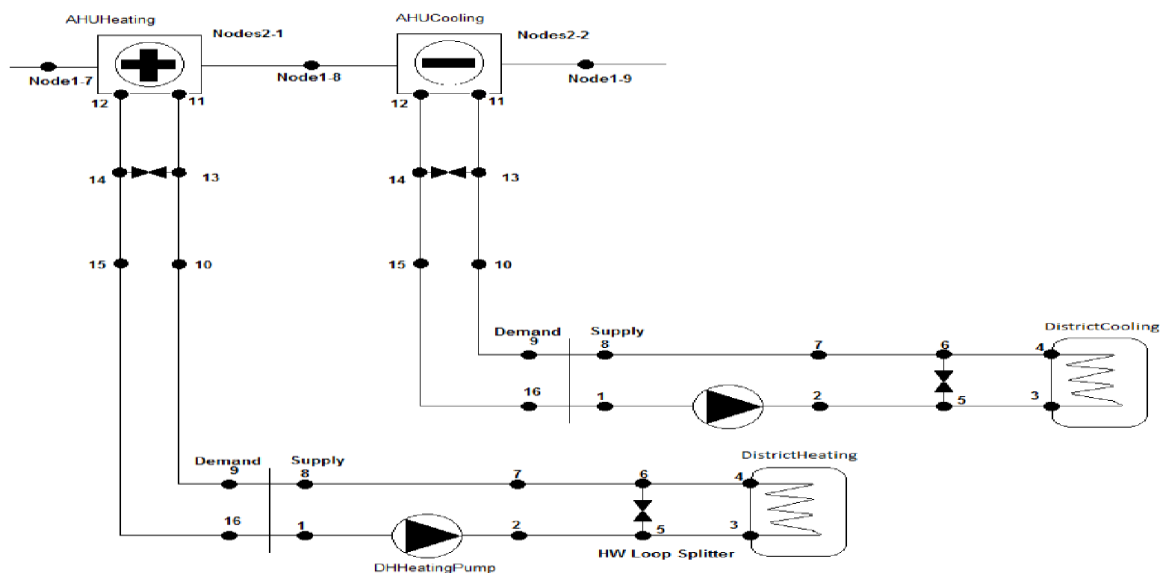
direkte inn i tilluften. Dette har ingen konsekvenser utenom at viften må plasseres før OutdoorAirMixer komponenten.

#### 4.8.8 Fjernvarme/kjøling

Varmebatteriene er koblet på to ulike vannkretser som henholdsvis er tilkoblet fjernvarme og fjernkjøling med store kapasiteter til å dekke kjøle- og oppvarmingsbehovet. I disse kretsene må nodene modelleres korrekt for at systemet skal kunne simuleres.

#### 4.8.9 Vannkretser

Vannkretsene blir bygget opp på samme måte som luftloopen men krever flere «deler» men trenger ingen subsystem siden det er en fullstendig loop. Her må hvert rør være modellert og deretter kan man koble sammen alle de ulike komponentene. Det er også enklest å modellere inn to "bypasser" på begge sider av kretsen. Dette vil føre til at det er større sannsynlighet for at systemet skal kunne kjøre.



Figur 21 Varme- og kjølebatteri med tilhørende fjernvarme og fjernkjøling krets

#### 4.8.10 Pumper

Pumper skal alltid modelleres på forsyningsiden ifølge EnergyPlus. I pumpekomponentene i EnergyPlus må tre verdier bli satt: trykket over pumpen, vannmengden og effektiviteten.

#### 4.8.11 Sammenligning til TEK

Sammenligning av verdier fra Statens Hus mot verdier fra Tek 07 og Tek 10.

Tabell 9 Tabell over krav TEK07, 10 og verdier for Statens hus

U-verdier	Tek 07	Tek 10	Statens Hus Modell
Yttervegger [W/m <sup>2</sup> K]	0,18	0,18	0,18
Tak [W/m <sup>2</sup> K]	0,13	0,13	*
Gulv [W/m <sup>2</sup> K]	0,15	0,15	*
Vindu [W/m <sup>2</sup> K]	1,2	1,2	1,2
Vindusareal [% BRA]	20	20	30**
Kuldebroer [W/m <sup>2</sup> K]	0,06	0,06	***
Lekkasjetall [h <sup>-1</sup> ]	1,5	1,5	1,5
Virkningsgrad Gjenvinner[%]	70	80	80
SFP [kW/m <sup>3</sup> ]	2	2	2

\*Tak og gulv grenser begge til en identisk sone

\*\*Kun et kontor som simuleres derfor blir denne verdien høy

\*\*\*Kuldebroer blir ikke modellert

## **4.9 Varmebalansemetode, konveksjon og utfordringer**

### **4.9.1 Valg av varmebalansemetode**

Valget av varmebalanse metode er et svært viktig valg, spesielt i forhold til hvordan termiske masser blir tatt med i beregningen og hvorvidt temperaturer innover i materialene skal undersøkes. Det ble derfor valgt en CondFD (Conduction Finite Difference) metode som gir muligheten til dette. Denne metoden er basert på å dele alle materialene i et visst antall noder og gjøre varmebalanse på disse. Det er muligheter for å sette og bestemme antall noder og andre faktorer for at løsningene på varmebalansene skal konvergere.

Konvergens var et problem med den tynne aluminiumshimlingen siden konduktiviteten er svært høy og tidskrittet i EnergyPlus ikke kan settes lavere enn 60s. Dette medførte at temperaturene i himlingen ikke klarte å svinge seg inn til konstante verdier. Det ble derfor satt noen verdier på antall noder, en dempningsfaktor og et konvergensintervall ble satt. Dette førte til stabile temperaturer i himlingen, men det gav dessverre også aluminiumshimlingen uheldige temperaturresponser.

### **4.9.2 Konveksjon**

Konveksjonskoeffisienten i modellen ble satt til å bli beregnet ut i fra Fischer-perdersen som er beskrevet i kapittel 3.2.2. Den vil ikke ta hensyn til plasseringen av tilluftskanalen i plenumet og vil anta at den sitter i taket. Dette vil føre til at konveksjonskoeffisient i plenumstaket blir høy, og koeffisient i himlingsoverflaten i plenumet blir lav. Begge vil trolig derfor ikke være helt korrekte på grunn av dette, men det er den beste tilnærmingen tilgjengelig i EnergyPlus.

### **4.9.3 Utfordringer med EnergyPlus underveis**

Det er flere utfordringer knyttet til å ta i bruk et avansert simuleringsprogram. For å kunne bruke et slikt verktøy er det viktig å forstå hvordan programmet «tenker» og hvordan en modell skal bygges opp fra grunnen av. Det første steget for å bli kjent med en programvare, er å lese dokumentasjon og undersøke andre modeller. Det følger med en pakke med filer i EnergyPlus som er eksempler på ulike systemer og løsninger. Disse filene kalles "Examplefiles" og er en god måte å tilnærme seg oppbygningen av diverse typer løsninger på, samt bygge forståelse for programmet.



EnergyPlus har ufattelig mange valgmuligheter. Det kan gjøres veldig grove, simuleringer eller det kan gjøres svært detaljerte simuleringer. Programmet skal kunne klare å tilnærme seg virkeligheten med stor nøyaktighet. En konsekvens av dette er detaljrikdommen i programmet og det vil derfor kreve mye av brukeren når simuleringer skal gjøres. På grunn av dette er dokumentasjonen i EnergyPlus stor og relativt uoversiktlig ved første øyekast. Dokumentasjonen mangler en helt grunnleggende designprosessoppskrift og kan tidvis være preget av å være skrevet av mange ulike personer som har jobbet med å utvikle EnergyPlus. Men etter hvert som kunnskapen øker vil dokumentasjonen bli mer til hjelp.

Utviklingene av disse modellene har vært en trappetrinnsprosess hvor hvert steg opp har blitt møtt av nye problemer og utfordringer. Derfor er det viktig å jobbe strukturert og bryte ned gradvis de problemene som oppstår.

Den første store utfordringen som kom i designprosessen var å koble sammen noder i luft- og vannloopene. Det er ikke alltid designet blir identisk virkeligheten, siden det er regler for hvor komponenter kan plasseres i loopene og nodene må være korrekt koblet for at programmet skal kunne simulere. Fremgangsmåten var da å tallfeste nodene slik at det var en oversiktlig å se rekkefølgene på nodene som ble innført. Lignede systemer i Example-filene ble brukt som referanse og ved å se på enkeltkomponenter plassering der kunne det deretter implementeres riktig i modellen som skulle utvikles.

Det var også problemer med å designe plenumet siden det ikke var mulig å sette tilluftsventilen inn i plenumet, men måtte plasseres etter plenumet. I tillegg var det problemer med temperaturresponsen i aluminiumshimlingen som ikke oppførte seg slik den burde.

Det var muligheter for å implementere et plenum, men hvordan en plenumsløsning som ikke var et UFAD ville respondere, var også et usikkerhetsmoment.

## 5 Simuleringer

For å undersøke varmluftsoppvarming i en plenumbasert ventilasjonsløsning måtte det utvikles en modell med konvensjonell oppvarming først, dette fordi varmluftsoppvarming ikke kan evalueres uten et sammenligningsgrunnlag. Det ble også gjort endringer på kontoret for å evaluere effekten av himlingsmateriale og termisk nedbryting i plenumskammeret.

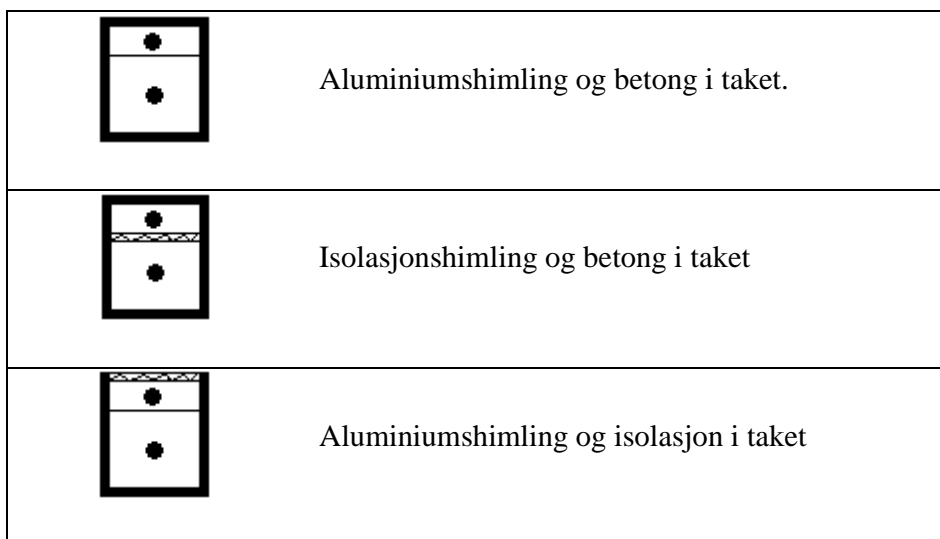
### 5.1 Konvensjonell oppvarming

Det som er unikt med ventilasjonsløsningen er bruken av et plenumskammer. Plenumet har eksponerte termiske masser i taket og himlingsplatene er laget av aluminium. Disse elementene gjør systemet til en annerledes måte å ventilere på. Ved stegvis eliminasjon av det som skiller systemet fra konvensjonell ventilasjon/oppvarming, kan systemet bli sammenlignet med andre typer løsninger.

Ved å endre materialet i himlingen kan varmeoverføringen mellom plenumet og kontoret bli evaluert. Det ble derfor valgt å undersøke hvilke konsekvenser et slikt plenumbasert system ville ha dersom normale standard himlingsplater av isolasjonsmateriale ble brukt istedenfor aluminiumen. Dette ville skille de to luftvolumene fra hverandre og minimere varmeoverføringen mellom dem. Ved å sammenligne disse kan bruken av aluminium som himlingsmateriale undersøkes nærmere. Dette vil også føre til at den termiske massen i taket ikke lenger er eksponert mot rommet og en temperaturstigning vil trolig skje hurtigere. Den termiske nedbrytingen mellom betongen i taket og tilluftstemperaturen vil fortsatt forekomme og kan evalueres.

Ved å legge isolasjon i taket vil varmeoverføringen fra plenumet og betongen i taket bli minimert. Da kan både den termiske nedbrytingen bli evaluert og effekten av den eksponerte betongen i taket bli evaluert. Isolasjonsmaterialets egenskaper vil medføre en svært hurtig endring av overflatetemperatur siden den har lav effusivitet og diffusivitet. Dette vil da medføre at det ikke er noe treghet i materialet og at tilluftstemperaturen til kontoret vil endres hurtig. Dette vil også føre til at den termiske massen i taket ikke lenger blir eksponert mot rommet og temperaturresponsen i rommet vil skje hurtigere. Isolasjonen i taket vil også minimere effekten av en nattventilasjonsstrategi. Denne modellen kan med forbehold også representere et kontor med standard isolasjons himling med tilluftsventilen koblet direkte til himlingen. Siden aluminiumen har så høy konduktivitet vil den i praksis være «usynlig».

For å skille enkelt mellom de ulike systemene brukes det enkle figurer som kan ses under. Figuren representerer kontoret med plenum, og prikken representerer temperaturmålere



Figur 22 Illustrasjoner av de ulike plasseringene av isolasjon

I et VAV-system kan man enkelt se hvordan luftmengdene til de ulike oppsettene vil endres.

Sentrale spørsmål rundt de ulike løsningene:

- Hvor stor påvirkning har materialet i himlingen?
- Hvor stor effekt har den eksponerte betongen i taket på tilluftstemperaturen til kontoret?
- Hvordan påvirkes varmeoverføringen mellom kontoret og plenumet med hensyn til himlingsmateriale og overflatetemperaturer?
- Hvilken løsning vil komme best ut med hensyn til energibruk?

Kontoret ble først undersøkt med en konstant tilstedeværelse (vist i figur 12 i kapittel 4.6.), noe som vil gi det enkleste resultatet å analysere. Når disse analysene er gjort kan en mer realistisk tilstedeværelse bli implementert for å skape en mer dynamisk simulering.

Ved dette enkle oppsettet kan termisk komfort analyseres for de enkelte dagene, noe som vil sette systemet på prøve. Her kan temperaturresponsene og hvorvidt systemet klarer å holde seg innenfor settpunkt-verdiene bli analysert. Effektbehovet på de kalde dagene kan enkelt bli evaluert opp mot hverandre for de ulike oppsettene.

Energibruken kan enkelt evalueres for de ulike løsningene. Her vil det spesielt være energibruken til oppvarming og viftebruk som er interessant. Kjøling er også interessant å se på, men er ikke veldig relevant for denne oppgaven da ingen nattventilasjon blir implementert. Kjølebehovet vil derfor trolig være noe høyt, men det vil også kunne trekkes noen konklusjoner for hvilket system som utnytter den termiske massen mest effektivt. Dette må derfor tas hensyn til når energibruken til kjøling blir sammenlignet.

## 5.2 Varmluftoppvarming

Varmluftoppvarmingen ble et ekstra varmebatteri med en effekt på 750W, koblet til etter viften på forsyningssiden av luftloopen. I realiteten vil oppvarmingen skje i det sentrale varmebatteriet, men av praktiske grunner ble den plassert etter viften på forsyningssiden av loopen. Egentlig var planen å implementere den på etterspørselssiden av loopen, og ville da vært implementert på sonenivå. Siden EnergyPlus har restriksjoner på hvor komponenter kan kobles inn var det ikke mulig å sette inn et varmebatteri før plenumet, bare etter. Dette vil ikke få noen konsekvenser for simuleringsresultatet. Det hadde vært verre dersom modellen hadde mange soner. Da ville styringen kun vært knyttet til en sone dersom det ikke var et gitt settpunkt for tilluftstemperaturen. Varmebatteriet før viften ble styrt som før, mens varmebatteriet etter viften ble koblet mot en sensor i rommet som skulle nå settpunkt på 21°C når driftstiden startet, og ble satt til å fungere mellom 6:00-8:00. Det ble også implementert en omluftsstrategi for å minimere temperaturøkningene til luften i samme tidsperiode.

Varmluftoppvarmingen skulle i utgangspunktet testes på alle løsningene, og ulike driftsstrategier skulle egentlig undersøkes, blant annet ved gradvis utvidelse av driftstiden for varmluftoppvarming. Dessverre viste resultatene fra analysen av de tre dagene at effekten ble femdoblet, varmen ble absorbert i betongdekket og den årlige energibruken ble betraktelig høyere. Det ble derfor bestemt sammen med veileder at videre detaljerte undersøkelser ikke var nødvendig.

Det ble også gjort en simulering av varmluftoppvarming på løsningen med isolasjon i taket siden dette grovt sett kan representere en konvensjonell ventilasjonsløsning med tilluftskanalen direkte koblet til himlingen. På grunn av dette ble det fokusert mer på å sammenligne den konvensjonelle oppvarmingsløsningen.

## 6 Simuleringsresultater

Resultatene blir presentert i tabeller med grafer. Her vil kolonnen representere de utvalgte dagene som er vist i figur 22. Det er fem forskjellige grafer for de tre ulike dagene.

- Graf 1: Operativ- og lufttemperatur i kontoret, hvor operativ temperatur er gitt ved blå kurve og lufttemperatur er gitt ved svart kurve.
- Graf 2: Varmefluksen som går opp i himlingen.
- Graf 3: Overflatetemperaturen i taket i plenumet sammen med tilluftstemperaturen inn i kontoret etter plenumet. Svart kurve er tilluftstemperatur som er Node1-1-2 som kan ses på figur 15 og blå kurve er overflatetemperaturen på betongen i taket i plenumet.
- Graf 4: Luftmengden til kontoret.
- Graf 5: Effekten på ovnen i kontoret.

Grafene kan refereres til som graf x.y.z, hvor x står for dagen, y står for graf nummer og z for case. For eksempel vil graf 1.1.1 være den 10. februar som er kolone 1, grafene vil være plassert i rad 1 og case nummer 1 som er aluminiumshimling.

Den årlige energibruken er gitt i et stolpediagram med de ulike energipostene som er

- Lys og utstyr som er konstanten over dagene i året.
- Vifte- og pumpeenergibruk.
- Oppvarming i kontoret.
- Oppvarming av luften.
- Kjølebehovet – Kjølebehovet blir noe høyt siden det ikke er implementert solavskjerming, og kontoret er sydvendt. Dette behovet kunne vært eliminert med riktig bruk av nattventilasjon og solavskjerming (Mathisen and Høseggen 2011).

