



**OsloMet – storbyuniversitetet**

**Institutt for Bygg- og energiteknikk – Energi og miljø i bygg**

Postadresse: Postboks 4 St. Olavs plass, 0130 Oslo

Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

GRUPPE NR.  
I

TILGJENGELIGHET  
Åpen

Telefon: 67 23 50 00

www.oslomet.no

# MASTEROPPGAVE

TITTEL	DATO
<i>Numerisk og eksperimentell vurdering av varmelagring i forskjellige materialer; PCM, betong og massivtre.</i>	22/05/18
	ANTALL SIDER / ANTALL VEDLEGG
FORFATTERE	VEILEDER
Kristan Åstvedt	Dimitrios Kraniotis

UTFØRT I SAMMARBEID MED	KONTAKTPERSON
Norconsult	Trond Thorgeir Harsem

## SAMMENDRAG

Ved å bruke termiske masser og faseendingsmaterialer vil temperatur i et rom gi et jevnere temperaturforløp og lavere varmetopper, denne oppgavens hovedformål er å sammenligne operativ temperatur ved forskjellige oppsett med betong og PCM både eksperimentelt og med numeriske metoder. Det ble utført 7 forskjellige eksperimenter i et klimarom, med følgende 7 forskjellige simuleringer. Betong ble hovedsakelig lagt på gulv og forskjellige mengder PCM ble plassert på forskjellige områder i klimarom. Sensorer ble plassert inne i klimarom samt utenfor for å føle omgivelses-, luft- og ventilasjonstemperatur. PCM brukt for eksperimentene hadde korrekt faseendring i løpet av én dag, men gjennom andre dag ble ikke PCM solidifisert, noe som førte til høyere operative temperaturer for dag 2. Resultatene for eksperimenter viser for alle 7 scenarier en lik tendens på grafer men med en forventet differanse i operativ temperatur spesielt på den varmeste perioden i løpet av en dag. Ved en reduksjon av tilluftstemperatur kombinert med tre termiske elementer, oppstod best ytelse og effekt for reduksjon av operativ temperatur i klimarom. Sammenligning mellom betong og PCM på gulv viste et jevnere temperaturforløp og en redusert toppunktstemperatur andre dag for kontoret med betong på gulv.

## 3 STIKKORD

Varmelagring

Termisk masse

Numerisk/eksperimentell metode

## Forord

### Samarbeid

Denne oppgaven er utført i samarbeid med OsloMet-Storbyuniversitetet (Oslo Metropolitan University) og Norconsult. Norconsult er et rådgivende firma som ble etablert i 1929, og er nå et av de ledende rådgivende firmaer i Norden. OsloMet og Norconsult samarbeider i henhold til FoU prosjekter for øyeblikket og prosjektets tilknytning til Norconsult omhandler materialer brukt i oppgaven som betong og varmemolier.

Masteroppgaven er skrevet ved HiOA (Høgskolen i Oslo)/ OsloMet Storbyuniversitet året 2018.

Vil takke Dimitrios Kraniotis, Habtamu B. Madessa og Tor Arvid Vik for veiledning og støtte gjennom prosessen. En takk rettes til Trond Thorgeir Harsem og Sondre Åsebø fra Norconsult for veiledende møter. Vil også rette en takk til Norconsult for material kostnader.

Ønsker også å rette en takk til Dimitrios Zeggini, PhD stipendiat fra Aristotle university of Thessaloniki for godt samarbeid vedrørende eksperimenter. En takk rettes Øystein Andersen, senioringeniør og laboratorium ansvarlig. En siste takk rettes Håkon R. Solberg og Ottar S. Øvrevik, medstudenter med bakgrunn henholdsvis for elektronikk og gjeldende laboratorium, for veiledning vedrørende laboratoriearbeid.

## Innholdsfortegnelse

Forord.....	2
Samarbeid .....	2
Innholdsfortegnelse .....	3
Nomenklatur .....	4
Figurliste.....	6
Tabelliste.....	7
Sammendrag.....	8
Abstract.....	10
Innledning .....	12
Bakgrunn .....	12
Hensikt.....	12
Problemstilling.....	13
Begrensninger .....	13
1. Teori.....	15
1.1. Forskrifter.....	15
1.2. Energibalanse.....	15
1.2. Energieffektivisering ved bruk av passive tiltak.....	17
1.3. Varmelagring.....	18
1.3.1. Varmetransport ved varmeledning, konveksjon og stråling.....	20
1.3.2. Fukt transport.....	21
1.3.3. Termisk ytelse .....	21
1.3.4. Latent og følbare varme.....	22
1.3.5. Latent varme, PCM og hygroskopiske materialer .....	24
2. Metode .....	25
2.1 Klimarom geometri og egenskaper .....	25
2.1.1. Klimarommets geometri .....	26
2.1.2. Materialer og utstyr .....	28
2.2. Eksperimenter .....	33
2.2.1. Eksperimentelt oppsett.....	33
2.2.2. Eksperimentelle caser .....	37
2.3. Numeriske metoder .....	40
2.3.1. Simuleringer .....	40
3. Resultater & Diskusjon .....	44

3.1.	Eksperimenter .....	44
3.1.1.	Sammenlignbare scenarioer: Eksperiment .....	45
3.2.	Sammenligning av numeriske og eksperimentelle resultater .....	52
3.3.	Simulering av massivtre mot betong og PCM .....	61
4.	Konklusjon .....	65
5.	Referanser .....	67
6.	Vedlegg .....	68
6.1.	Vedlegg 1 – Easyview10 resultater .....	68
6.2.	Vedlegg 2 – Eksempel på verdier brukt for beregning av operativ temperatur ...	75
6.3.	Vedlegg 3 – Operativ temperatur/ omgivelsestemperatur/ tilluftstemperatur ...	76
6.4.	Vedlegg 4 – Differanse verdier for operativ temperatur .....	83
6.5.	Vedlegg 5 - Nøyaktighet .....	86

## Nomenklatur

Forkortelse	Enhet	Beskrivelse
$\Delta E_{\text{System}}$	W	Energi inn i system
$E_{\text{in}}$	W	Energi ut av system
$E_{\text{out}}$	W	Endring av energi i system
Q	W	Varmeoverføring
$\dot{Q}$	W	Varmestrøm
W	W	Arbeidsoverføring
$E_m(m)$	W	Overføring av energi ved masseflyt
$\Delta U$	J	Endring av intern energi
m	kg	Masse
$\dot{m}$	kg/s	Massestrøm
h	J	Entalpi
H	J/m <sup>3</sup>	Total entalpi
<b>h</b>	-	Koeffisient for konvektiv varme transport