Verdiene er basert på månedlige verdier fra EnergyPlus som er analysert i Excel.

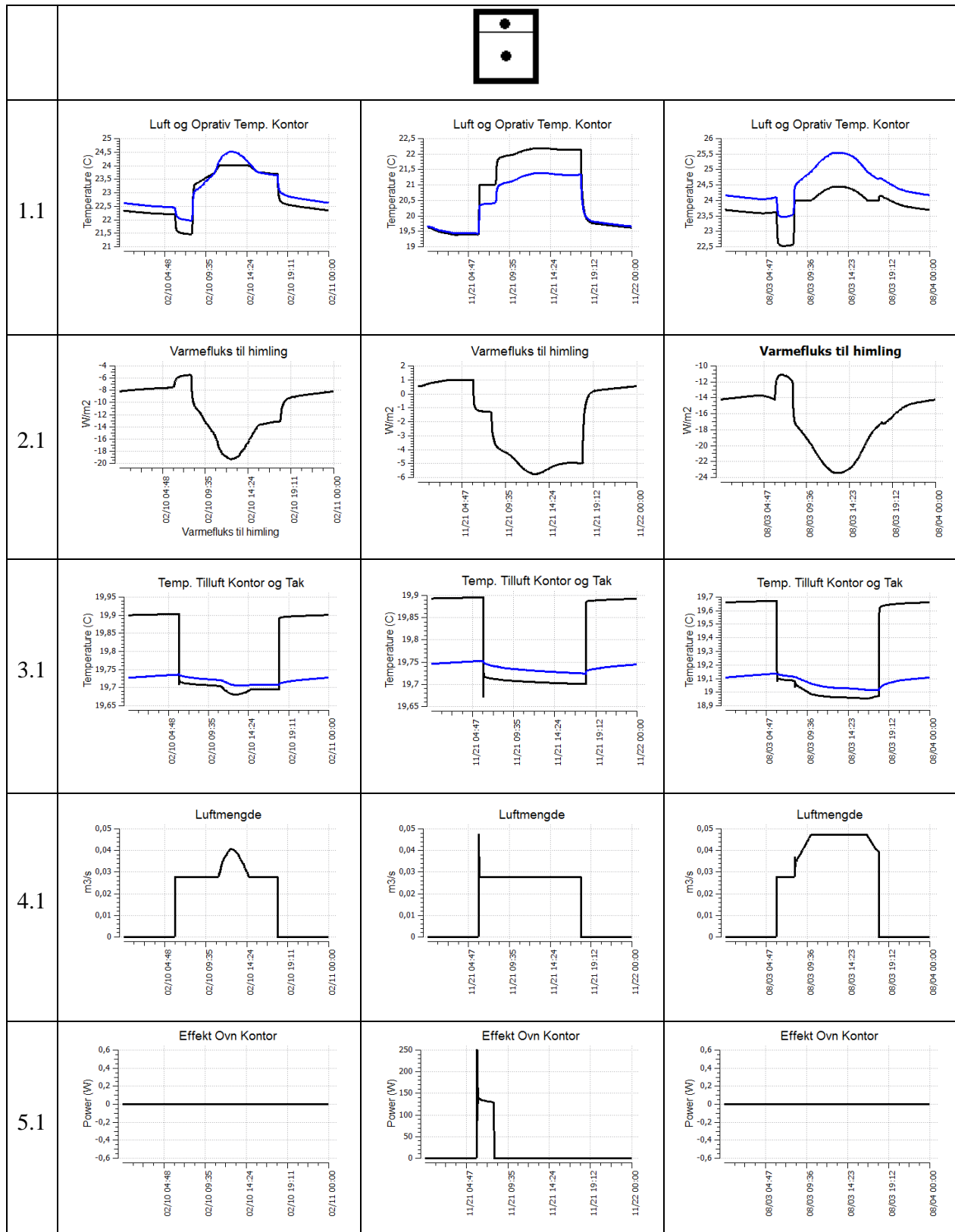
Som nevnt i kapittel 5.2 viste varmluftsoppvarming seg å ikke være gunstig med hensyn til effekt eller energibruk. Det blir derfor ikke et like stort fokus på disse resultatene.

Kjølebehovet vil i alle casene være høyt siden kontoret er sydvendt, og ikke har implementert solavskjerming. Det vil også være konstant tilstedeværelse som bidrar til å ytterligere øke kjølebehovet og senke behovet for oppvarming.



## 6.1 Resultater fra dagssimuleringer

### 6.1.1 Aluminiumshimling



Figur 23 Aluminiumshimling: Luft- og operativtemperatur, varmekraft til himling, tillufts- og betongtemperatur, luftmengde og effekt på ovn den 2.feb, 11.nov og 3.aug

### *Merknader grafer*

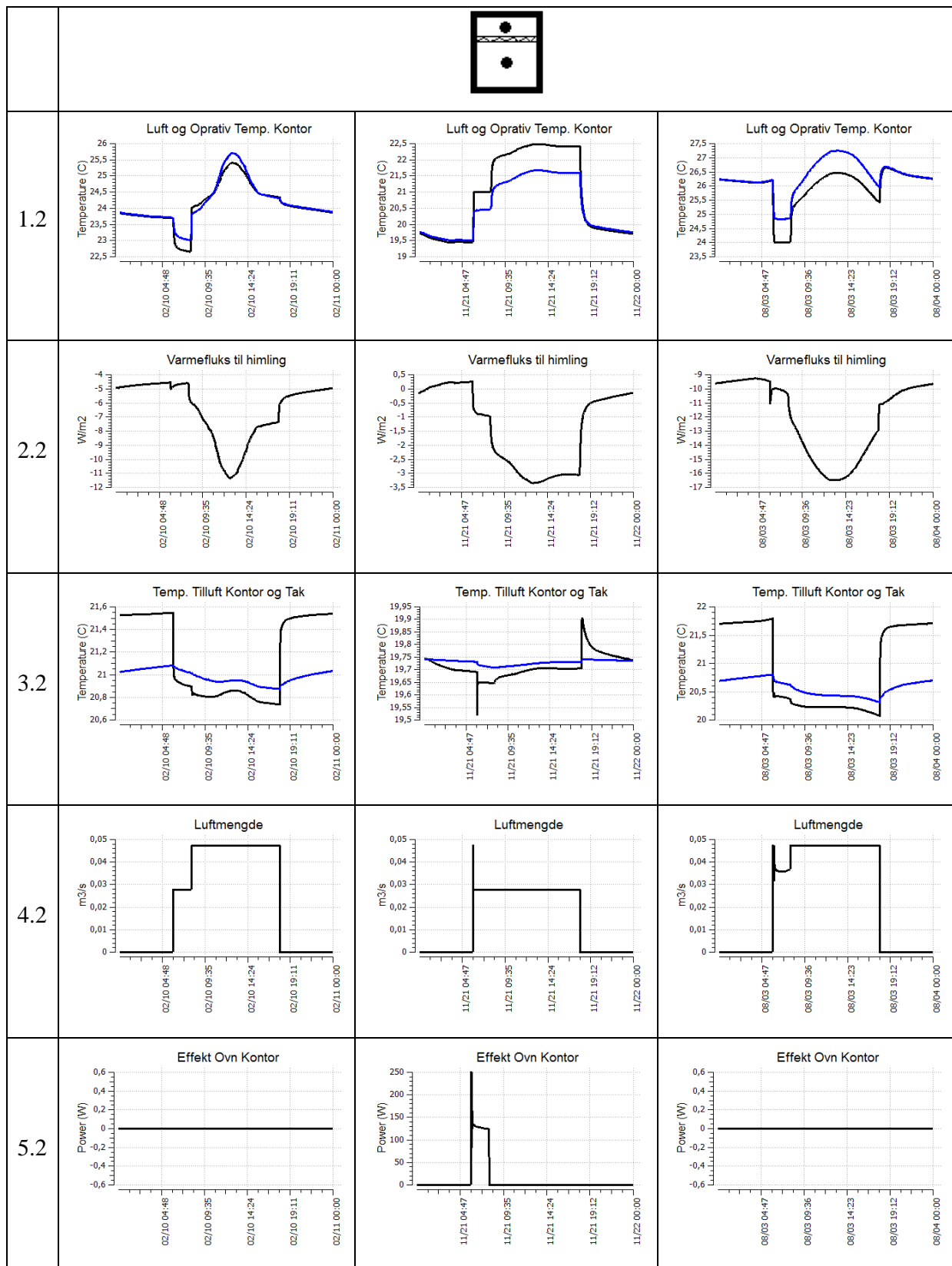
- Graf 1-3.1.1: Får et sprang på starten av dagen kl 06:00. Dette skyldes temperaturforskjellen på kontortemperaturen og tilluftstemperaturen i kontoret.
- Graf 1-3.2.1: Får et sprang i samme tidsintervall. Dette skyldes endringen av temperaturforskjellen mellom plenumet og kontoret. Varmefluksen i himlingen vil følge kontortemperaturen. Dess høyere temperatur i kontoret, dess mer varme forsvinner opp i himlingen.
- Graf 1-3.3.1: Den svarte kurven gjør også et sprang på starten av dagen. Grunne til at grafen gjør et sprang er at ventilasjonen starter og tilluftstemperaturen er lavere enn lufttemperaturen i plenumet. Tilluftstemperatur er satt til 19°C i graf 1-2 og 17°C i graf 3. Tilluftstemperaturen kan ses å være lineært avhengig av betongtemperaturen og holdes omtrentlig på 19.7°C i vinterdrift og cirka 19°C i sommerdrift
- Graf 1-3.4.1: Luftmengdene oppfører seg som forventet i graf 1 og 3 ved å gi økte luftmengder når temperaturen blir høyere enn 24°C. I graf 2 er det et sprang som trolig skyldes en litt sen respons fra EnergyPlus, eventuelt at ventilasjonen bidrar til å nå settpunkt.
- Graf 1-3.5.1: Kontoret klarer seg uten effekt i graf 1 og 3 siden temperaturen i kontoret er allerede er på settpunkt ved dagens start. Graf 2 viser at kontoret klarer å holde settpunkt med 125 W på ovnen samtidig som ventilasjonsanlegget er på.

### *Termisk komfort*

- Graf 1.1.1: Lufttemperaturen holdes på settpunkt på 24°C uten fullt pådrag fra ventilasjonen. Den operative temperaturen vil nå et toppunkt på 24,5°C.
- Graf 2.1.1: Lufttemperaturen når settpunkt på 21°C ved dagens start. Utover dagen holdes temperaturen konstant ved rundt 22°C med en operativ temperatur på cirka 21°C.
- Graf 3.1.1: Lufttemperaturen klarer ikke å holdes på settpunkt på 24°C med fullt pådrag fra ventilasjonsanlegget, men vil ikke stige over 0,5°C over settpunkt. Den operative temperaturen holdes under 26°C med en maksverdi på 25,5°C midt på dagen.



## 6.1.2 Standard isolasjonshimling



Figur 24 Standard isolasjonshimlingen: Luft- og operativtemperatur, varmekraft til himling, tillufts- og betongtemperatur, luftmengde og effekt på ovn den 2.febr., 11.nov og 3.aug

### *Merknader grafer*

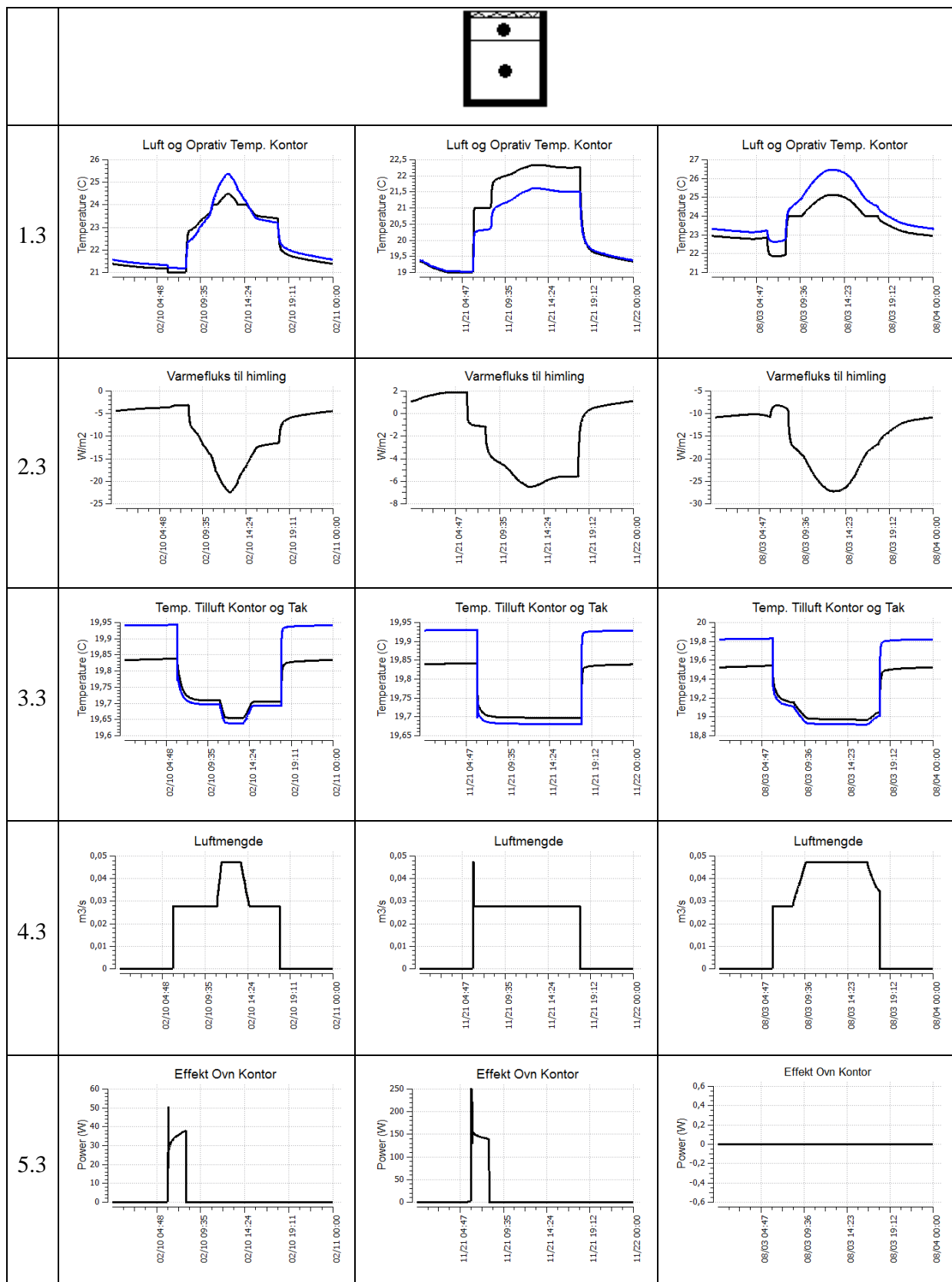
Punkt 1,2 og 4 som på merknader på grafene i forrige kapitel 6.1.1

- Graf 1-3.3.2: Samme grunn til sprang som forrige. På vinterdrift er overflatetemperaturen på betongen i graf 1 på 21°C, mens betongtemperaturen i graf 2 er på 19,6°C.
- Graf 1-3.5.2: Kontoret klarer seg uten effekt i graf 1 og 3 siden temperaturen i kontoret allerede er på settpunkt ved dagens start. Graf 2 viser at kontoret klare å holde settpunkt med cirka 125W uten indre laster, og med ventilasjonsanlegget på.

### *Termisk komfort*

- Graf 1.1.2: Lufttemperaturen holdes ikke på settpunkt på 24°C med fullt pådrag fra ventilasjonen, temperaturen overstiger ikke 25,5°C. Den operative temperaturen vil nå et toppunkt på 25,6°C.
- Graf 2.1.2: Lufttemperaturen når settpunkt på 21°C ved dagens start. Utover dagen holdes temperaturen konstant ved rundt 22-22,5°C med en operativ temperatur på cirka 21-22°C.
- Graf 3.1.2: Lufttemperaturen klarer ikke å holdes på settpunkt på 24°C med fullt pådrag fra ventilasjonsanlegget, og vil overstige 26°C med et toppunkt på 26,5°C. Den operative temperaturen holdes over 26°C hele dagen med en maksverdi på 27,25°C midt på dagen.