$h_v$	J/kg	Latent varme ved faseendring
$c_p$	J/kgK	Spesifikk varme
$T_n$	°C	Temperatur av n
$T_1$	°C	Temperatur ut/slutt
$T_0$	°C	Temperatur inn/start
$T_s$	°C	Overflate temperatur
$T_\infty$	°C	Temperatur av væske/gass langt nok borte til ikke å bli påvirket av overflate temperatur.
$T_a$	°C	Lufttemperatur
$T_{op}$	°C	Operativ temperatur
MRT	°C	Mean radiant temperature; gjennomsnittlig strålings temperatur
$F_{p-n}$	-	Vinkel faktor mellom person og overflate
$A_s$	$n^2$ <small>n=cm, dm, m.....</small>	Overflate areal
$k$	W/mK	Termisk konduktivitet/ledningsevne
$D_w$	Pa*s	Kinematisk viskositet
$D_\varphi$	kg/ms	Væske ledning koeffisient
$H$	J	Entalpi for fuktig material
$h_w$	J	Entalpi ved vann damp
$p$	Pa	Partialtrykk vanndamp
$p_{sat}$	Pa	Mettet vanndampstrykk
$t$	s	tid
$u$	l	Vanninnhold
$\delta$	$m^2/s$	Diffusjonskoeffisient
$\lambda$	W/mK	Varmekonduktivitet fuktig material
$\mu$	kg/msPa	Resistans mot dampdiffusjon ved tørr tilstand
$w$	kg/m <sup>3</sup>	fuktinnhold

$\phi$	kgPa/kgPa	Relativ fuktighet
$\delta_p$	Kg/msPa	Fukt permeabilitet
$\sigma$	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	Stefan-Boltzmann konstant, $\sigma=5,670 \times 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
$\varepsilon$	-	Emissivitet for overflater, $0 \leq \varepsilon \leq 1$

## Figurliste

Figur 1. Enkel skisse med noen eksempler av passive løsninger. ....	18
Figur 2. Noen eksempler på aktive og passive systemer i henhold til varmelagring. ....	19
Figur 3. Temperatur buffering med faseforskyvning. ....	22
Figur 4. Latent og følbare varme fra solid til væske. ....	23
Figur 5. Entalpi/Temperatur og varmeflyt graf. ....	24
Figur 6. Klimarom. ....	25
Figur 7. Vanlig Fresvik element. ....	26
Figur 8. SketchUp figur av klimarom. ....	27
Figur 9. Dimensjoner for klimarom. ....	27
Figur 10. Ventilasjonsaggregat med modifisert kjøler. ....	29
Figur 11. Til høyre: Settpunktstemperatur for driftstid til temperatur og luftmengde. Til venstre: Monitor for tilluftstemperatur. ....	29
Figur 12. Fra høyre til venstre: Tidsur, sammenkobling av tidsur og PLS-styrer, PLS styrer. ....	30
Figur 13. Sammenligning av kaldtvann fra bygg til kjøler. ....	30
Figur 14. Intab logger. ....	31
Figur 15. Termopar. ....	31
Figur 16. Pcm matte, betongheller og en del av varmematier. ....	32
Figur 17. Plassering av betongheller og internlast. ....	32
Figur 18. Varighet for klimatisering og eksperimenter. ....	34
Figur 19. Foliekit fra elektroimportøren. ....	35
Figur 20. Driftstider for internlast og solstråling. ....	36
Figur 21. Plassering av termopar. ....	37
Figur 22. Scenario 1 og scenario 2. ....	39
Figur 23. Scenario 3 og scenario 4. ....	39
Figur 24. Scenario 5a-b og scenario 6. ....	39
Figur 25 Entalpi/temperatur forløp for PCM i simuleringer. ....	42
Figur 26. Input i WUFI+ modeller. ....	43
Figur 27. Operativ temperatur for alle scenario. ....	44
Figur 28. Operativ temperatur scenario 1-3. ....	46
Figur 29. Operativ temperatur scenario 4,5a og 6. ....	48
Figur 30. Scenario 5a-b. ....	50
Figur 31. Operativ temperatur for alle simulerte scenario. ....	52

Figur 32. Scenario 1 simulert mot eksperiment.....	53
Figur 33. Scenario 2 simulert mot eksperiment.....	54
Figur 34. Scenario 3 simulert mot eksperiment.....	55
Figur 35. Scenario 4 simulert mot eksperiment.....	56
Figur 36. Scenario 5a simulert mot eksperiment.....	58
Figur 37. Scenario 5b simulert mot eksperiment.....	59
Figur 38. Scenario 6 simulert mot eksperiment.....	60
Figur 39. Operativ temperatur for et termisk element på gulv. ....	61
Figur 40. Operativ temperatur for varianter med to termiske elementer, gulv og himling. ....	62

## Tabelliste

Tabell 1 Energi i et system .....	16
Tabell 2 Forskjellige TES systemer .....	19
Tabell 3 Oppbygning av Fresvik elementer i klimarom.....	25
Tabell 4. Egenskaper for stål og polyuretan i Fresvik elementer.....	26
Tabell 5. Nøyaktighet for logger og termoelementer.....	28
Tabell 6 PCM egenskaper.....	33
Tabell 7. Startforhold. ....	33
Tabell 8. Timetabell for klimatisering og eksperimenter.....	34
Tabell 9. Settpunkt for temperatur og luftmengder.....	35
Tabell 10. Tidspunkt og varmetilførsel ved bruk av varmemfolier. ....	36
Tabell 11. Varianter av scenarioer. ....	38
Tabell 12. Kritiske punkter. ....	44
Tabell 13. Differanser mellom scenario 1-3.....	46
Tabell 14. Differanser mellom topp og bunn punkt.....	46
Tabell 15. Differanser mellom scenario 4, 5a og 6. ....	48
Tabell 16. Differanser mellom topp og bunn punkt.....	48
Tabell 17. Differanse mellom scenario 5a-b. ....	50
Tabell 18. Differanse mellom topp og bunnpunkt.....	50
Tabell 19. Differanse mellom wufi og eksperiment S1. ....	53
Tabell 20. Differanse mellom wufi og eksperiment S2. ....	54
Tabell 21. Differanse mellom wufi og eksperiment S3. ....	55
Tabell 22. Differanse mellom wufi+ og eksperiment S4. ....	57
Tabell 23. Differanse mellom wufi og eksperiment S5a. ....	58
Tabell 24. Differanse mellom wufi og eksperiment S5b. ....	59
Tabell 25. Differanse mellom wufi og eksperiment S6. ....	61

## Sammendrag

Varmelagring er et velkjent fenomen som er blitt mye brukt. Denne oppgaven tar for seg hovedsakelig to elementer for varmelagring der det ene er betong og det andre er PCM. Oppgavens hovedformål er å sammenligne forskjellige oppsett med betong og PCM både eksperimentelt og med numeriske metoder. Det ble utført 7 forskjellige eksperimenter med følgende 7 forskjellige simuleringer.

Metode som er brukt kan oppsummeres kort i tre steg. Planleggingsfase, logistikk rundt utstyr/materialer og utførelsesfase. For planleggingsfasen ble det valgt hvilke startbetingelser og hvilke karakteristikk klimarommet skulle ha i henhold til tilluft, driftstider og størrelsesorden for internlaster/solstråling som skulle brukes gjennom de forskjellige eksperimentene. Det ble brukt et klimarom på OsloMet som eksperimentrom, der det ble festet sensorer på alle overflater, samt fem sensorer som målte lufttemperatur inne i rommet. Dimensjoner av klimarom ble målt under planleggingsfasen i tillegg. Dermed ble det naturlig å gå videre på størrelsesorden i henhold til materialer og utstyr som det var behov for. Under andre fase som omhandler logistikk for materialer, ble det satt opp en inventarliste over hvilke materialer skolen allerede hadde og det ble bestilt inn materialer det var behov for som betong, varmematerialer og manglende utstyr.

Den siste fasen omhandlet utførelse av eksperimenter og simuleringer. Denne fasen ble delt inn i henhold til de 7 eksperimentene som ble utført. For eksperimenter var det delt opp i 4 faser, 2 klimatiseringsfaser og to eksperiment faser, der klimatisering varte i ca. 30 timer og eksperiment fase varte i 41 timer. Hvert eksperiment varte i en periode på 72 timer hver, scenarioer hadde noe forskjell i timer i pre-klimatiseringsfase. Ved å bruke to klimatiseringsfaser, først en der tilluftstemperatur var satt til 12°C og andre klimatiseringsfase ble satt til 16°C ble en stor andel av PCM solidifisert over nevnte klimatiseringsfaser. Når alle målinger var utført ble det beregnet operativ temperatur ut fra sensorene på overflater og sensorer som følte lufttemperatur, disse ble igjen sammenlignet med simulerte verdier i henhold til operativ temperatur og en tidsperiode på 2 døgn.

En tendens oppstod ved forskjellig antall termiske elementer i henhold til første dag. I tilfellene med et termisk element, der klimarommet hadde betong på gulv og PCM på gulv, lå operativ temperatur ved tidspunkt 16:00 mellom 29°C til 28,65°C. For tilfellene med to og tre termiske elementer, der alle scenarioer hadde betong på gulv men to lag med PCM fordelt på vegg og himling, dobbelt PCM himlingslag og enkelt PCM himlingslag havnet den operative temperaturen klokken 16:00 mellom 26,74°C til 26,96°C.

Mellom første og andre dag kan en tydelig økning observeres i operativ temperatur ved tidspunkt 16:00. For alle scenarioer inntreffer denne økningen fra dag en til dag to, denne differansen er klart størst for scenarioet der PCM er lagt på gulvet. Det viste seg gjennom eksperimenter at det ikke ble kjølig nok i klimarom på natten mellom to eksperimentdager, noe som igjen påvirket faseendringen til PCM.

Når bare betong sammenlignes med PCM på gulv, har betong på gulv et jevnere temperaturforløp over hele eksperiment perioden i henhold til topp og bunnpunkter. For PCM er operativ temperatur lavere i løpet av natten enn for betong eksperimentet, men for dag 2 ser det ut som PCM ikke har solidifisert og topptemperaturen for dag 2 er likere referanse eksperimentet enn betong eksperimentet.

Resultatene for eksperimenter viser for alle 7 scenarioer en lik tendens på grafer men med en selvsagt differanse i operativ temperatur spesielt på den varmeste perioden i løpet av dagen. Den største differansen oppstår mellom referanse forsøket og scenario 5b, der oppsettet til scenario 5b er betong



på gulv, PCM på vegg og i himling, i tillegg er tilluftstemperatur konstant på 16°C. Ser en vekk fra referanse forsøket er det størst differanse mellom scenario 2 og scenario med tre termiske elementer og konstant tilluftstemperatur på 16°C. Der scenario 2 innebærer PCM kun på gulv men tilluftstemperatur er delt opp i 16°C utenfor driftstid og 19°C i driftstid. Hovedsakelig ble eksperimenter delt inn i tre grupper der scenario 1-3 var i en gruppe. Gruppe to besto av scenario 4, 5a og 6 og gruppe tre omhandlet scenario 5a og 5b. Av disse tre gruppene er det nesten ingen differanse ved temperatur i gruppe 2 mellom eksperimenter.

Ved sammenligning av simulering og eksperiment fulgte alle scenarioer samme tendenser men scenario 5a har en stor forskjell i operativ temperatur mellom 16:00 første eksperiment dag til 07:00 andre eksperiment dag. Ved tidspunktet 07:00 er det en prosentdifferanse på 7,74%. Alle toppunkter er innenfor en differanse for operativ temperatur under 5%. Scenario 3, 4, 5a og 6 har alle toppunkter under 3%. Når det gjelder bunnpunkter ligger scenario 1, 5a og scenario 6 over 5% temperatur differanse.

Simuleringer i WUFI+ ble utført for sammenligning mellom eksperimenter samt for å kunne studere andre termiske masser enn betong og i flere kombinasjoner som var fysisk mulig i klimarom. Seks tilleggs simuleringer er kjørt med tanke på betong/massivtre/PCM på gulv og i henhold til gulv & i himling. Disse simuleringene viste mest effektiv temperaturforløp for simulering med betong og relativt like operative temperaturer for PCM og massivtre. Ved sammenligning av en og to termiske masser observeres en reduksjon, størst for betong, på omtrent 2,7°C for begge temperaturtopper. PCM varianten hadde en reduksjon på 2,65°C og massivtre varianten viste en reduksjon av operativ temperatur på ca. 1,7°C.

## Abstract

Heat storage is a well-known phenomenon that has been widely used. This task involves mainly two materials to use as heat storage, one of which is concrete and the other is PCM. The main purpose of the assignment is to compare different layouts with concrete and PCM both experimentally and numerically. 7 different experiments were performed with the following 7 simulations.

The method used can be summarized in three steps. Planning phase, logistics around equipment / materials and execution phase. For the planning phase, it was chosen which initial conditions and what characteristics the climate room should have according to supply air, operating times and the magnitude of internal loads / solar radiation to be used throughout the different experiments. A climate room was used at OsloMet as an experimental room, where sensors were attached to all surfaces, as well as five sensors that measured air temperature inside the room. Dimensions of climate room were measured during the planning phase as well. Thus it became natural to proceed the order according to materials and equipment as needed. During the second phase of logistics for materials, an inventory was drawn up on what materials the school already had and which materials were needed like concrete, heat foils and missing equipment.