### 6.1.3 Isolasjon i tak



Figur 25 Isolasjon i taket: Luft- og operativtemperatur, varmekraft til himling, tillufts- og betongtemperatur, luftmengde og effekt på ovn den 2.feb, 11.nov og 3.aug

### *Merknader grafer*

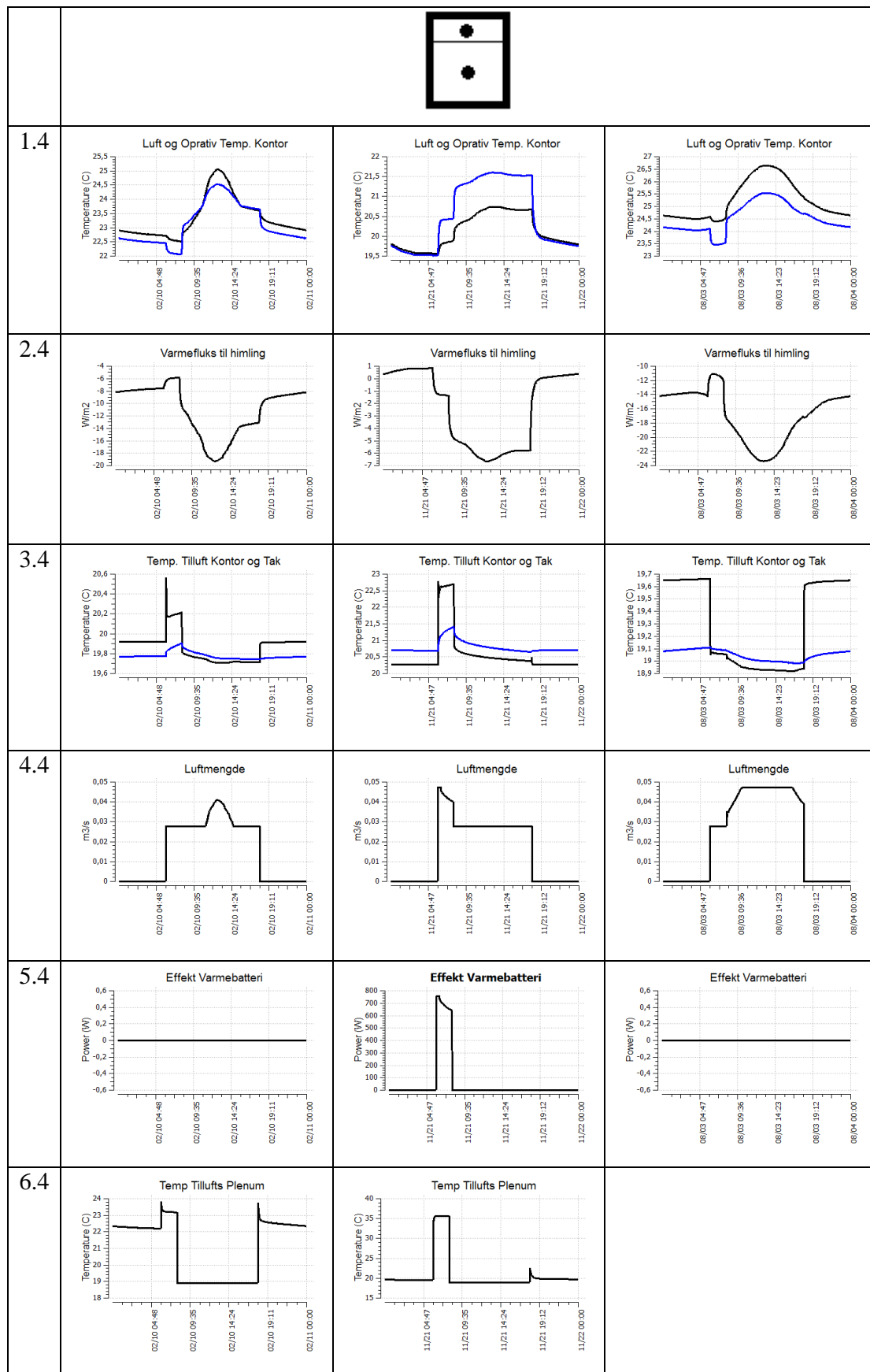
Punkt 1,2 og 4 som på merknader på grafene i forrige kapitel 7.1.1

- Graf 1-3.3.3: Den svarte kurven gjør sprang av samme grunn som den forrige. Tilluftstemperaturen følger lineært overflatetemperaturen til isolasjonen svært tett.
- Graf 1-3.5.3: Kontoret klarer seg uten effekt i kun graf 3 siden temperaturen i kontoret allerede er på settpunkt ved dagens start. Begge de andre dagene trenger henholdsvis 40 W og 125 W for å holde settpunkt uten interne laster med ventilasjonsanlegget på.

### *Termisk komfort*

- Graf 1.1.3: Lufttemperaturen holdes ikke på settpunkt på 24°C med fullt pådrag fra ventilasjonen, temperaturen overstiger ikke 24,5°C. Den operative temperaturen vil nå et toppunkt på 25,6°C.
- Graf 2.1.3: Lufttemperaturen når settpunkt på 21°C ved dagens start. Utover dagen holdes temperaturen konstant ved rundt 22-22,5°C med en operativ temperatur på cirka 21-22°C.
- Graf 3.1.3: Lufttemperaturen klarer ikke å holdes på settpunkt på 24°C med fullt pådrag fra ventilasjonsanlegget, og vil ikke overstige 26°C med et toppunkt på 25°C. Den operative temperaturen holdes under 26°C mesteparten av dagen med en maksverdi på 26,5°C midt på dagen.

## 6.1.4 Varmluft aluminiumshimling



Figur 26 Aluminiums himling varmluft: Luft- og operativtemperatur, varmekraft til himling, tillufts- og betongtemperatur, luftmængde og effekt på ovn den 2.febr., 11.nov og 3.aug

### *Merknader grafer*

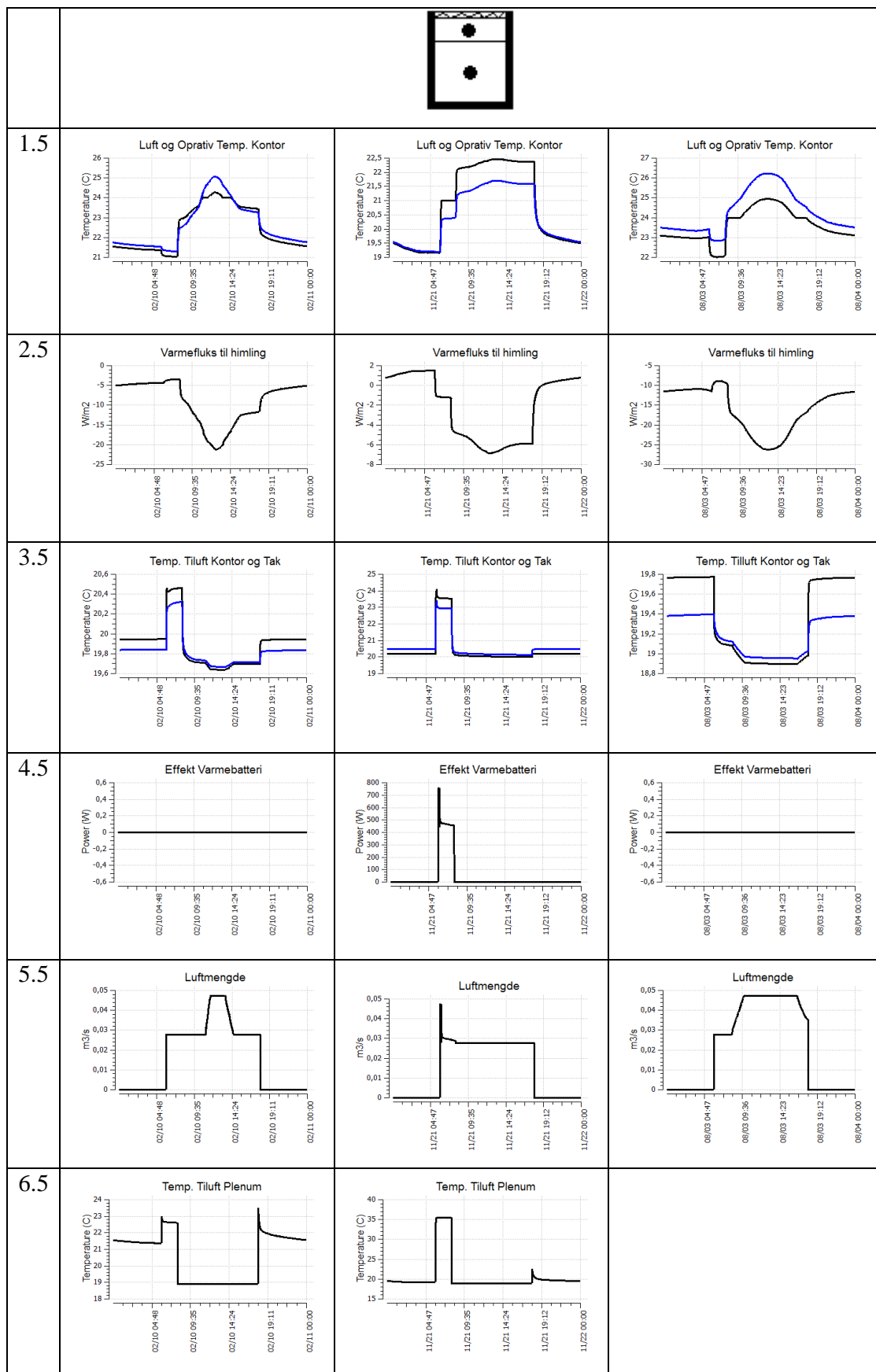
Punkt 1,2 og 4 som på merknader på grafene i forrige kapitel 7.1.1

- Graf 1-3.3.4 viser et sprang i temperaturen i tilluften uten effekt på batteriet. Dette skyldes omluftsstrategien og økningene i temperatur på grunn av viftenes tilførte varme til luftstrømmen. Dette gir en temperatur inn i plenumet på cirka 23°C ifølge graf 1.6.4 og en temperatur inn i kontoret på omtrent 20,1°C. Graf 2 viser en tilluftstemperatur inn i kontoret på 22,5°C med en temperatur på 35°C inn i plenumet. Overflatetemperaturen stiger med cirka 1°C.
- Graf 2.6.4 viser at selv med en tiluftstemperatur på 35°C inn i plenumet som tilsvarer en effekt på 750 W på varmebatteriet. Graf 2.1.4 viser at løsningen fortsatt ikke klarer å nå settpunkt på 21°C.
- Graf 2.4.4 viser at luftmengden avtar etter første spranget selv om settpunkt på 21°C ikke er nådd. Temperaturføleren som styrer varmebatteriet er koblet opp til denne temperaturen derfor skulle luftmengden ha holdt seg konstant høy siden settpunktet ikke er nådd.

### *Termisk komfort*

- Graf 1.1.4: Lufttemperaturen holdes ikke på settpunkt på 24°C med fullt pådrag fra ventilasjonen, temperaturen overstiger ikke 25,5°C. Den operative temperaturen vil nå et toppunkt på 25°C.
- Graf 2.1.4: Lufttemperaturen når ikke settpunkt på 21°C ved dagens start, men vil ligge på omtrent 20,5°C når personen ankommer kontoret. Utover dagen holdes temperaturen konstant ved rundt 21,5°C med en operativ temperatur på cirka 20,5°C.
- Graf 3.1.4: Lufttemperaturen klarer ikke å holdes på settpunkt på 24°C med fullt pådrag fra ventilasjonsanlegget, men vil overstige 26°C med ett toppunkt på 25,5°C. Den operative temperaturen holdes ikke under 26°C i løpet av dagen, og når en maksverdi på 26,5°C midt på dagen.

## 6.1.5 Varmluft isolasjon i tak



Figur 27 Isolasjon i taket varmluft: Luft- og operativtemperatur, varmekraft til himling, tillufts- og betongtemperatur, luftmengde og effekt på ovn den 2.febr., 11.nov og 3.aug

### *Merknader grafer*

Punkt 1,2 og 4 som på merknader på grafene i forrige kapitel 7.1.1

- Graf 1.3.5 viser et sprang i temperaturen i tilluften uten effekt på batteriet. Dette skyldes omluftsstrategien og økningene i temperatur på grunn av viftenes tilførte varme til luftstrømmen. Dette gir en temperatur inn i plenumet på cirka 23°C i følge graf 1.4.6 og en temperatur inn i kontoret på omtrent 20,4°C. Graf 2.3.4 viser en tillufstempertur inn i kontoret på 23,5°C med en temperatur på 35°C inn plenumet. Overflatetemperaturen stiger med cirka 3°C
- Graf 2.3.5 viser at med en temperatur på 35°C inn i plenumet som tilsvarer en effekt på 500 W på varmebatteriet, men løsningen klare å nå settpunkt på 21°C ved dagens start.
- Graf 2.4.5 viser at luftmengden avtar etter første spranget når settpunkt på 21°C er nådd og luftmengdene går mot minimum.

### *Termisk komfort*

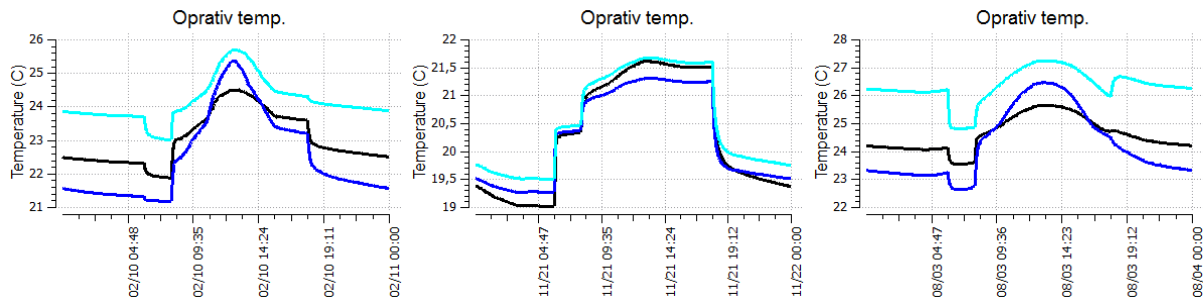
- Graf 1.1.5: Lufttemperaturen holdes omtrent på settpunkt på 24°C med fullt pådrag fra ventilasjonen, temperaturen overstiger ikke 24,1°C. Den operative temperaturen vil nå et toppunkt på 25°C.
- Graf 2.1.5: Lufttemperaturen når settpunkt på 21°C ved dagens start. Når personen ankommer kontoret holdes temperaturen konstant ved rundt 22,5°C med en operativ temperatur på cirka 21,5°C.
- Graf 3.1.5: Lufttemperaturen klarer ikke å holdes på settpunkt på 24°C med fullt pådrag fra ventilasjonsanlegget, men vil overstige 26°C med ett toppunkt på 25,5°C. Den operative temperaturen holdes ikke under 26°C i løp av dagen, og når en maksverdi på 26,2°C midt på dagen.



## 6.2 Sammenligning av de tre løsningene i dagsperspektiv

- Svart kurve representerer løsning med aluminiumshimling.
- Cyan/lyse blå kurve representerer løsningen med standard isolasjonshimling.
- Blå kurve representerer løsning med isolasjon i taket.

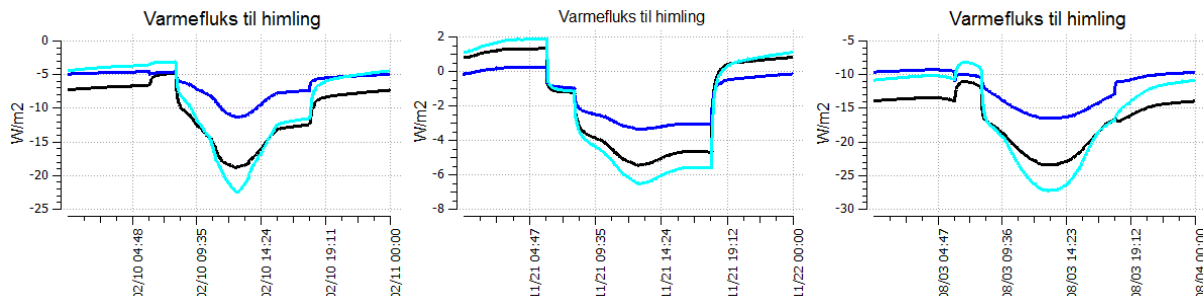
### 6.2.1 Operativ temperatur



Figur 28 Sammenligning av operativ temperatur for de ulike løsningene

- Aluminiumshimlingen vil ha lavest økning i operativ temperatur i løpet av driftstiden med en maks stigning på  $1,5^{\circ}\text{C}$ , mens løsningen med isolasjon i taket vil ha den høyeste økningen på omtrent  $2,75^{\circ}\text{C}$  som er nesten dobbelt så stor økning.
- Løsningen med isolasjon i taket har den laveste temperaturen på litt over  $21^{\circ}\text{C}$ , mens standard isolasjon i himlingen vil ha de høyeste temperaturene alle dager, med en temperatur over  $27^{\circ}\text{C}$  den varme sommerdagen.

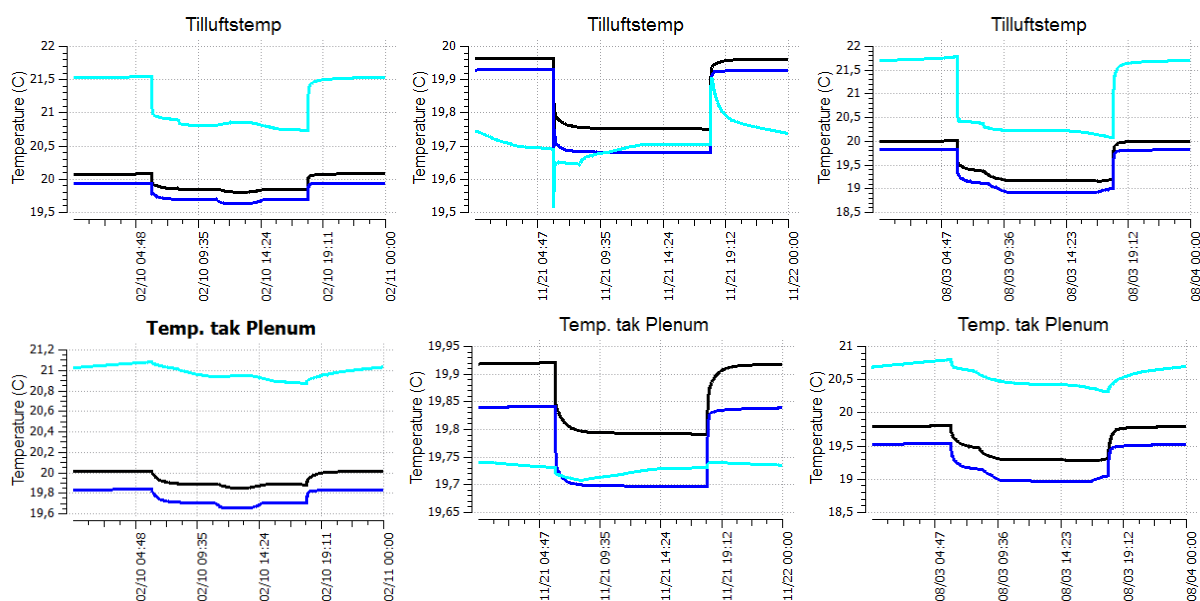
### 6.2.2 Varmefluks



Figur 29 Sammenligning av varmekraften i himlingen

- Alle kurvene vil følge den operative temperaturen, bare motsatt rettet. Alle casene vil ha den største varmekraften til himlingen den varme sommerdagen.
- Aluminiumshimlingen vil være den som ligger midt mellom de andre casene med en maksimal fluks på  $22 \text{ W/m}^2$ .
- Isolasjonshimlingen vil være den med lavest fluks med en min-maks på  $2,5-17 \text{ W/m}^2$ .
- Isolasjon i taket vil ha den høyeste varmekraften til himlingen med en min-maks  $6,5-27 \text{ W/m}^2$ .