The final phase involved the execution of experiments and simulations. This phase was divided according to the 7 experiments that were performed. For experiments, it was divided into 4 phases, 2 climatic phases and two experimental phases, where climateization lasted for approx. 30 hours and experiment phase lasted 41 hours. Each experiment lasted for 72 hours each, scenarios had some difference in the hours used in pre-climate phase. By using two climatic phases, one where the supply air temperature was set to 12 ° C and the second climate phase was set to 16 ° C, a large proportion of PCM was solidified over the climatic phases. When all measurements were made, the operating temperature was calculated from the sensors on surfaces and sensors that felt air temperature, which were then compared to simulated values according to the operating temperature in the period of 2 days.

A tendency occurred when different number of thermal elements was introduced for the first day. In the case where one thermal element was present, where the climate room had concrete on floor and PCM on floor, operating temperature was at 16:00 between 29 ° C and 28.65 ° C. For the cases of two and three thermal elements, where all the scenarios had concrete on the floor but two layers of PCM distributed on wall and ceiling, double PCM ceiling layer and single PCM ceiling layer had a operating temperature at 16:00 between 26.74 ° C to 26.96 ° C.

Between the first and second day, a clear increase can be observed in operating temperature at 16:00. For all scenarios, an increase occurs from day one to day two, this difference is clearly greatest for the scenario where PCM is laid on the floor. Experiments showed that it did not get cool enough in the climate room at night between two experimental days, which in turn affected the phase change of the PCM.

When only concrete is compared to PCM on the floor, concrete on the floor has a smoother temperature course throughout the experiment period according to the top and bottom points. For PCM, operating temperature is lower during the night than for the concrete experiment, but for day

2 it appears that PCM has not solidified and the peak temperature for day 2 is equal to the reference rather than the concrete experiment.

The results for experiments show, for all 7 scenarios, a similar tendency of graphs but with a difference in operating temperature especially during the warmest period during the day. The biggest difference occurs between the reference test and scenario 5b, where the layout of scenario 5b is concrete on floor, PCM on wall and in ceiling, in addition, the supply air temperature is constant at 16 ° C. Looking away from the reference attempt is the greatest difference between scenario 2 and the scenario with three thermal elements and constant supply air temperature of 16°C. Where scenario 2 involves PCM on floor only, but supply air temperature is divided up to 16°C outside operating time and 19 ° C during operating time. Mainly, experiments were divided into three groups where scenario 1-3 were in a group. Group two consisted of scenarios 4, 5a and 6 and group three referred to scenario 5a and 5b. Of these three groups, for group 2 there is almost no difference in temperature between experiments.

By comparing simulation and experiment, all scenarios followed the same tendencies but scenario 5a has a big difference in operating temperature between 4:00 pm first experiment day to 7:00 second experimental day. At 7 o'clock there is a percentage difference of 7.74%. All peak points are within a difference of operating temperature below 5%. Scenario 3, 4, 5a and 6 have all peak points below 3%. In the case of bottom points, scenario 1, 5a and scenario 6 are above 5% temperature difference.

Simulations in WUFI + were performed for comparison between experiments and for studying thermal masses other than concrete and in several combinations that were physically possible in the climate room. Six additional simulations have been run in terms of concrete / solid wood / PCM on floor and according to floor & ceiling. These simulations showed the most effective temperature range for the simulation regarding concrete and showed relatively similar operating temperatures for PCM and massive wood. By comparing one and two thermal masses, a reduction, greatest for concrete, is observed at about 2.7 ° C for both temperature peaks. The PCM variant had a reduction of 2.65°C and the massive variant showed a reduction of operating temperature of approx. 1.7°C.

## Innledning

### Bakgrunn

Effektivisering av bygg har lenge blitt utført. De byggtekniske forskriftene har blitt strengere opp gjennom årene og det er viktig å følge disse ved nybygg og oppgradering av eksisterende bygg. Dagens forskrift ligger tett opp mot passivhus standarder, dermed må flere variabler tas hensyn til ved forskjellige prosjekter. Her finnes det flere strategier for å oppnå ønsket effekt, eksempler som varmegjenvinning, tettere bygnings skall, arealeffektivisering, naturlig ventilasjon, varmelagring; høyere termisk masse og utnyttelse av latent varme. Det finnes mange flere strategier, men tidligere nevnte er ganske mye brukt. I varmere land er det brukt mye betong for bygninger, grunnet den spesielle varme ytelsen til betong. Grunnen til dette er fordi betong tar opp varme gjennom dagen og gir fra seg denne energien når det blir kjøligere om natten, resultatet er en jevnere temperatur profil gjennom et døgn. Dette er en god og passiv løsning for mange land med tropisk klima.

I senere tid har det i Norge blitt mer populært å bruke betong spesielt i yrkesbygg på grunn av karakteristikken til betong, nemlig varmelagringsevnen. Dette fenomenet er blitt populært opp igjennom årene og det har i dagens samfunn blitt mer brukt forskjellige faseendringmaterialer også kjent som PCM (Phase Change Materials), enten i form av tepper/plater eller innkapslet PCM i for eksempel gips eller betong, for å utnytte latent varme (latent energi) i bygninger.

Mye kan gjøres for å nå målene til nyeste TEK (dags dato; TEK 17), som å holde temperatur jevn uten å bruke for mye energi til oppvarming eller kjøling. De fleste materialer har hygroskopiske og termiske egenskaper som gjør at de holder noe på fukt og temperatur. Ved å dekke til med et PCM lag, eller sette inn tunge termiske masser vil en sannsynligvis få utbedret virkning av disse variablene, temperatur vil jevnere bli opprettholdt i et rom grunnet prinsipp for latent varme.

### Hensikt

Varmelagring har vært brukt, ikke tiltenkt, siden mennesker begynte å lage hus av stein og tre. I dagens samfunn brukes gjerne betong som termisk masse tiltenkt for å utnytte varmelagringsevner til betong. Når det gjelder varmelagring finnes det mange alternativer både aktive og passive løsninger. En av flere passive løsninger er PCM, disse materialene vil i faseendring utnytte latent varme for en bedre utjevning av temperatur.

Når det gjelder betong har dette materialet en god evne til å holde på varme, og vil til en viss grad oppføre seg som et batteri som akkumulerer varme for så å gi det tilbake til omgivelser når temperaturen blir lav nok. Vil nytten til PCM være like framtreddende med høy nok termisk masse, vil PCM gi en tilleggende effekt som fører til en mer samspillende virkning mellom materialene og hvilke material posisjon gir best ønsket virkning over en dag. Dette er noen av spørsmålene som er relevant og framhevet i henhold til denne oppgaven.

I denne oppgaven blir det nøyere innsisert hvilke fordeler rom utformet med betong har, med og uten forskjellige PCM utforminger. Ved siden av eksperimenter skal det også utføres simuleringer i tråd med eksperimentene.

## Problemstilling

Målet med denne oppgaven er å både simulere og utføre eksperimenter i henhold til tunge materialer og PCM's evne som energireservoar. Ferdigstilt oppgave vil gi et svar på hvordan karakteristikken til betong og PCM er både i kombinasjon med hverandre og alenestående.

Ved å utføre eksperimenter og simuleringer kan resultatene sees opp mot hverandre mer helhetlig enn ved utførelse av kun eksperimenter eller numeriske verdier. Simuleringer kan valideres opp mot resultater hentet fra eksperimenter og med en god nok validering kan en videre se på flere scenarier ved simulering enn hva en kan og får tid til når det gjelder eksperimenter. Med en god nok validering kan simulering utnyttes for å få svar på om andre tunge materialer har gode og interessante resultater, som for eksempel massivtre.

Følgende problemstilling er stilt:

Gir PCM bedre ytelse enn betong, vil en økning av kvantitet av termiske masser/PCM øke ytelsen?

- Betong mot PCM; Vil det være gode nok resultater til å beholde et element framfor forskjellige elementer?
- Sammenligning av eksperimentelle resultater.
- Validering av numeriske og eksperimentelle resultater.
- Termisk masse der massivtre simuleres i WUFI+

## Begrensninger

I eksperimentene blir det brukt både internlast og andre realistiske variabler fra en ideell situasjon, som kan tidsstyres. Internlastene er simulert av varmemotstand, disse er tidsstyrt og slås på automatisk i forhold til økende kvantitet av solstråling eller når en tenkt arbeidsdag starter. Disse foliene er av/på og har en konstant varmestråling avgitt når de er på. Foliene er også fastsatt så de flyttes ikke rundt slik en person eller solinnstråling vil oppføre seg. Det brukes også ett kjølebatteri som trer i gang når temperatur føler i tilluftskanal blir for varm i henhold til settpunkts temperatur. Dette kjølebatteriet over og underestimerer ganske grovt i den første halvtimen den starter, for så å gi korrekt konvergent kjøling etter 30 minutter har passert. Ved spesielt varme døgn vil kjøling ha et større problem med å holde settpunkts temperatur.

Fysiske egenskaper til materialene klimarom er bygget opp av og er også en begrensning, her er det kun et begrenset datablad som hører med, med andre ord er det lite informasjon om de tilhørende fysiske egenskapene. Hovedsakelig er dette elementer fra fresvik bestående av aluminium, et lag polyuretan og et siste lag aluminium. For disse elementene vet vi sikkert u-verdi og statikk til elementene, men vi vet ikke om andre fysiske egenskaper som varmeledning o.l.

Ved simuleringer er det laget en egen klimafil basert på en typisk dag i Juni, denne bruker WUFI+ til alle simuleringer. WUFI+ har en stor database av forskjellige realistiske materialer, det finnes derimot ingen ren PCM i WUFI+. Dette fører til at en må bruke et kombinert material som består av både gips/PCM, dette er gjort og riktig temperatur/entalpi forhold er gitt til materialet. I tillegg er egenskapene utenom entalpi også noe endret. Disse egenskapene begrenses til fukt lagrings funksjon, flytende transport koeffisient for suging og redistribusjon. I tillegg er typisk innebygde fukt og

vanndamps diffusjons resistans endret, henholdsvis  $0 \text{ kg/m}^2$  og enhets løs 10000 {-} for vann damp diffusjons resistans. Selv med alle endringer utført vil ikke simulering ha en treffsikkerhet på 100% for tidligere eksperimenter, dog tendensene til grafene er lik.

For å finne operativ temperatur er det brukt termoelementer som måler overflate og lufttemperatur. Ved to av vegg overflatene inne i klimarom er det 1 sensor plassert midt på veggen, der de resterende veggoverflatene er det tildelt henholdsvis fem og to sensorer. For gulv og tak er det brukt tre sensorer, for lufttemperaturer i rommet er det fem termoelementer som henger i taktisk valgte høyder. Operativ temperatur er utarbeidet først som et gjennomsnitt av alle overflater, for så videre å opprette korrekt MRT (median radiant temperature) i henhold til operativ temperatur. Her er det klart at overflater med flere sensorer vil gi et mer korrekt bilde av temperatur som er på overflaten, der det er brukt redusert mengde sensorer vil et noe mer unøyaktig resultat presenteres. Siden liten forskjell i temperatur gir en relativ stor temperatur differanse for operativ temperatur kan dette absolutt påvirke endelig resultat.

# 1. Teori

Det teoretiske blir dekt i dette kapitlet. Her blir det på generell basis gått gjennom hva oppgaven bygger videre på. Hvilke fysiske lover dataprogrammer bruker, energieffektivisering, logikken bak en del termodynamikk, forskrifter o.l.

## 1.1. Forskrifter

Alle bygninger, enten ny bygg eller oppgraderinger må følge visse forskrifter og standarder for å oppnå gitte krav. Om krav til passivhusnivå skal oppnås settes høyere krav enn TEK17.

TEK 17 eller teknisk forskrift tar for seg minimumskrav til bygningsegenskaper for at det lovlig skal kunne bli satt opp i Norge. Veiledningen gir krav til forskrift og preaksepterte ytelser, de preaksepterte ytelsene vil oppnå alle krav i TEK 17. I forskriften er flere av funksjonskrav fortolket som ytelseskrav og andre er gitt som preaksepterte ytelser [1].

SN/TS 3031 er en standard som omhandler korrekt bruk av beregninger i henhold til bygningsfysikk. Denne tar for seg samspillet mellom bygningskropp og bygnings tekniske systemer for varme, kjøling og energiproduksjon. Standarden bygger videre fra europeiske standarder som er utarbeidet for bygningsdirektivet. Denne beregnings standard kan benyttes til å beregne bygnings forventede energiytelse basert på reelle inndata for bygning, klima og brukere. Kan også bruke normerte verdier for klima og brukere istedenfor reelle inndata. SN/TS 3031 tar for seg regler for å beregne bygnings energibehov, behovet for levert energi til bygningen og eksportert energi til energinettet for dynamiske beregningsprogrammer validert opp mot NS-EN 15265 [2].