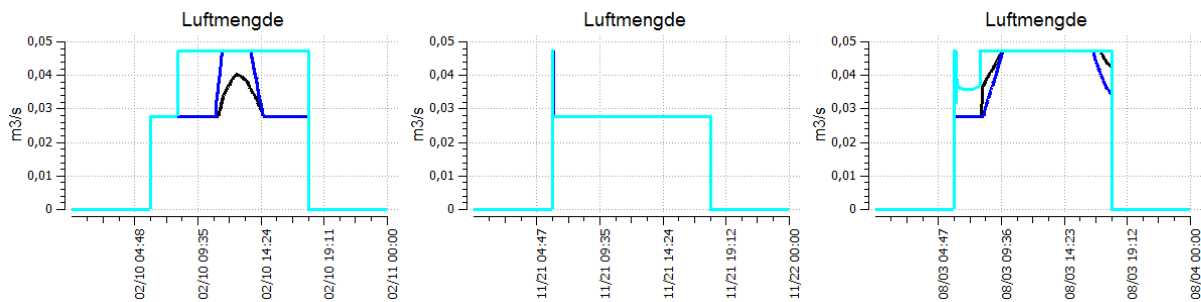
### 6.2.3 Tilluftstemperatur og temperatur i taket



Figur 30 Sammeligning av tillufts- og overflatetemperaturen

- Aluminiumshimling og isolasjon i taket har samme konjunktur med parallellforskyving på  $0,1-0,3 \text{ K}$ .
- Aluminiumshimlingen vil gi den høyeste tilluftstemperaturen den 11.nov på  $19,75^\circ\text{C}$
- Løsningen med isolasjon i himlingen vil gi høyeste tilluftstemperatur med en maks verdi på  $20,5^\circ\text{C}$  under drift den varmeste dagen, og vil også gi den laveste tilluftstemperaturen med  $19,65^\circ\text{C}$  på den relativt kalde dagen uten sotilskudd.
- Løsningen med isolasjon i taket gir den laveste tilluftstemperaturen den 3.aug og 2.feb på henholdsvis  $19^\circ\text{C}$  og  $19,75^\circ\text{C}$ .
- Temperaturen i taket vil være høyest med isolasjonshimling den 10.feb og 3.aug. Den vil være på henholdsvis  $21^\circ\text{C}$  og  $20,75^\circ\text{C}$ .

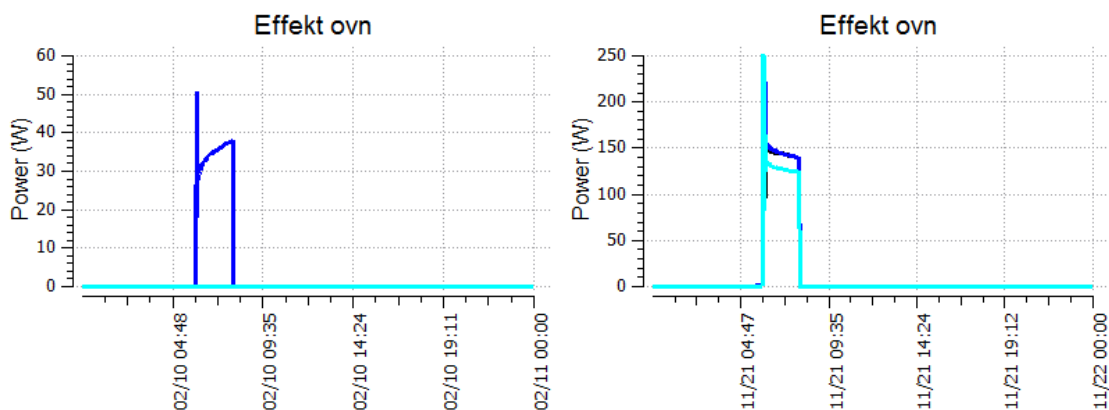
## 6.2.4 Luftmengde



Figur 31 Sammeligning av luftmengder.

- Alle casene har samme luftmengde den kalde dagen uten soltilskudd 21.nov
- Aluminiumshimlingen har den minste luftmengden den kalde dagen med soltilskudd
- Isolasjonshimlingen har størst luftmengder i de andre casene
- Isolasjon i taket har den minste luftmengden den varme sommerdagen

## 6.2.5 Effekt ovn

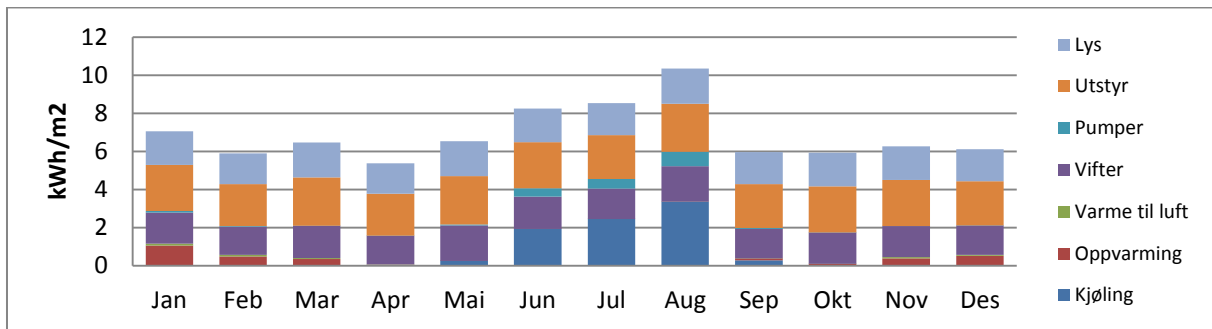


Figur 32 Ovn effekt

- Det er kun løsningen med isolasjon i taket som har et effektbehov på 35 W den 2.febr
- Aluminiumshimlingen og løsningen med isolasjon i taket vil ha omtrentlig like effektbehov på 150 W. Løsningen med isolasjon i himlingen vil ha et effektbehov som er noe mindre på 140-130 W.

## 6.3 Energisimuleringer

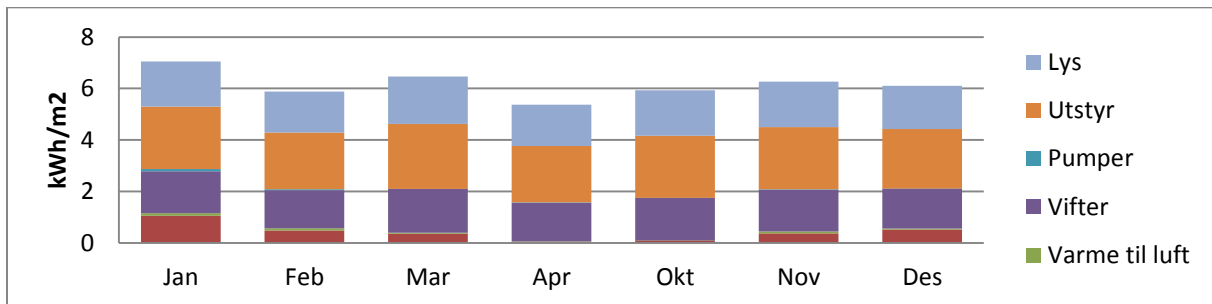
### 6.3.1 Aluminiums himling



Figur 33 Aluminiumshimling: Månedlig energibruk over hele året

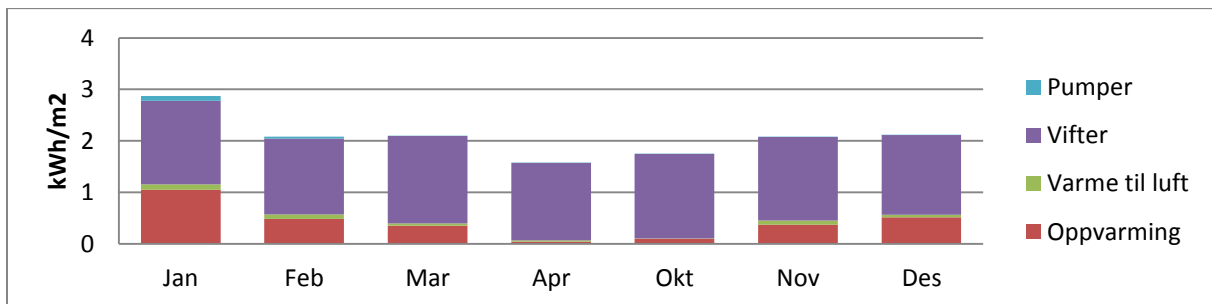
- Lys og utstyr er over 50 % av den månedlige energibruken når kjøling ikke er inkludert.
- Det kun et oppvarmingsbehov i januar-mars og oktober-desember.
- Varmegjenvinneren dekker nesten alt oppvarmingsbehovet til luften.
- Kjølebehovet er høyt av grunner som er nevnt innledningsvis i kapittel 6.

Siden kjølebehovet ikke er representativt vises bare månedene uten kjølebehov under.



Figur 34 Aluminiumshimling: Månedlig energibruk for hele måneder med vinterdrift

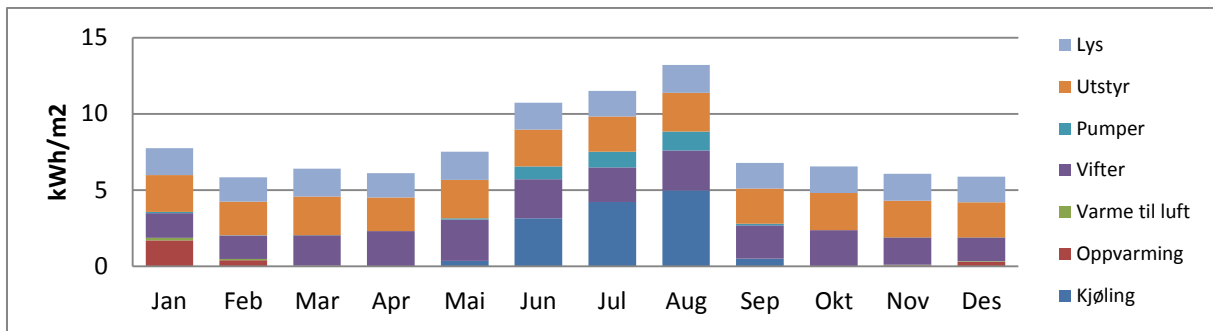
- Oppvarmingsbehovet er mellom 0-1 kWh/m<sup>2</sup>. Dette er svært lavt og kommer trolig av samme grunnen som at kjølebehovet er høyt.



Figur 35 Aluminiumshimling: Månedlig energiforbruk for hele måneder med vinterdrift utelatt lys og utstyr

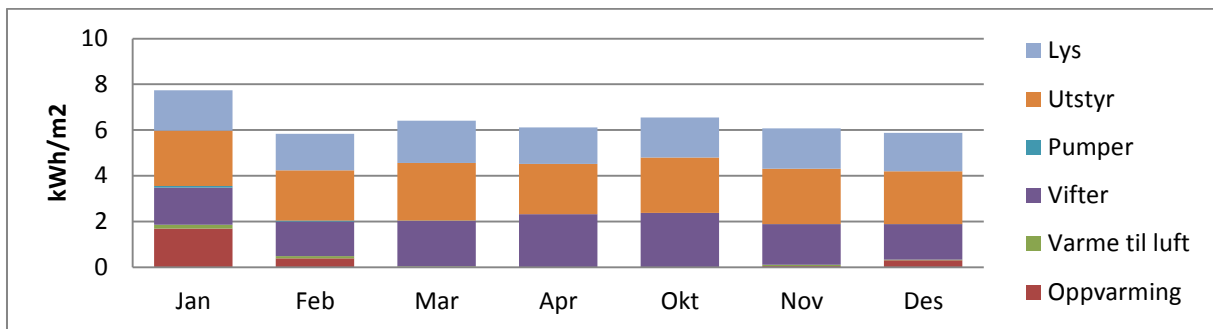
Viftebruken er den største bidragsyteren til energibruken utenom interne laster

### 6.3.2 Standard isolasjonshimling



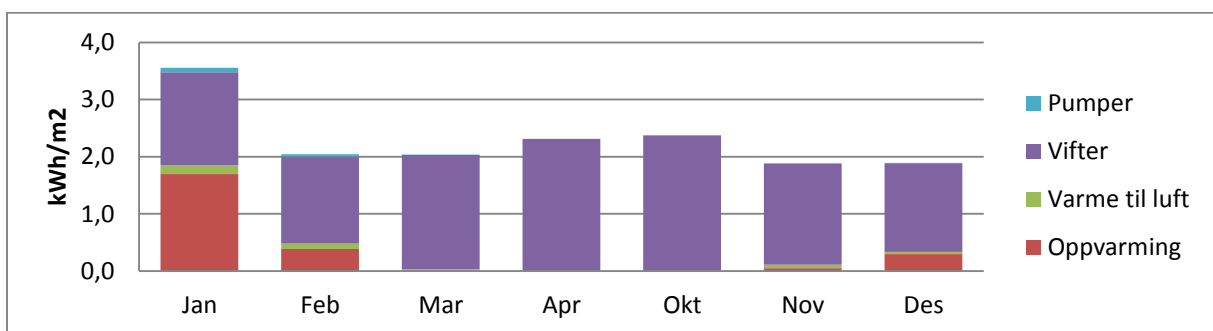
Figur 36 Standard isolasjonshimling: Månedlig energibruk over hele året.

- Oppvarmingsbehov kun i januar, februar og desember.
- Varmegjenvinneren dekker nesten alt oppvarmingsbehovet til luften.
- Kjølebehovet er høyt av grunner som er nevnt innledningsvis i kapittel 6.



Figur 37 Standard isolasjonshimling: Månedlig energibruk for hele måneder med vinterdrift.

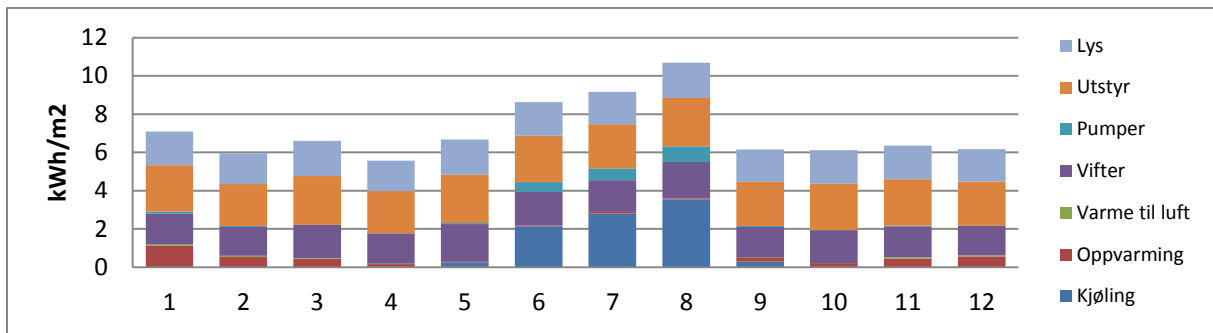
- Interne laster bruker over 50 % av energien i oppvarmingsmånedene.



Figur 38 Standard isolasjonshimling: Månedlig energiforbruk for hele måneder med vinterdrift utelatt lys og utstyr.

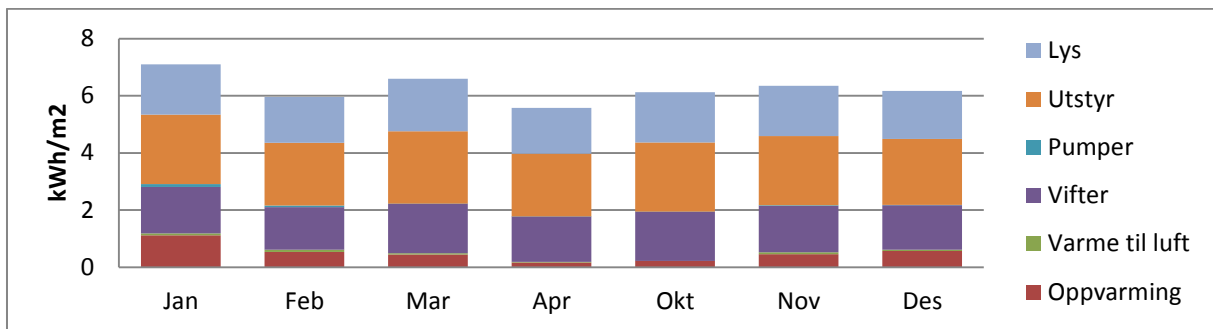
- Energibruken til vifter er eneste forbruker av energi i mars, april og oktober.

### 6.3.3 Isolasjon i tak



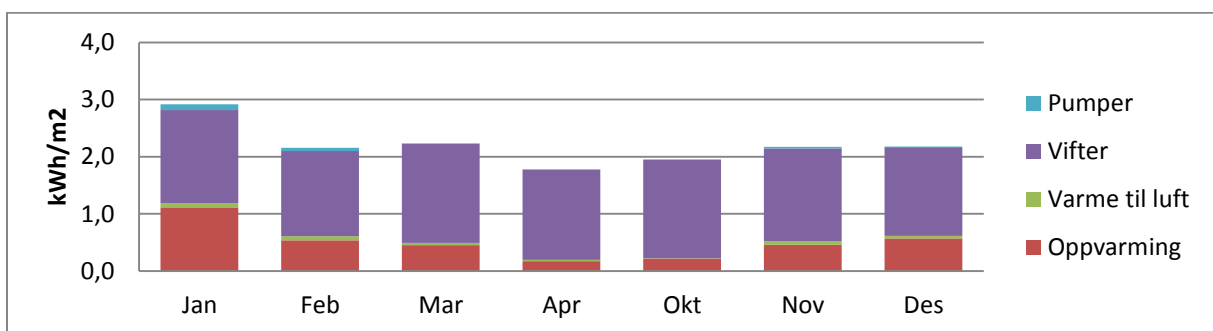
Figur 39 Isolasjon i taket: Månedlig energibruk over hele året.

- Oppvarmingsbehov januar-april og oktober-november.
- Interne laster står for størsteparten av energibruken.
- Kjølebehovet er høyt av samme grunn som de andre to simuleringene.