Det er to passivhus standarder, NS3700 og NS3701. For boliger gjelder NS3700 og NS3701 omhandler yrkesbygg. NS 3700 og NS 3701 setter minstekrav av bygningskomponenter, standardene omfatter i tillegg definisjoner, krav til varmetap, oppvarmingsbehov og energiforsyning samt krav til metoder og rapportering. Standard gjelder for både nybygg og oppgradering av eksisterende bygninger, der den brukes for hele bygg eller deler av bygg. NS 3701 gir også krav til energibruk av belysning. Både standard for bolig- og yrkesbygninger baserer energibehovsberegninger fra NS 3031 med standardiserte inndata [3, 4].

## 1.2. Energibalanse

"The net change (increase or decrease) in the total energy of the system during a process is equal to the difference between the total energy entering and the total energy leaving the system during that process." [5]

Termodynamikk er definert som læren om energi, i dag omtales termodynamikken til å inkludere alle energitransformasjoner og forskjellige energi aspekter. Blant disse kjøling, kraft generering og forhold til massers egenskaper. En fundamental natur lov er prinsippet om energi bevaring, energi kan ikke bli skapt eller ødelegges men energi kan endres. Dette er det termodynamikkens første lov omhandler. Når det gjelder termodynamikkens andre lov går denne ut på at entropi i et lukket system er konstant eller at den øker. Et eksempel angående andre lov er en varm gjenstand i vanlig romtemperatur, der vil temperaturen etter hvert falle til romtemperatur, men den vil ikke naturlig få en økning av

temperatur i denne tilstanden, altså bli varmere enn omgivelsestemperatur [5]. Ved nærmere inspeksjon av termodynamikkens første lov kan det settes opp som i tabell under.

Tabell 1 Energi i et system

Total energy Entering the system	-	Total energy Leaving the system	=	Change in the total energy of the system
--	---	---------------------------------------	---	--

Dette gir ligningen:

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{System} \quad (1)$$

Ved gjenkjennelse av forskjellige energier og energienes overføringer, kan denne ligningen brukes til alle systemer som gjennomgår en prosess. Ved nærmere undersøkelse av mekanikken rundt energi overføring er det tre forskjellige aspekter som opptrer.

1. Varme transport, Q

Legg til varme i et system og dette vil føre til økt molekyl energi, dette vil igjen føre til videre økt intern energi av systemet. Motsatt opptrer når varme forsvinner fra systemet.

2. Arbeid transport, W

Når temperatur forskjell fra system til omgivelser ikke endres, er det arbeid (work) som interagerer med systemet. Roterende aksling er eksempel på arbeid inn i system ( $W_{in}$ ), derav eksempelvis kompressorer bruker arbeid ( $W_{out}$ ).

3. Masseflyt, m

En annen mulighet er masse som bærer energi. Materialer har forskjellige egenskaper, noen holder lengre på energi andre kortere. 1 l kokende vann vil tilføre energi til et system, i motsetning vil 1 l kaldt vann som vil ta opp energi fra systemet (mtp. et kontrollsystem som er mellom 0-100°C).

Energi kan bli overført i disse forskjellige formene og netto overførsel av en kvantitet er lik endringen mellom mengdene inn og ut. Dette fører til en eksplisitt versjon av energi balansen som vist under [5]:

$$E_{in} - E_{out} = (Q_{in} - Q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) + (E_{mass,in} - E_{mass,out}) = \Delta E_{system} \quad (2)$$

$$\Delta E = \Delta U + \cancel{\Delta KE} + \cancel{\Delta PE} \quad * \quad (3)$$

$$\Delta U = Q - W \quad (4)$$

\*Ved stasjonære systemer er endring i kinetisk og potensiell energi lik 0.



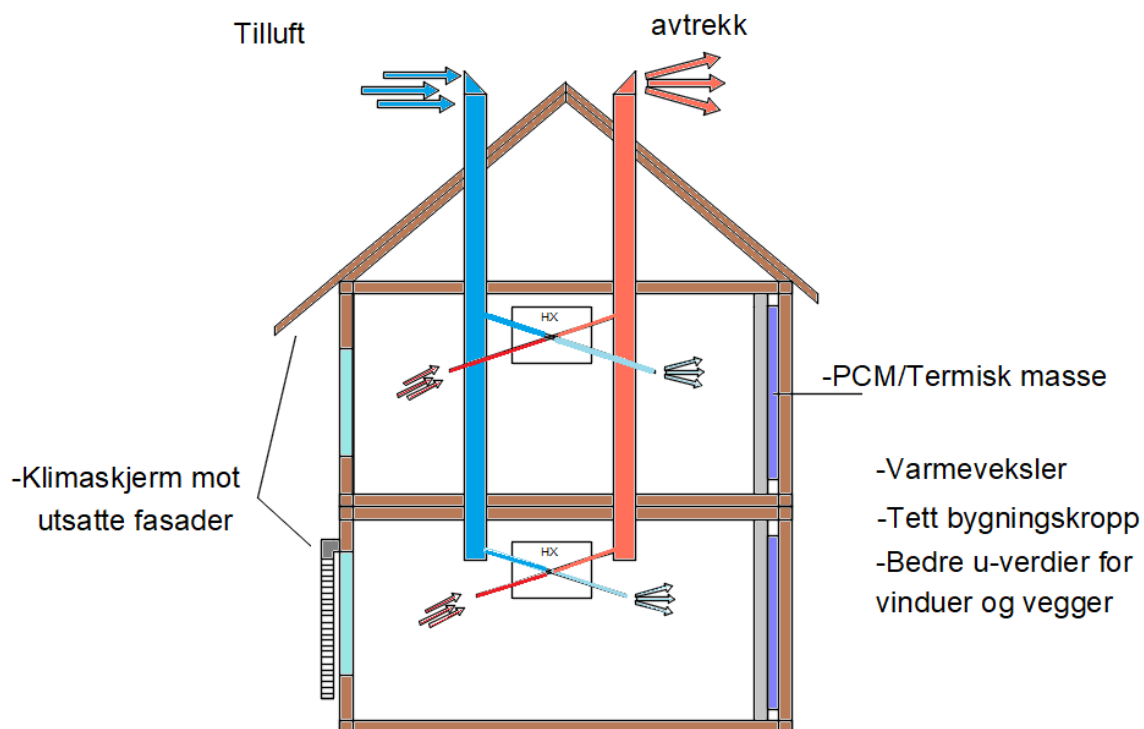
Energibalansen er selve essensen av hvordan energi/varme oppfører seg i et system, og dette vil ligge til grunn for hvordan følgende eksperimenter og simuleringer vil opptre.