Figur 40 Isolasjon i taket: Månedlig energibruk for hele måneder med vinterdrift.

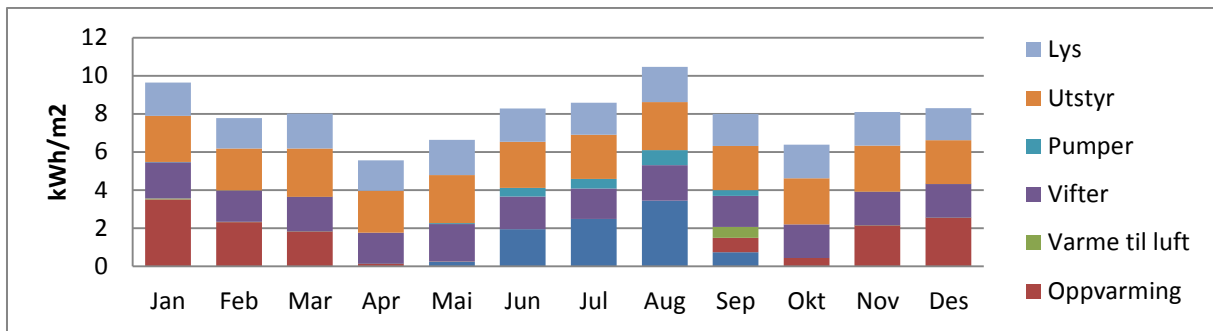
- Oppvarmingsbehov i alle vinterdrifts månedene.



Figur 41 Isolasjon i taket: Månedlig energiforbruk for hele måneder med vinterdrift utelatt lys og utstyr.

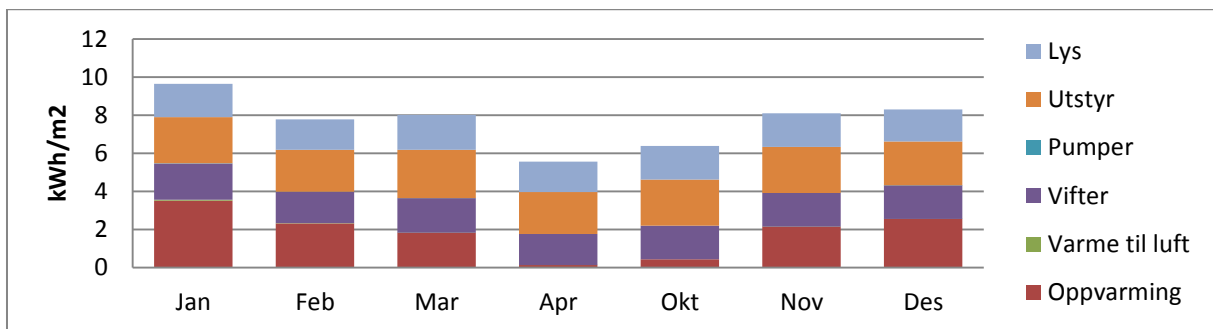
Viftedriften er dominerende for energibruken og vil være over halvparten av energibruken i oppvarmingsmånedene når utstyr og lys blir utelatt.

### 6.3.4 Varmluft aluminiumshimling



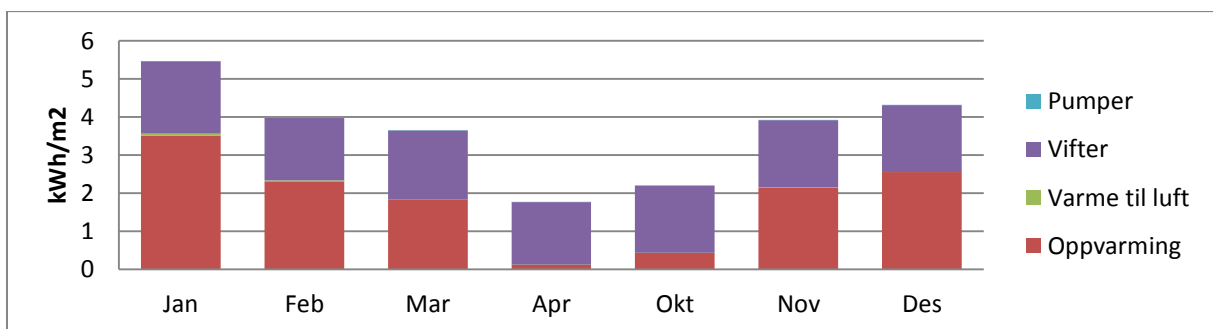
Figur 42 Aluminiumshimling varmluft: Månedlig energibruk over hele året.

- Oppvarmingsbehov januar-april og september-desember.
- Interne laster står for mindre enn 50 % av den månedlige energibruken.
- Det er et synlig behov for oppvarming av luften i september.
- Det vil være et større kjølebehov i mai og september, mest sannsynlig på grunn av varmluftoppvarmingen.



Figur 43 Aluminiumshimling varmluft: Månedlig energibruk for hele måneder med vinterdrift.

- Det er et oppvarmingsbehov for alle rene oppvarmingsmånedene

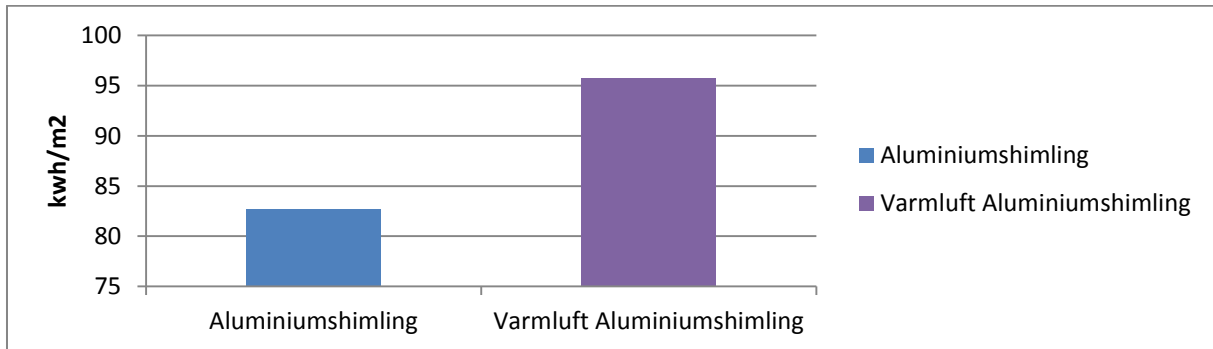


Figur 44 Aluminiumshimling varmluft: Månedlig energiforbruk for hele måneder med vinterdrift utelatt lys og utstyr.

- Oppvarmingsbehovet er større enn viftdriften i fem av de sju månedene

## 6.4 Sammenligning av årlig og månedlig energibruk

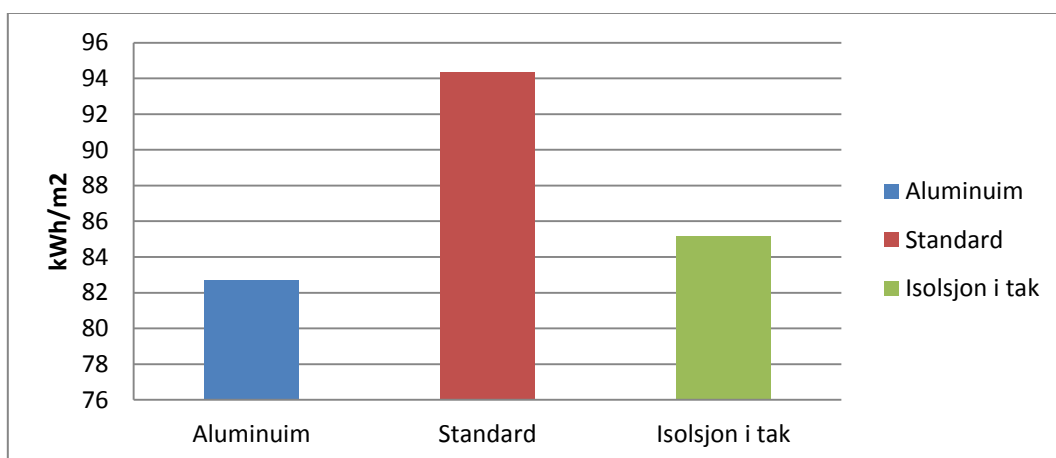
Grunnen til at varmluftsoppvarmingen ikke blir videre vurdert er på grunn av en økning i energibruken på over 15 % per kvadratmeter som er illustrert under i figur 45. Dette gjør denne løsningen så pass mye dårligere at videre analyse ikke er nødvendig. Det ble også vist i figur 26 at også effektbehovet blir femdoblet, noe som også er et argument for at løsningen ikke er gunstig.



Figur 45 Sammenligning av årlig energibruk med og uten varmluftsoppvarming

### 6.4.1 Sammenligning årlig energibruk uten varmluft

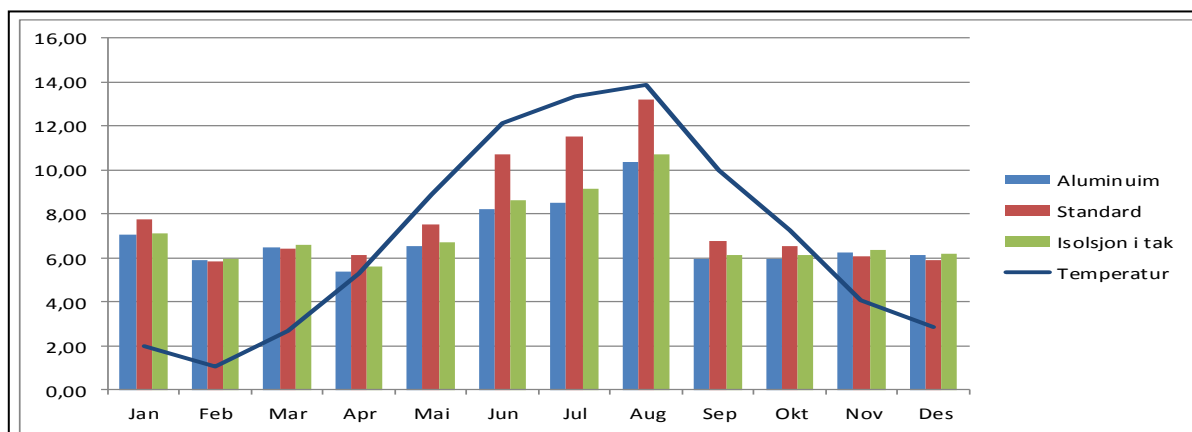
Den årlige energibruken til de tre casene er svært lave. Dette er trolig på grunn av kontant tilstedeværelse og det at kontoret er sydvendt uten solavskjerming. Standard isolasjon i himlingen gir en energibruk som er 14 % høyere enn aluminiumen, mens isolasjon i taket har en energibruk som er 4 % høyere.



Figur 46 Totalt årlig energiforbruk for de ulike løsningene

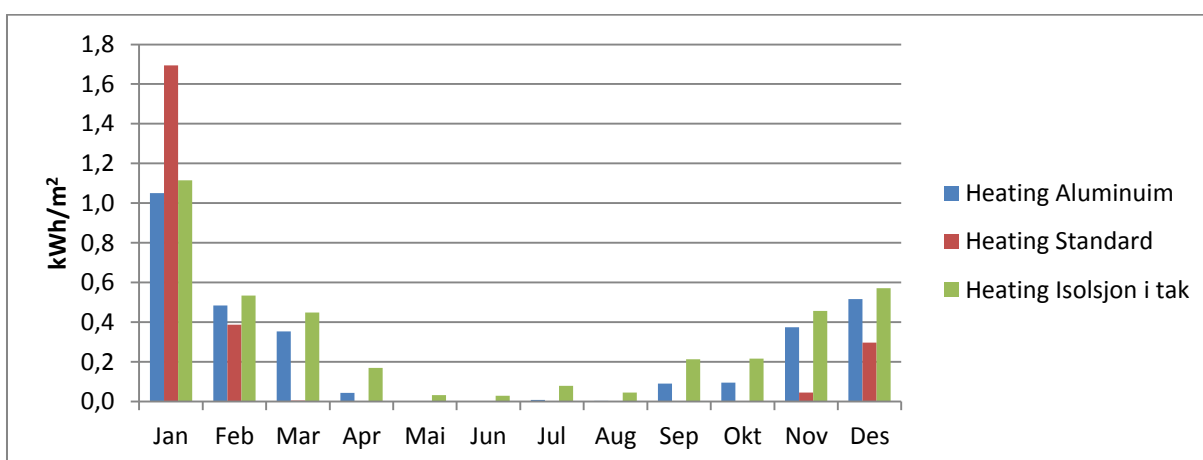


Utetemperaturen i figur 47 er basert på månedlige gjennomsnittsverdier. Det kan også ses at den månedlige energibruken følger omtrentlig denne kurven for alle løsningene.



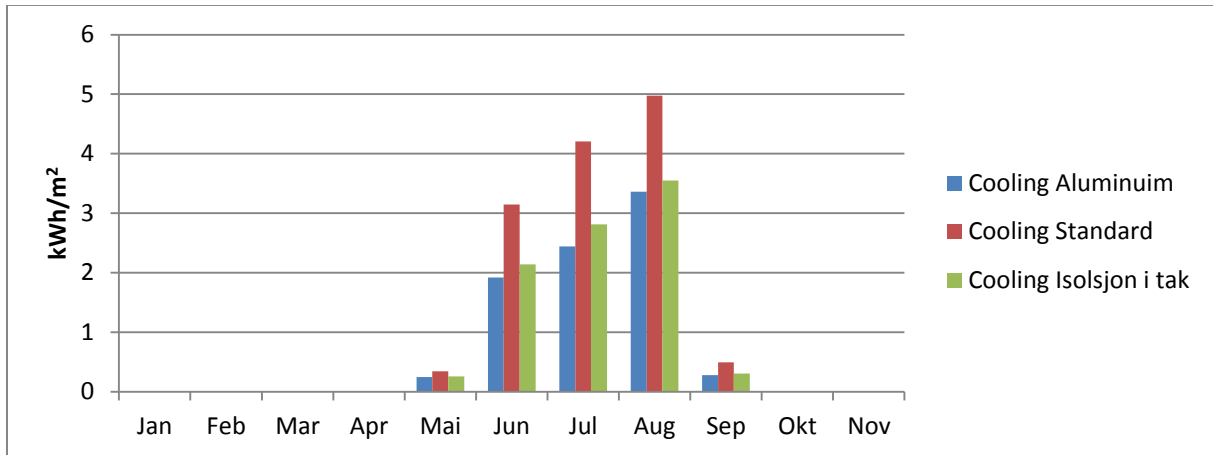
Figur 47 Månedlig energiforbruk for de 3 ulike løsningene med månedlig gjennomsnitt temperaturer

Figur 48 viser energibruken til oppvarming for de ulike casene. Det kan observeres at energibruken til løsningen med isolasjon i himlingen har det største oppvarmingsbehovet i januar men har det minste oppvarmingsbehovet i de andre månedene. Løsningene med og uten isolasjon i taket er relativt like bare at løsningen uten isolasjon alltid er noe lavere. Løsningen med isolasjon i taket er den eneste av løsningene som har et oppvarmingsbehov i mai-august.



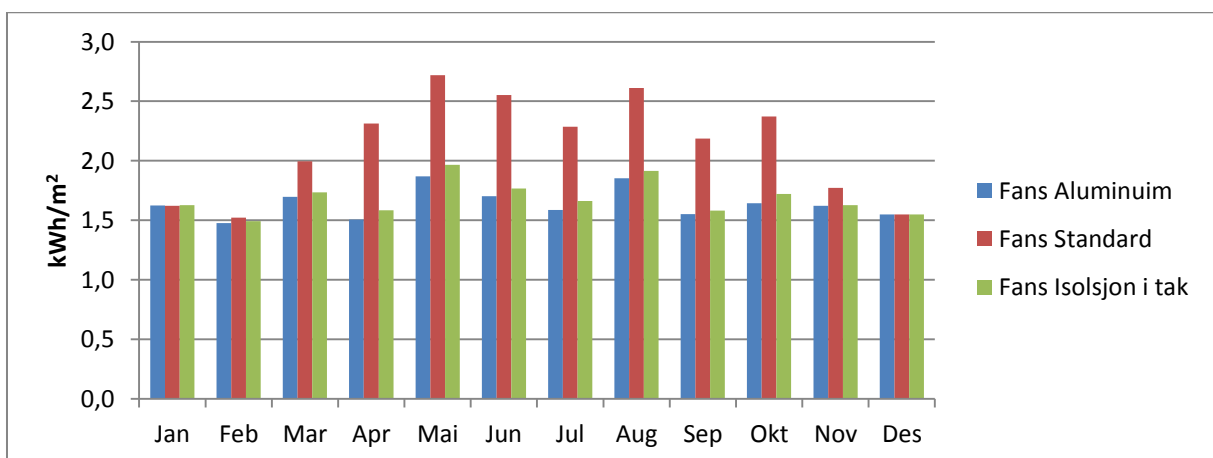
Figur 48 Månedlig oppvarmingsbehov for de tre ulike løsningene

Figur 49 viser det månedlige kjølebehovet for de ulike casene. Det kan ses at kjølebehovet følger den samme lineære stigningen i juni til august. Det månedlige kjølebehovet er høyest i løsningen med isolasjon i himlingen. Løsningen med aluminiumshimling vil ha lavest kjølebehov i alle månedene med ren sommerdrift.