## **1.2. Energieffektivisering ved bruk av passive tiltak**

TEK 17 sier det totale netto energibehovet ikke skal overstige energirammer i §14-2 samtidig som krav i §14-3 oppfylles. §14-3 omhandler minimumskrav for energieffektivitet [1]. I henhold til dagens krav er valg en gjør ganske fleksible så lenge tidligere nevnte paragrafer opprettholdes, samtidig som minimumskravene har blitt noe strengere. Det finnes flere mulige passive tiltak en kan gjennomføre for å nå alle krav i TEK17. Noen passive tiltak kan være som følger:

- Utnyttelse av latent varme; termisk masse, PCM
- Materialvalg
- Varmegjenvinning
- Naturlig ventilasjon
- Orientering av bygg i henhold til dagslys og solvarme
- Bedre u-verdier, damp og vind sperrer
- Arealeffektivisering
- Tettere bygnings skall
- Forvarming av tilluft
- Klimaskjerm mot utsatte fasader

Ved oppgradering av eksisterende bygg er det klart flere begrensninger og da bør alternative og eventuelle aktive tiltak vurderes i tillegg, eksempelvis solfangere, solceller og styringssystemer. Når nybygg opprettes eller ved oppgradering, ved vanlig bygg, pluss og passivhus, er slike passive løsninger en god ide. Grunnen til dette er for enklere å oppfølge krav gitt og mindre aktive systemer gir mindre energikonsum av et samlet system. Figur 1 under viser et eksempel på en bygning med noen mulige passive tiltak for bedre energieffektivitet. Denne figuren tar for seg tett bygg, varmeveksler, bruk av termisk masse eller PCM, samt klimaskjerner på utsatte fasader



Figur 1. Enkel skisse med noen eksempler av passive løsninger.

Om en bygning bygges tett, med god isolasjon og riktig plassering av vind- og dampsperrer er mye gjort for å nærme seg TEK 17. Dette vil føre til at f.eks. isolasjon vil opprettholde gitte verdier fra produksjon bedre gjennom alle sesonger. Om latent varme brukes i tillegg, kan en utnytte tunge bygningsdeler i form av termisk masse og eventuelt riktig bruk av PCM for enklere nå energikrav i TEK17 med en passiv metode.

### 1.3. Varmelagring

Termisk energi lagring også kjent som TES (thermal energy storage), har lavere kostnader samt høyere operativ effekt enn lagring ved kjemiske eller mekaniske systemer. Gode varmelagrings systemer fører i tillegg til mer stabile temperaturer over en dag, som igjen vil gi økt komfort for bruker av bygg. TES systemer er generelt bygget opp av tre komponenter, varmeoppbevaring system, varme transport mekanisme og et oppbevarings medium. Det finnes mange forskjellige typer av oppbevarings medium, noen forskjellige muligheter er i form av latent varme, følsom varme, reversible kjemiske reaksjoner og fusjon gjennom fordamping [6].

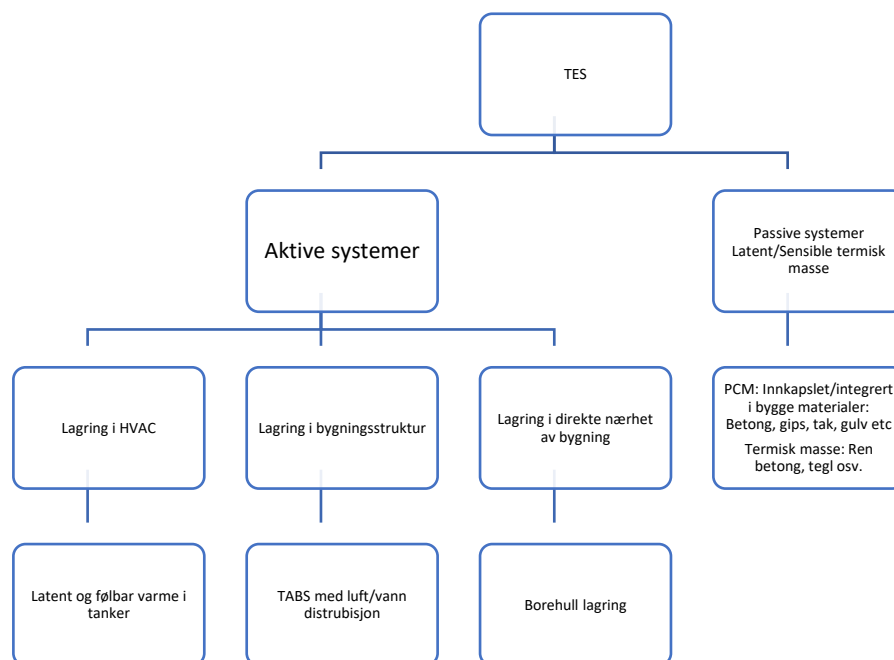
Hovedsakelig består TES systemer av to hovedkategorier, aktiv og passiv. Aktiv TES deles inn i direkte- og indirekte aktive systemer. Under er en tabell for kategorisering.

Tabell 2 Forskjellige TES systemer

Forskjellige TES systemer	
Type	Beskrivelse
Passiv	Når oppbevaringsmedium er solid og varmetransport medium er til for lading og utlading av oppbevaringsmedium
Aktiv	Når medium flyter fra tank til tank
Direkte-aktiv	Når medium også brukes som varmetransport væske/gass.
Indirekte-aktiv	Ved adskilte tanker og en varmeveksler brukes grunnet forskjellige medier.

Passive løsninger er brukt for å minimere energibruk av HVAC (heating, ventilation, air-conditioning) systemer. Forskjellige løsninger innebærer bruk av termisk masse, diverse PCM-løsninger trombevegger og sol/vann-vegger. Solveggene bruker følbare varme som prinsipp, der PCM og termisk masse bruker latent varme som prinsipp.

Under aktive løsninger er blanding mellom solsystemer og vanntanker en av de mer brukte strategier. Eksempel på et system er en solfanger integrert til varmtvannstank. En av grunnene til at dette er en mye brukt strategi er grunnet tankers store volum [7]. En annen mulighet er å bruke varmepumper for å endre elektrisk forbruk i henhold til effekttopper. Poenget er å bruke TES systemer ved lavere effekt over nettet, for så å ta i bruk oppspart energi ved typiske effekttopper [8].



Figur 2. Noen eksempler på aktive og passive systemer i henhold til varmelagring.