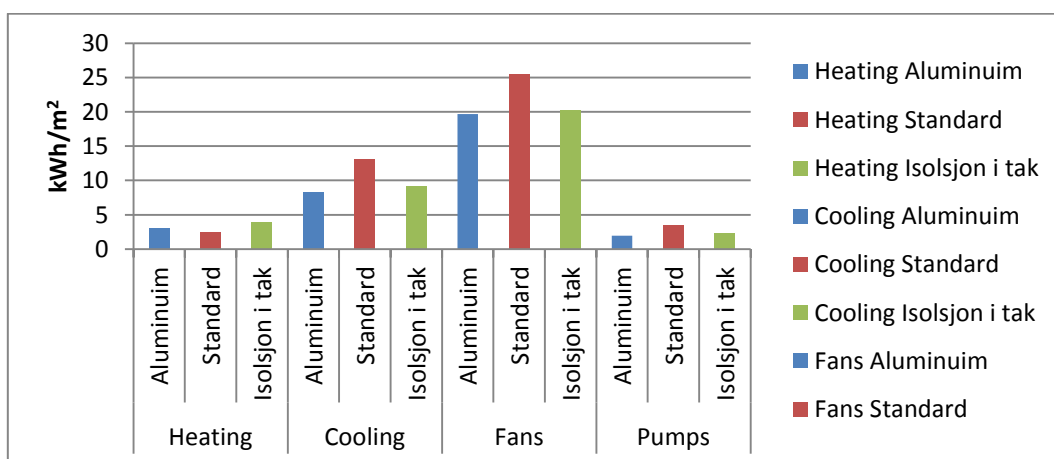
Figur 49 Månedlig kjølebehov for de tre ulike løsningene

Figur 50 viser energibehovet for vifter i de tre casene. Løsningen med isolasjon i himlingen vil ha høyest energibruk til vifter i alle månedene. Dette henger sammen med at dette caset også har største det kjølebehovet og derfor må viftene kjøres mer siden kjølingen kommer fra ventilasjonen.



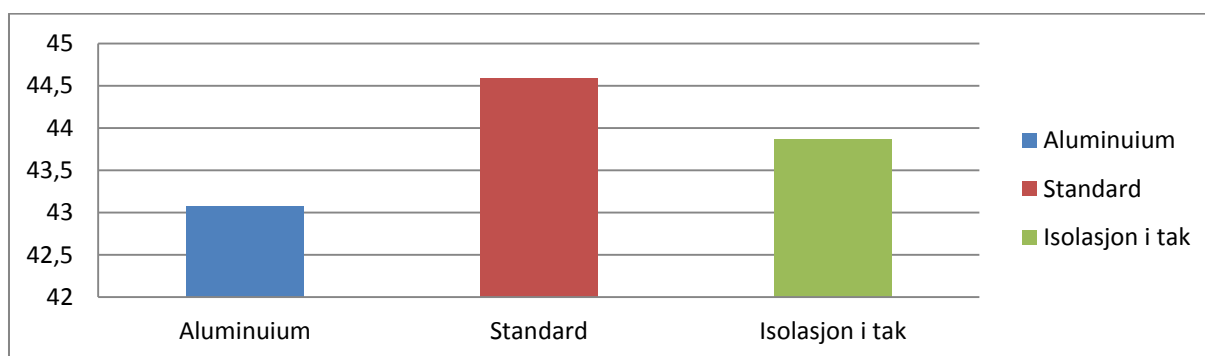
Figur 50 Månedlig energibruk vifter for de tre ulike løsningene

Figur 51 viser en sammenligning mellom den årlige energibruken til de tre ulike casene for energipostene – oppvarming, kjøling, vifter og pumper. Det vises at det årlige oppvarmingsbehovet er det laveste for løsningen med isolasjon i himlingen, og er det høyeste for løsningen med isolasjon i taket. På de andre energipostene kommer løsningen med isolasjon i himlingen høyest. Disse postene henger sammen siden kjølebehovet påvirker vifte- og pumpebehovet. Aluminiumshimlingen har et nesten identisk energiforbruk som løsningen med isolasjon i taket, bare at den kommer litt dårligere ut for alle postene.



Figur 51 Sammenligning av den totalte årlig energibruken for oppvarming, kjøling, vifter og pumper for de tre casene

Figur 52 viser den totale energibruken for de rene vinterdriftsmånedene fra januar til april og fra oktober til desember. Det vises også her at løsningen med isolasjon i himlingen kommer dårligst ut, men at forskjellen mellom de tre er mindre med hensyn til oppvarmingsmånedene kontra den totale årlige energibruken. Løsningen med isolasjon i himlingen har et energibruk som er 3 % høyere enn aluminiumshimlingen. Løsningen med isolasjon i taket har et energibruk som er 2 % høyere enn aluminiumshimlingen.

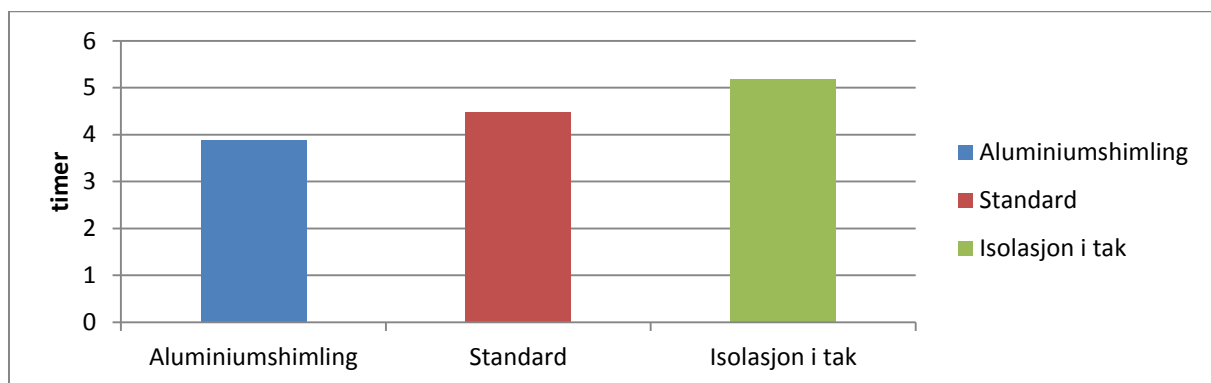


Figur 52 Energiforbruk oppvarmingsmånedene

## 6.5 Sammenligning av den årlige termiske komforten

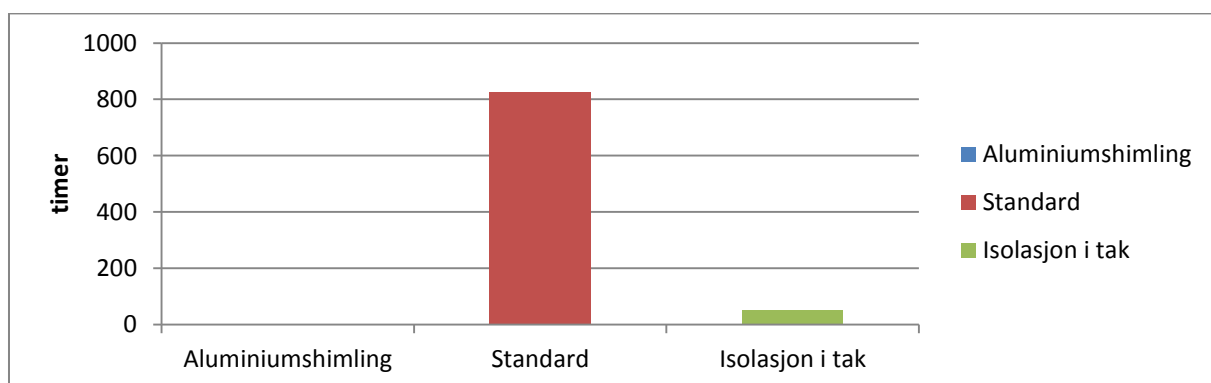
Fra EnergyPlus blir det også beregnet årlig antall timer for settpunkt ikke nådd for både kjøling og oppvarming. For at tiden skal blir registrert må temperaturen være over 0,2°C over settpunkt.

Figur 53 viser antall timer for settpunkt ikke nådd for oppvarming for hver av de ulike løsningene. Det er løsningen med isolasjon i taket som kommer dårligst ut med hensyn til oppvarming som er på cirka 5 timer men dette er kun 1 time mer enn løsningen uten isolasjon. Det er svært små forskjeller når det kommer til oppnådd settpunkt for oppvarming.



Figur 53 Timer hvor settpunkt ikke er møtt for oppvarming.

I figur 54 viser antall timer de ulike løsningene ikke klare å holde seg innenfor settpunkt for kjøling. Man kan se at løsningen med isolasjon i himlingen sliter med å oppnå settpunkt for kjøling på 24°C. Løsningen har over 800 timer med lufttemperaturer over 24°C sammenlignet med løsningen med kun aluminiumshimling som klarer å nå settpunkt hele året for kjøling.



Figur 54 Timer hvor settpunkt ikke er møtt for kjøling.

## **7 Sammenligning av EnergyPlus og varmebalanse**

For å undersøke om modellen stemmer med fysikken, ble data fra simuleringsprogrammet brukt i den matematiske modellen som er presentert i kapittel 4.3. Dette er gjort for å se hvordan EnergyPlus-modellen oppfører seg sammenlignet med varmebalanseligningen.

Det var problemer med aluminiumshimlingens temperaturutvikling under simuleringen. Det kan være mange årsaker til dette, men siden konduktiviteten til aluminiumen er svært høy og tidskrittene i EnergyPlus ikke kan settes lavere enn 60 sekund, kan dette være en mulig årsak. Det ble også prøvd å gjøre en parameterstudie på aluminiumens materialeegenskaper som konduktivitet, tetthet, spesifikk varmekapasitet og tykkelse for å undersøke hvorvidt det var mulig å få en mer dynamisk respons fra himlingen. Det ble også undersøkt ulike parameteroppsett for varmebalanse i EnergyPlus ved å endre antall noder i materialet, dempingsfaktorer og konvergensintervall. Ut fra alle disse testene ble det ikke påvist hvorfor temperaturen i himlingen hadde veldig små temperaturdifferanser i forhold til hva som var intuitivt forventet.

Det ble også prøvd å implementere en himling uten masse med kun en U-verdi. Dette fungerte heller ikke fordi konveksjonen mellom rommet og himlingen forsvant. Dette førte til at modellen mistet eventuelle effekter av konveksjon og strålingsbidrag og var derfor ikke brukelig.

På av dette var det viktig å sammenligne resultatene fra EnergyPlus med den matematiske modellen da en slik sammenligning vil kunne gi en indikasjon på hvordan en svært enkel varmebalanse samsvarer med resultatene i et komplisert simuleringsprogram. I den matematiske modellen ble ulike faktor som EnergyPlus tar hensyn til utelatt for enkelthets skyld, men en slik enkel modell vil kunne gi en pekepinn på hvordan dynamikken er i programmet. Spesielt siden det var konvergensproblemer med aluminiumshimlingen, og temperaturendringen oppførte seg noe merkelig.

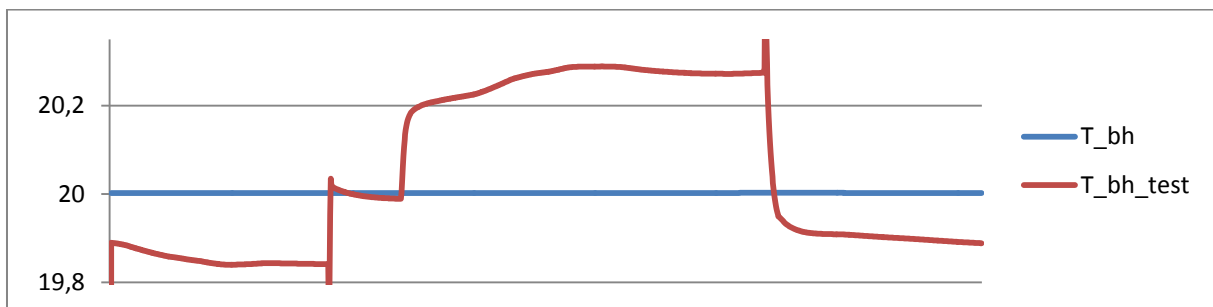
## 7.1 Test av matematisk modell med data fra EnergyPlus

Dataen fra simuleringene kan bli brukt til å predikere himlingstemperaturen. Ved å bruke data gitt av simuleringens resultat for aluminiums- og isolasjonshimling den 21. november kan ligning 4.6 fra varmebalanse som ble presentert i kapittel 4.3 brukes til å finne en himlingstemperatur. Den vil bare være avhengig av konveksjon på over- og undersiden, u-verdi og tykkelse av himlingsflaten, og rom- og plenumstemperatur.

### 7.1.1 Aluminiumshimling

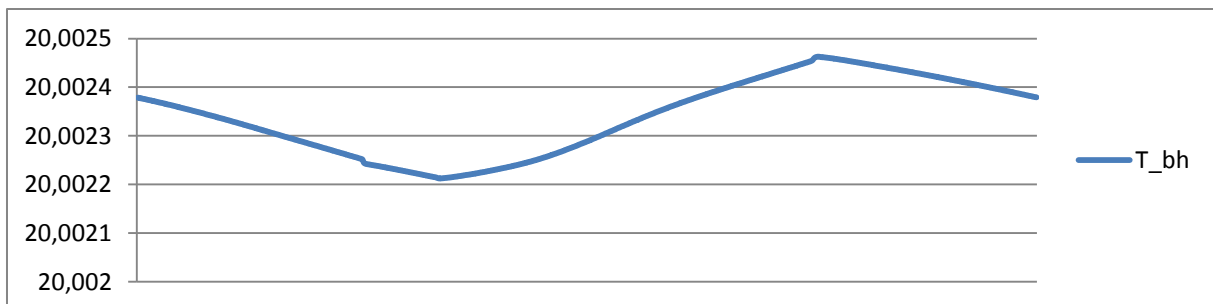
Data fra simulering i kapittel 6.1.1 blir i varmebalanseligningen 4.6 brukt til å predikere en overflatetemperatur som kunne bli sammenlignet med verdien gitt av EnergyPlus.  $T_{bh\_test}$  er temperaturen gitt av ligning 4.6.

Figur 55 viser tydelig at den matematiske modellen gir et mer dynamisk resultat med større endring i himlingstemperaturen.



Figur 55 Aluminiumshimling: Sammenligning av resulater fra EnergyPlus og ligning 4.6 den 21. november 00:00-24:00

Figur 56 viser dynamikken i himlingen gitt av EnergyPlus som nesten ikke er eksisterende med en temperaturendring på 0,0001 i løpet av dagen.



Figur 56 Aluminiumshimling: Dynamikk i himling gitt av EnergyPlus den 21. november 00:00-24:00

I figur 57 kan man se at temperaturen fra den matematiske ligningen har samme konjunktur som kontortemperaturen, men at den er forskjøvet. Intuitivt skulle bunnen av himlingen ligge en plass mellom temperaturen i kontoret og plenumet.



**Figur 57 Aluminiumshimling: Sammenligning av av romtemperaturen og overflatetemperatur gitt av varmebalanse**

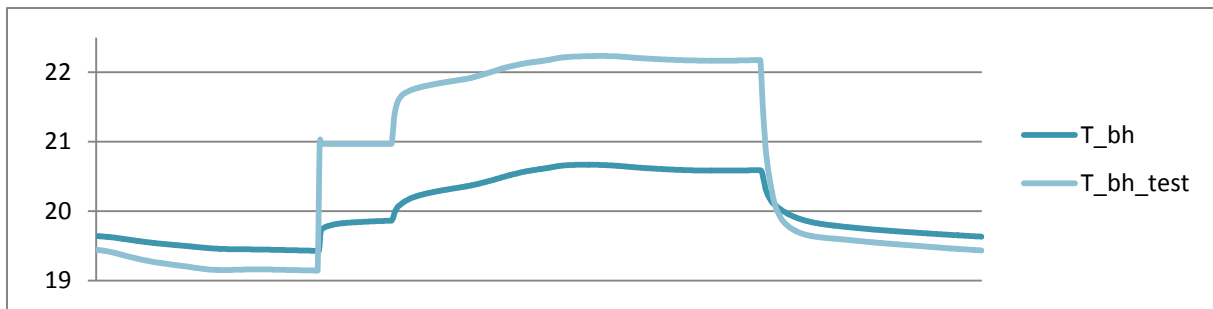
### Kommentar

Det er tydelig at det er noe EnergyPlus ikke forstår med oppsettet av plenumskammer som har aluminium som grenser til rommet. Det er ikke tatt hensyn til stråling i den matematiske ligningen som også vil gi et utslag på varmebalansen.

### **7.1.2 Standard himling**

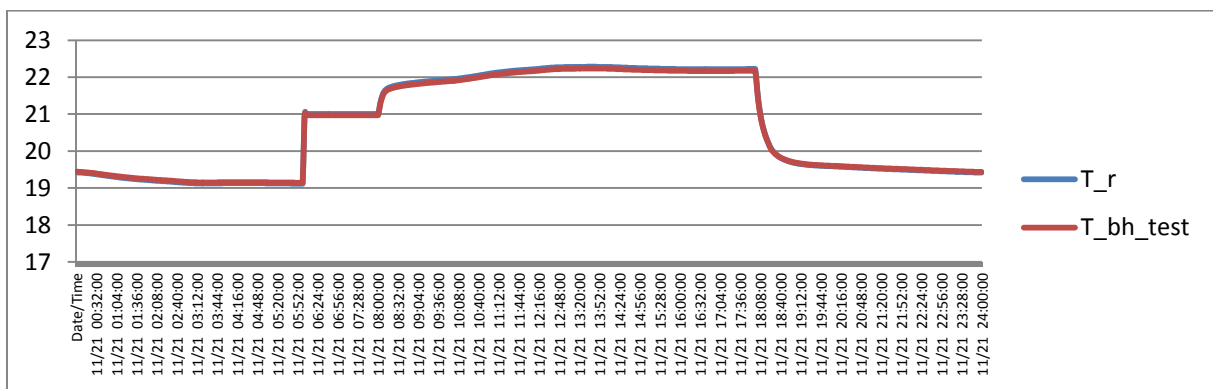
Data fra simulering 6.1.2, løsningen med isolasjonen i himlingen, er blitt anvendt sammen med samme varmebalanseligning,

Figur 58 viser en mindre og mer realistisk respons på forholdet mellom resultater fra EnergyPlus og resultatet fra den matematiske modellen. Det er mer dynamikk i resultatet fra simuleringen og kurven fra den matematiske modellen følger kurven gitt av verdier fra EnergyPlus. Temperaturforskjellen skyldes trolig utelatelsen av stålingsbidraget i den matematiske modellen.



**Figur 58 Standard isolasjonshimling: Sammenligning av resulater fra EnergyPlus og fra ligning 5.6 den 21.november 00:00-24:00**

Figur 59 viser at resultatene fra den matematiske modellen holder omtrent den samme temperaturen som romtemperaturen. Dette er et resultat som intuitivt gir mening siden stråling er utelatt. Varmeoverføringsevne til isolasjonen er svært lav derfor vil himlingstemperaturen ligge omtrentlig på romtemperaturen.



**Figur 59 Standard isolasjonshimling: Sammenligning av av romtemperaturen og overflatetemperatur gitt av varmebalanse**

### Kommentar

Modellen med isolasjon i himlingen gir et mer realistisk og intuitivt bilde på en forventet oppførsel av himlingstemperaturdynamikken.



## 8 Diskusjon

### 8.1 Diskusjon omkring best og verst, energi- og effektbehov og termisk komfort

Det vil her bli gjennomgått enkle påstander om de ulike løsningene som forklares ved hjelp av grafene og diagrammene fra kapittel 7 som inneholder resultatene fra de ulike simuleringene.

#### *Aluminiumshimling vil gi best termisk komfort.*

Aluminiumshimlingen viser seg å takle det største kjølebehovet best, både den kaldeste dagen med et stort soltilskudd og den varme sommerdagen. Fra figur 28 og fra kommentarene til figuren kan man se at den har de laveste operative temperaturene som ikke overstiger 26°C noen av dagene.

Det kan også ses på oppnådd settpunktstemperatur i løpet av året i figurene 53 og 54 at løsningen vil klare å nå lufttemperatur på 24°C alle dager og bare har 3,88 timer der temperaturen ikke er nådd med hensyn til oppvarming

#### *Aluminiumshimling vil ha den laveste energibruken.*

Figur 45 viser at energibruken til aluminiumshimlingen gir den laveste energibruken av de tre løsningene med 82,69 kWh/m<sup>2</sup>. Dette er 12 % mindre enn løsningen med isolasjon i himlingen og 3 % mindre enn løsningen med isolasjon i taket. Fra figur 46 til 51 kan man se at hovedgrunnen til dette er mindre kjølebehov. Dette påvirker også energibruken til vifte- og pumpeenergien da kontoret er ventilasjonskjølt.

#### *Standardhimlingen vil gi minst effekt- og oppvarmingsbehov.*

Figur 48 og 51 viser at oppvarmingsbehovet for løsningen med standardhimling er lavest på 2,53 kWh/m<sup>2</sup>, noe som er 25 % lavere enn aluminiumshimlingen. Tallet for oppvarmingsbehov er dog svært lavt, så en endring på bare 0,6kWh/m<sup>2</sup> tilsvarer 25 %. På grunn av dette er ikke prosentene helt representative.

Figur 32 sammenligner effekten på ovnen på de tre dagene og viser at løsningen med isolasjon i himlingen klarer seg med 25 W mindre enn de to andre den kalde dagen uten soltilskudd.

Hovedårsaken til dette er trolig at romvolumet blir mindre siden himlingsvolumet er isolert fra rommet og derfor vil kreve mindre effekt på grunn av dette.

### ***Standardhimling vil gi dårligst termisk komfort på sommerstid.***

Standardhimlingen kommer dårligst ut med hensyn til termisk komfort. Dette kan ses i figur 28 som sammenligner operative temperaturer. På den varme sommerdagen vil den operative temperaturen overstige 26°C nesten hele dagen og blir 25,5°C den kaldeste dagen i året.

Det er flere årsaker til dette. Den første årsaken kan ses fra figur 28 hvor man ser at forskjellen mellom kontortemperaturen ved dagens start er 3°C høyere for denne løsningen enn for aluminiumshimlingen. Den neste, som kan ses fra figur 29 som sammenlikner varmekraften til himlingen, er at fluksen til himlingen er 7,5W/m<sup>2</sup> mindre for denne løsningen, enn løsningen med aluminium. Dette tilsier at løsningen vil fjerne cirka 75 W mindre overskuddsvarme. I figur 30 kan det observeres at forskjellen i overflatetemperatur er 1°C høyere enn løsningen med aluminium. Dette fører til en tilluftstemperatur som er 1,25°C høyere enn aluminiumsløsningen.

### ***Standardhimlingen vil ha den høyeste energibruken.***

Energibruken til standardhimlingen er den høyeste fordi den vil streve mest med å nå settpunkt for kjøling. I det forrige punktet ble det konstatert at denne løsningen hadde de høyeste kontortemperaturene, noe som vil føre til at viftene må jobbe mer og dermed fører til et større effektbehov på kjølebatteriene fordi den er avhengig av luftmengden. Dette er også illustrert i grafen i figur 31 som sammenligner luftmengder.

### ***Isolasjon plassert i taket vil gi de laveste tilluftstemperaturene inn til kontoret.***

Denne løsningen kan grovt sett sammenlignes med en løsning med tilluftskanalen direkte koblet inn til kontoret. Isolasjonens termiske egenskaper vil føre til tilluftstemperaturer i denne løsningen ikke er like avhengig av overflatetemperaturen i takdekket. Tilluftstemperaturen og overflatetemperaturene kan ses i figur 30 og viser at denne løsningen er minst affektert av termisk nedbrytning.

### ***Isolasjon plassert i taket vil føre til den høyeste energibruken til oppvarming.***

Fra figur 51 kan man se at løsningen med isolasjon plassert i taket vil gi den høyeste energibruken til oppvarming. Grunnen til dette er trolig at betongen ikke lenger er eksponert i taket noe som fører til at rommet ikke lenger klarer å utnytte den lagrede varmen i dekket på vinterstid.

## 8.2 Sentrale spørsmål om materialer, plassering, overflatetemperaturer og energibruk

### *Hvor stor påvirkning har materialet i himlingen?*

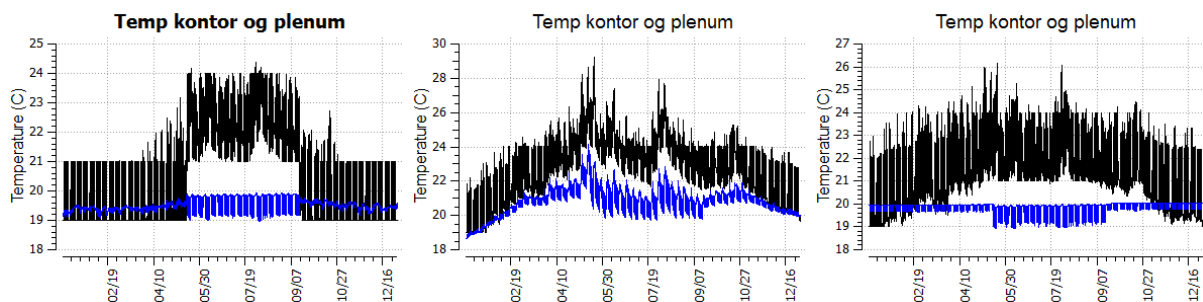
Materialet i himlingen har vist seg å ha stor påvirkning både med hensyn til den termiske komforten og energibruken da den totale energibruken er avhengig av energibruken til viftene og kjølebehovet. Den totale energibruken er derfor avhengig av den termiske komforten siden alle løsningene vil prøve å nå settpunkt for kjøling og oppvarming.

### *Hvor stor effekt har overflatetemperaturen i taket på tilluftstemperaturen inn til kontoret?*

Overflatetemperaturen i plenumet har veldig stor innvirkning på tilluftstemperaturen til kontoret. Dette var spesielt synlig i casene med varmluftsoppvarming med aluminiumshimling, vist i figur 26, hvor tilluftstemperaturen var 35°C inn i plenumet og overflatetemperaturen var 20,5°C. Tilluftstemperaturen inn i kontoret ble 22,5°C, noe som er en senkning av tilluftstemperaturen på 12,5°C, og overflatetemperaturen i taket økte med kun 1°C. Dette illustrerer hvor tregt materialet betong er og hvor stor innvirkning dette har på tilluftstemperaturen inn i kontoret. Dette forklarer hvorfor varmluftsoppvarming ikke fungerer.

Overflatetemperaturen i caset med isolasjon i himlingen har høyere temperaturer enn de to andre casene. Dette fører til at tilluftstemperaturen blir høy, og dette caset er det eneste som ikke klarer å holde lufttemperaturene under 26°C den varme sommerdagen.

Grunne til at overflatetemperaturen i løsningen med isolasjon i himlingen blir høye kan ses i figur 60 som viser den årlige temperaturutviklingen for kontoret og plenumet. Grafen i midten viser løsningen med isolasjon i himlingen som akkumulerer varme i løpet av første vinterperiode. Dette er trolig fordi isolasjon hindrer varmetransport opp i betongdekket noe som vil føre til en gradvis økning av temperaturene i kontoret og plenumet.



**Figur 60** Årlig temperaturutvikling for kontoret (svart kurve) og plenumet (blå kurve) for de tre løsningene fra venstre Aluminiumshimling, standard isolasjon i himling og isolasjon i taket

### ***Hvorfor ble energibehovet til oppvarming så lavt?***

Dette skyldes at kontoret er sydvendt og faktumet at det er konstant tilstedeværelse. Det ble derfor gjort en simulering hvor kontoret var nordvendt og en simulering med det andre bruksmønsteret som er illustrert i figur 61. I vedlegg 5 kan resultatet av sammenligningen mellom disse ses. I det nordvendte kontoret vil energibruken til oppvarming stige med en faktor på 2,6, mens kjølebehovet vil bli redusert med en faktor på 2,75. Et mer dynamisk bruksmønster vil bidra til en økning i oppvarmingsbehovet med en faktor på 2 og også øke kjølebehovet med en faktor på 1,06.

## **8.3 Usikkerheter**

### ***Hvilke usikkerheter er det i modellene?***

- Aluminiumshimlingens manglende dynamikk virker inn på resultatene av den årlige energibruken.
- Energibruken er veldig lav – Det kan være andre årsaker til dette som er blitt oversett.
- Varmeluften blir trolig mer nedkjølt enn den burde, siden resultater fra en fullskalatest av et plenumskammer i et UFAD-system, viste at en økning av tilluftstemperaturen fra 22°C til 32°C kort tid etter førte til en økning på 4°C til tilluftstemperaturen inn i kontoret (Fujita and Tomiie 1999).

## 9 Konklusjon

Varmluftsoppvarming fungerer ikke i et plenumbasert system i taket fordi.

- Krever en femdobling i effekt til oppvarming sammenliknet med konvensjonell oppvarming. Med tilluftstemperaturer inn i plenum på 35°C resulterte dette i en tilluftstemperatur inn i kontoret på 22,5°C. Settpunkt på 21°C ble ikke nådd en relativt kald dag uten soltilskudd.
- Varmen absorberes i den eksponerte betongen i dekket og bidrar med en temperaturøkning i betongoverflaten på 1K, noe som er vanskelig å utnytte.
- Konveksjonskonstanten i taket blir høy grunnet et lite luftvolum i kombinasjon med store temperaturforskjeller mellom overflate- og lufttemperatur. Dette gir en høy varmeoverføring i taket.
- Det fører til unødvendig høy energibruk sammenliknet med et system som bruker en konvensjonell varmekilde plassert i kontoret.

Et plenumbasert system uten varmluftsoppvarming er sensitivt i forhold til materialet mellom plenum og rom, og hvorvidt det er eksponert termiske masser i taket. Derfor ble 10 mm isolasjon plassert to forskjellige steder, mellom plenumet og kontor, og i taket. Resultatene viste da at -

- Aluminiumshimling med eksponert termisk masse i taket vil gi den beste termiske komforten og den laveste energibruken. Den operative temperaturen oversteg ikke 26°C og lufttemperaturen oversteg ikke 24,5°C. Den totale årlige energibruken var 82,69 kWh/m<sup>2</sup>, noe som var 12 % lavere enn løsningen med standard isolasjonsplater mellom kontor og plenum.
- Isolasjon mellom plenum og kontoret vil gi det dårligste innklimaet og den høyeste energibruken. Den operative temperaturen vil overstige 27°C og lufttemperaturen vil overstige 26,5°C. Den totale årlige energibruken var 94,32 kWh/m<sup>2</sup>.
- Aluminiumshimling med isolasjon plassert i taket vil gi en relativt god termisk komfort og en lav energibruk. Den operative temperaturen vil overstige 26°C og er den mest sensitive når det gjelder tilført effekt i form av indre laster og passivt tilskudd som vil føre til den hurtigste temperaturstigningen. Energibruken var 85,18 kWh/m<sup>2</sup>, noe som var kun 3 % lavere enn løsningen uten isolasjon i taket.

Svakheter i simuleringsverktøyet EnergyPlus ble også oppdaget. Materialer som aluminium med veldig høy konduktivitet ble vist å oppføre seg lite dynamisk under simulering. Sammenligne av resultater fra EnergyPlus og en enkel matematisk varmebalanse som brukte verdier fra programmet til å predikere overflatetemperaturen viste ulik oppførsel av overflatetemperaturen i

himlingen. Dette skyldes trolig konvergensproblemer med aluminiumen på grunn av den høye konduktiviteten. For å simulere slike materialer trengs ofte lave tidsskritt og EnergyPlus kan ikke sette dette lavere enn 60 sekunder. På denne tiden kan det skje mye for et materiale med disse karakteristikene.

## **10 Anbefalinger til videreføring av arbeid**

En validering av simuleringsresultatene er en naturlig videreføring av dette arbeidet. Dette kan gjøres ved hjelp av målinger i Statens Hus for å sammenligne med resultatene fra simuleringen. Slike målinger kunne også bidratt til å avdekke hvordan aluminiumshimlingen oppfører seg under drift og hvorvidt simuleringsresultatene med aluminiumshimling er valide.

I forhold til varmluftsoppvarming i systemet hadde det vært interessant å utføre en CFD simulering av plenumskammeret for å undersøke hvordan luftstrømningen er i plenumet. Simuleringen kunne også brukes til å evaluere hvordan konveksjonskoeffisienten vil endres seg i plenumskammer.

En fullskala testtrigg kan utvikles for å utføre mange målinger på. Blant annet av overflatetemperaturen i aluminiumshimlingen, de termiske massene i taket, faktiske tilluftstemperaturer inn til kontoret osv. Disse målingene kunne blitt brukt til å utvikle et simuleringsverktøy som tar hensyn til aluminiumens lave konduktivitet, siden energisimuleringsprogrammer ikke klarer å håndtere dynamikken på grunn av begrensninger på tidsskritt.

Det hadde også vært interessant å undersøke muligheten for å bruke et slikt plumbasert tilluftssystem i kombinasjon med et TABS-system (Thermally Active Building Structure) som styrer overflatetemperaturene i betongdekket i taket. Dette er på grunn at simuleringen viste at tilluftstemperaturen inn i kontoret var veldig avhengig av overflatetemperaturen i taket.





## 11 Referanser

Arbeidstilsynet (2003). "Veiledning om klima og luftkvalitet på arbeidsplassen".

Aschehoug, Q., M. Aune, et al. (2007). ENØK i bygninger: effektiv energibruk. Oslo, Gyldendal undervisning.

Bauman, F., H. Jin, et al. (2006). Heat transfer pathways in underfloor air distribution (UFAD) systems.

bygg.no. "Statens Hus Stavanger." from <http://www.bygg.no/prosjekter/statens-hus-stavanger>.

Clarke, J. A. (2001). Energy simulation in building design. Oxford, Butterworth-Heinemann.

Crawley, D. B., J. W. Hand, et al. (2008). "Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs." Building and Environment **43**(4): 661-673.

Daniel E. Fisher, C. O. P. (1997). "Convective Energy and Heat Transfer Thermal Load in Building Calculations."

EnergyPlus "[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus\\_documentation.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_documentation.cfm)."

Fasadeforeningen, G. o. (2007). "Termisk inneklima." from <http://www.glassportal.no/flv/swf/1069/af1faaa27785f9cedbec09ed97af71a2/bcb69cd832cbff28d178fca0c5760942.swf>.

Feist, W., J. Schnieders, et al. (2005). "Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept." Energy and Buildings **37**(11): 1186-1203.

Fujita, H. and S. Tomiie (1999). "THERMAL STORAGE WITH CONCRETE SLAB OF PRESSURIZED PLENUM

IN UNDERFLOOR AIR DISTRIBUTION SYSTEM."

Ghiaus, C. and F. Allard (2006). "Potential for free-cooling by ventilation." Solar Energy **80**(4): 402-413.

Givoni, B. (1998). "Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. Part I: 1993 experimental periods." Energy and Buildings **28**(1): 25-32.

Hawes, D. W., D. Banu, et al. (1989). "Latent heat storage in concrete." Solar Energy Materials **19**(3-5): 335-348.

Holm, F. (2012). Samtale om varmluftsstrategi den 17.4.12.

Høseggen, R., H. M. Mathisen, et al. (2009). "The effect of suspended ceilings on energy performance and thermal comfort." Energy and Buildings **41**(2): 234-245.

Høseggen, R. Z. (2008). Dynamic use of the building structure - energy performance and thermal environment. Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, NTNU. **ph.d.**

Lee, K. H., S. Schiavon, et al. (2012). "Thermal decay in underfloor air distribution (UFAD) systems: Fundamentals and influence on system performance." Applied Energy **91**(1): 197-207.

Lee, K. H., S. Schiavon, et al. (2011). Lessons learned in modeling Underfloor Air Distribution system.

Mathisen, H. M. and R. Høseggen (2009). "Prøving av tilluftsløsning for Energi&miljø  
Konfidensiell rapport - Siteres med tillatelse av Forfatter og Energi&miljø ved Fridjoft Holm  
".

Mathisen, H. M. and R. Høseggen (2011). "Kjøling av yrkesbygg  
Konfidensiell rapport - Siteres med tillatelse av Forfatter og Energi&miljø ved Fridjoft Holm".

Meta "<http://www.meta.no/website.aspx?displayid=1234>."

Nilsson, P.-E. (2003). Achieving the desired indoor climate: energy efficiency aspects of system design. Lund, Studentlitteratur.

NS-EN15251 (2007). Inneklimaparametere for dimensjonering og vurdering av bygningens energiytelse inkludert inneluftkvalitet, termisk miljø, belysning, og akustikk.

Peperkamp and Vercammen (2009). "Thermally activated concrete slabs and suspended ceilings."

Pfafferott, J., S. Herkel, et al. (2003). "Design of passive cooling by night ventilation: evaluation of a parametric model and building simulation with measurements." Energy and Buildings **35**(11): 1129-1143.

Seppanen, O., W. J. Fisk, et al. (2006). Effect of temperature on task performance in office environment.

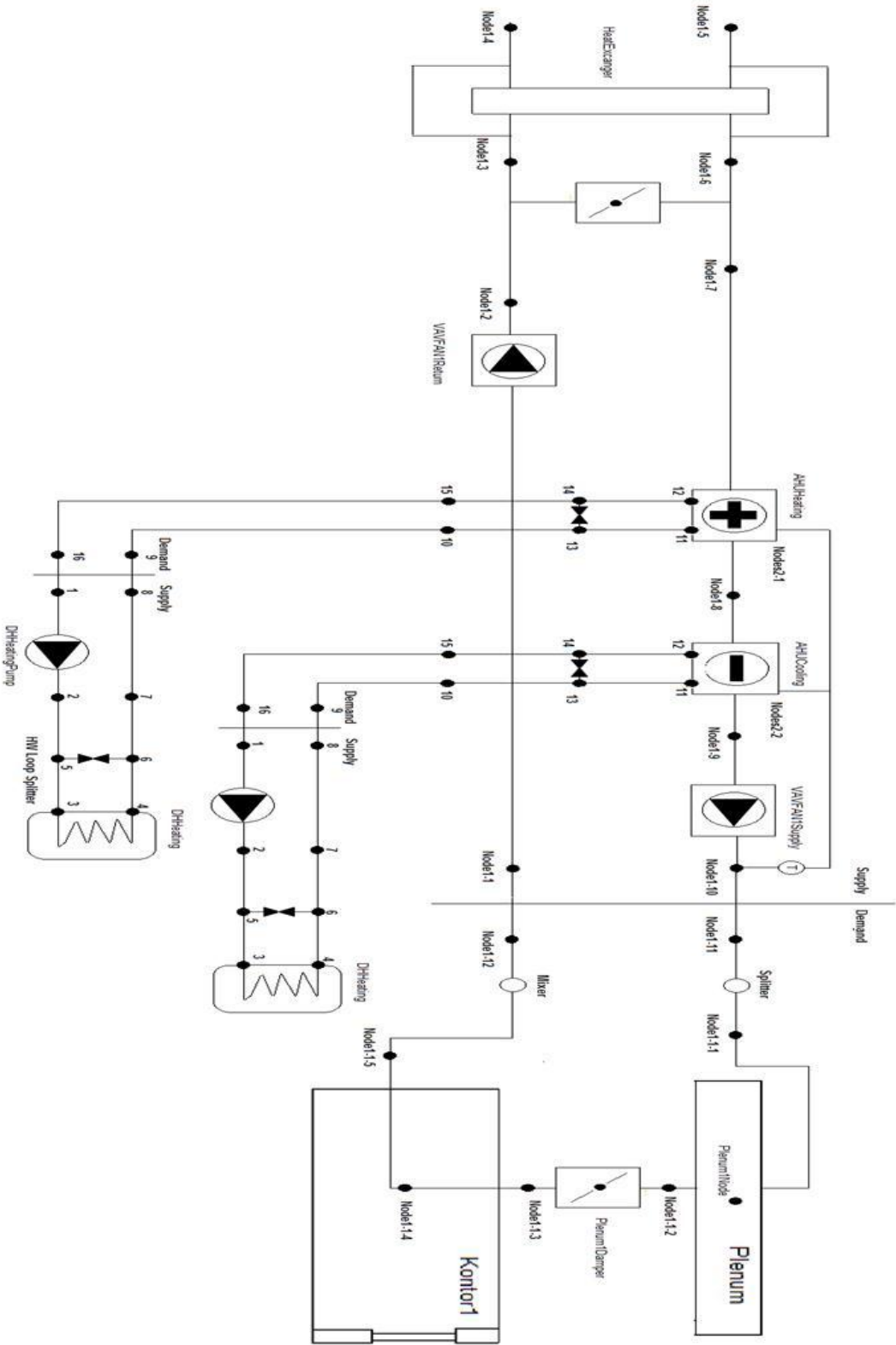
Thyholt, M., A. G. Lien, et al. (2001). Kartlegging av mekanisk kjøling i nye kontor- og forretningsbygg. Trondheim, SINTEF.

Tjelflaaten, P. O. (2011). "Forelesning i Klimateknikk - Romventilasjon."

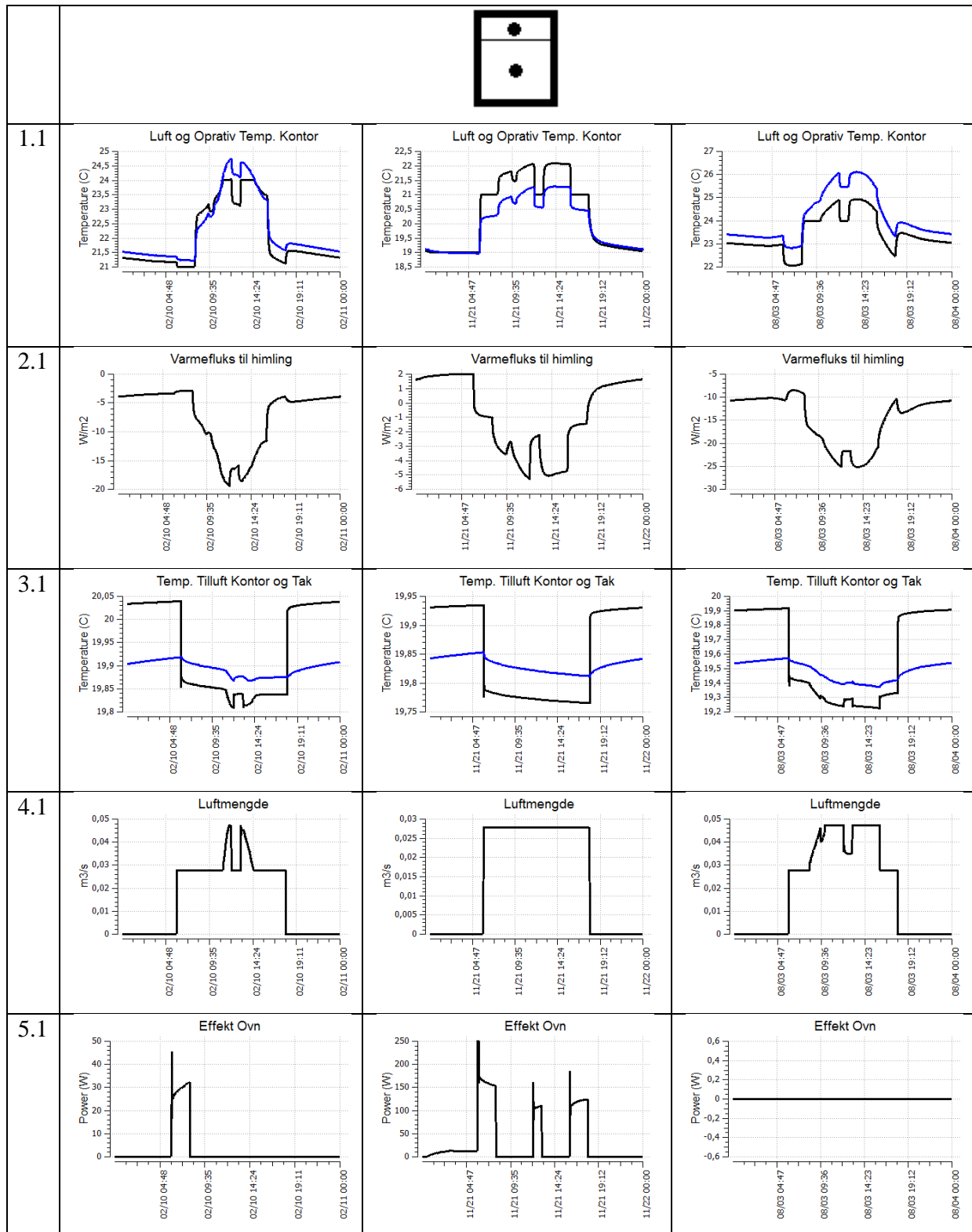
Yang, L. and Y. Li (2008). "Cooling load reduction by using thermal mass and night ventilation." Energy and Buildings **40**(11): 2052-2058.

# 12 Vedlegg

## Vedlegg 1 Systemskisse

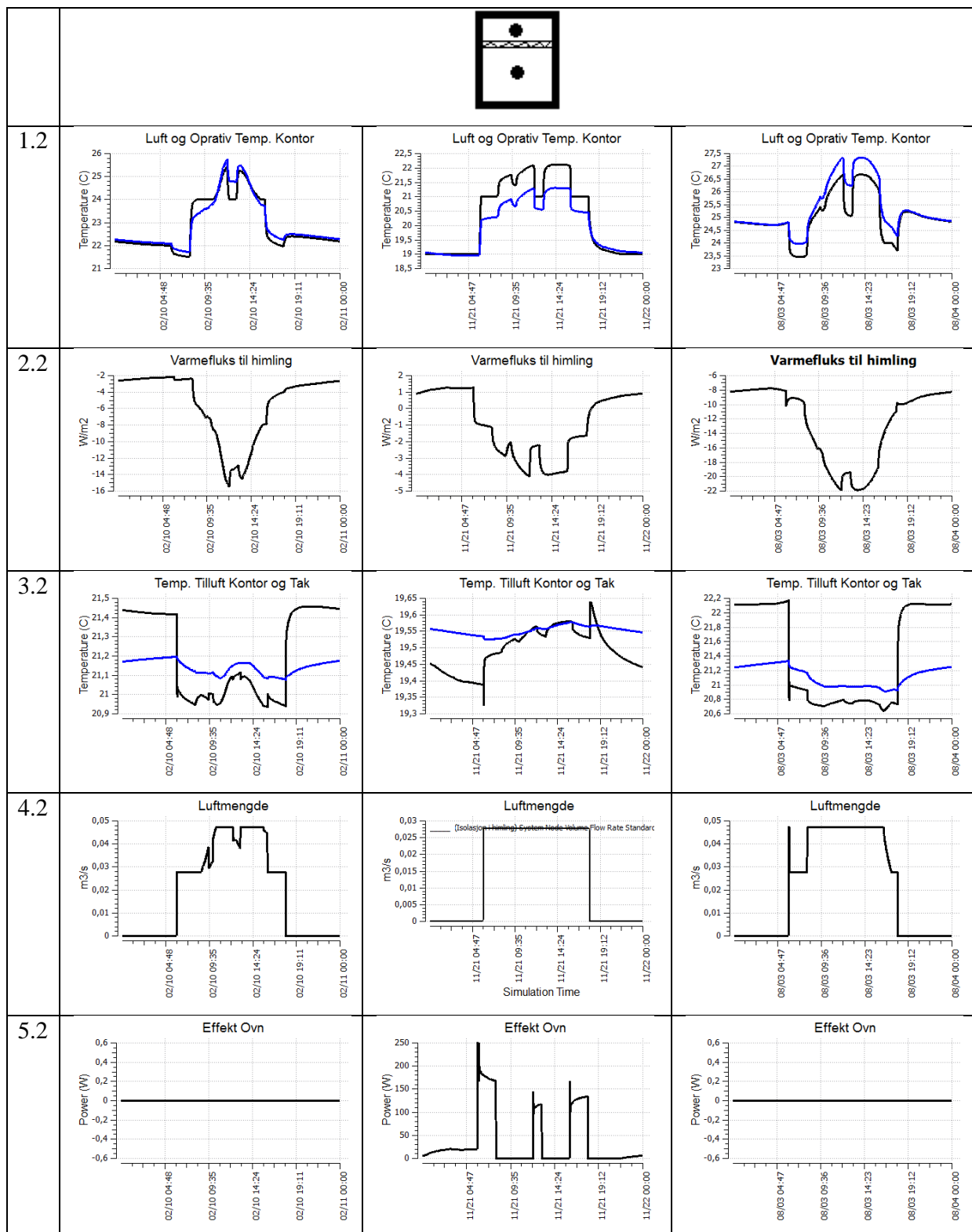


## Vedlegg 2 Lunsj aluminiumshimling



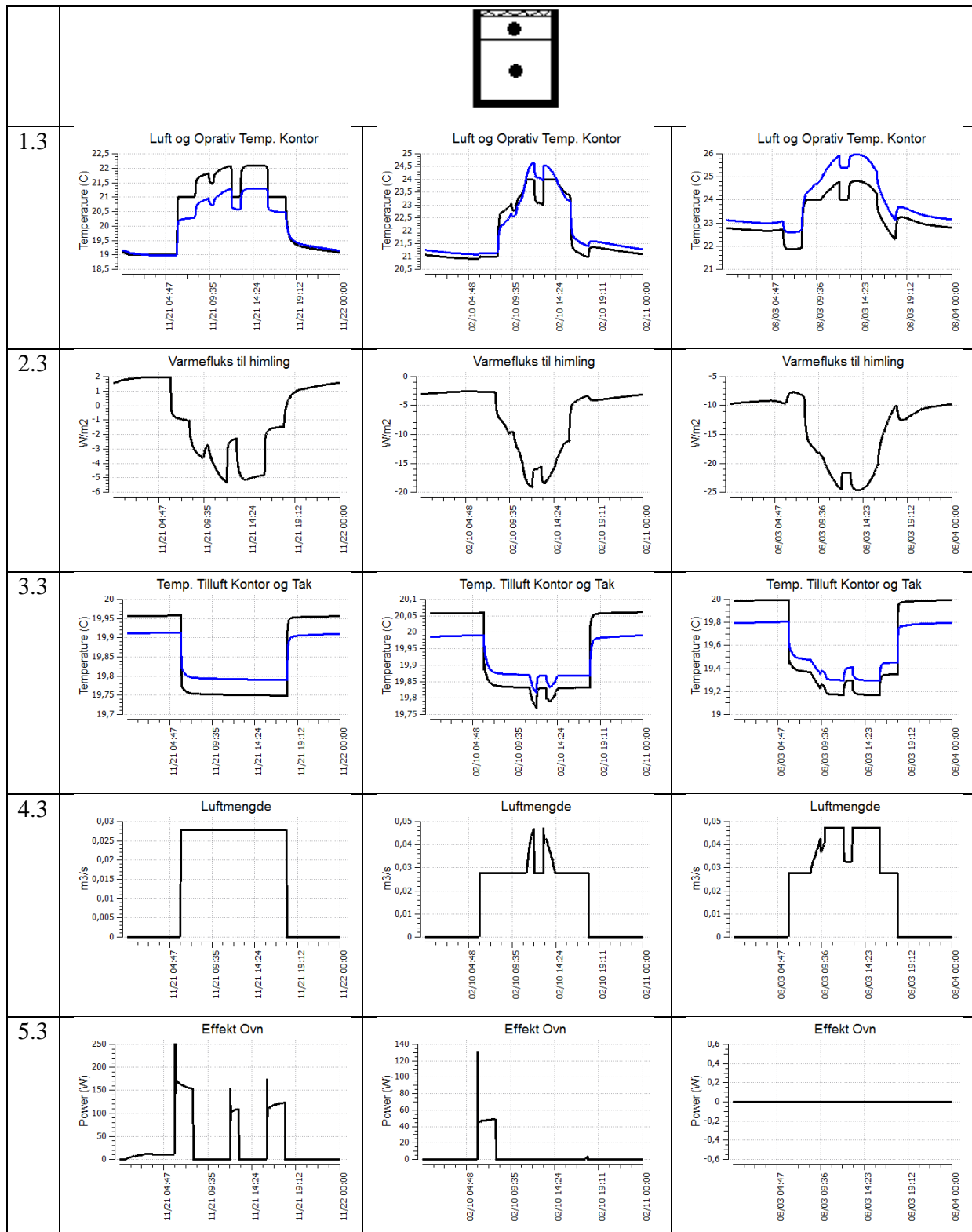
Aluminiumshimling med lunsjpause: Luft- og operativtemperatur, varmekraft til himling, tillufts- og betongtemperatur, luftmengde og effekt på ovn den 2.feb, 11.nov og 3.aug

### Vedlegg 3 Lunsj standard himling



Standard isolasjonshimling med lunsjpause: Luft- og operativtemperatur, varmekraft til himling, tillufts- og betongtemperatur, luftmengde og effekt på ovn den 2.feb, 11.nov og 3.aug

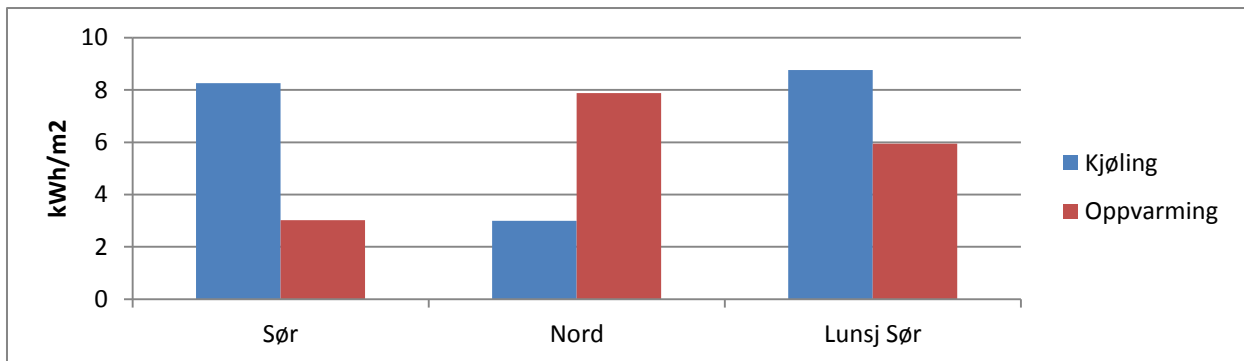
## Vedlegg 4 Lunsj isolasjon i tak



Isolasjons i taket med lunsjpause: Luft- og operativtemperatur, varmekraft til himling, tillufts- og betongtemperatur, luftmengde og effekt på ovn den 2.feb, 11.nov og 3.aug

## Vedlegg 5 Sammenligning av oppvarming og kjøling i sør- og nordvendt kontor, og med lunsj og uten lunsj

Figuren viser årlig energibruken til løsningen med aluminiumshimling når det er sørvendt, nordvendt og med annen bruksmønster som er gitt i figuren.



Figuren under viser forholdstall for endring av energibruken i forhold til det sørvendte kontoret.