### 1.3.1. Varmetransport ved varmeledning, konveksjon og stråling

Varmetransport skjer hovedsakelig gjennom tre separate eller kombinerte metoder, varmeledning, konveksjon eller stråling. Dette delkapitlet tar for seg en generell forståelse av varme transporten. Konvektiv varme transport handler om hvordan transportens karakteristikk endrer seg fra et solid stoff til et flytende/gass stoff per overflate enhet. Denne ligningen kan beskrives av Newtons lov om kjøling grunnet at temperatur differansen er proporsjonal med konvektiv varmetransports rate. Både arealavhengig og ikke arealavhengig ligning er beskrevet i ligning 5 og 6 under. Ligning 6 beskriver Newtons lov om kjøling, derav ligning 5 er den samme, men arealavhengig.

$$\dot{Q}_{conv} = \mathbf{h} \dot{A}_s (T_s - T_\infty) \quad (5)$$

$$\dot{q}_{conv} = \mathbf{h} (T_s - T_\infty) \quad (6)$$

Overstående ligning ser enkel nok ut, men  $\mathbf{h}$  kompliserer ligningen noe. Grunnet at konveksjon betydningsfullt blir påvirket av diverse variabler som dynamisk viskositet, termisk konduktans, tetthet, spesifikk varme og hastigheten til væsken.  $\mathbf{h}$  beskrives som ligning 8. Om varmetransport er uavhengig av areal vil ligning for varmetransport være lik for både konduktivitet og konveksjon. Dette gir ligning 7.

$$\dot{q}_{conv} = \dot{q}_{kond} = -k_{v\ddot{a}eske} \left. \frac{\delta T}{\delta y} \right|_{y=0} \quad (7)$$

Ved areal avhengighet settes ligning 7 sammen med Newtons lov om kjøling (ligning 6), og en ender opp med ligning 8 [9].

$$\mathbf{h} = \frac{-k_{v\ddot{a}eske} \left( \frac{\delta T}{\delta y} \right)_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad (8)$$

Varmeledning er energi som går gjennom væske, fast stoff eller gass. I denne sammenheng er det gjennom fast stoff. Ligning 9 viser den definerende formen av varmeledning. Basert på ligning 9 kan varmeledning beskrives som raten av varmeledning gjennom en gitt tykkelse av en overflates temperatur forskjell [9].

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (9)$$

Stråling er varme transport som ikke krever en form for masse for transport, et eksempel er fotoner fra solen som transporteres gjennom vakuum der disse fotonene skaper en energi økning når den treffer forskjellige masser. Varme transport gjennom stråling gjelder også for massers elektromagnetiske bølger, for eksempel utstråling fra mennesker eller andre varmekilder. Alle masser med en temperatur høyere enn absolutt null temperatur, vil gi fra seg varme i form av stråling.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4) \quad (10)$$

Der epsilon er emissiviteten til massens overflate og sigma er Stefan-Boltzmann konstanten på  $\sigma=5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  [9].

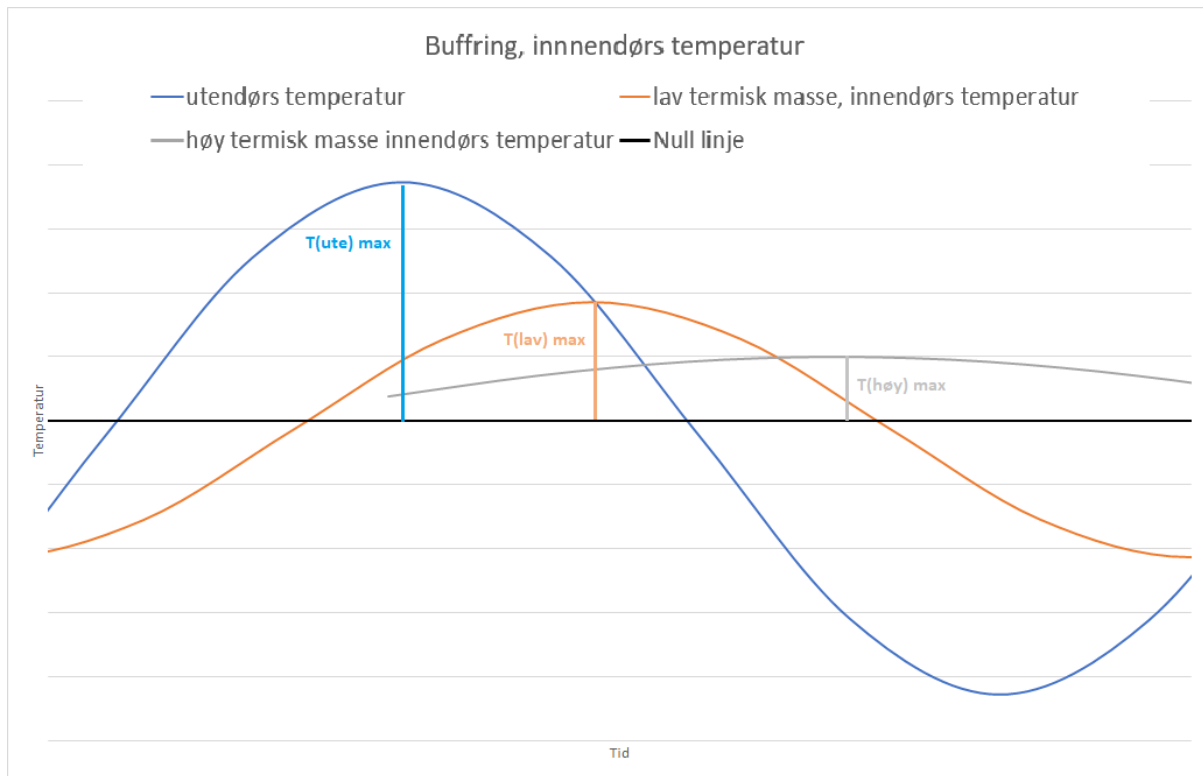
### 1.3.2. Fukt transport

Alle typer fuktopptak og avgivelse kalles sorpsjon, enten det skjer i form av vanndamp eller flytende tilstand. Fukttransport består av flere funksjoner blant annet luftfuktighet, overflatespenning og damptrykk. Ved riktige forhold vil vann fordampe og blir lett transportert videre i luft. Når vannet treffer en overflate vil det skapes fysikalske bindinger som fører til at vannet dekker overflatene i flere lag. Styrken til bindingene varierer i henhold til hvilke material vanndampen treffer, i tilfeller med glass legger det seg enkelt, i andre tilfeller med mer porøse materialer vil vanndampen ved hjelp av kapillær kondensering bryte gjennom materialet og bli flytende inne i materialet [10]. I tillegg fører dipolstrukturen til vannmolekylene til en meget høy varmekapasitet av vann, det vil si at det kreves mer energi for å øke temperaturen til vannet. Dette fører til flere problemer som frostsprengning hvis det fryser, eventuelt om kondensering har skjedd inne i et bygnings skall, dette vil igjen direkte påvirke u-verdi av byggets isolasjon.

### 1.3.3. Termisk ytelse

En bygnings egenskaper for å absorbere, lagre og frigi energi kalles termisk masse eller varmelagringsevne. Varmekapasitet og konduktivitet er to variabler som tilsier hvor stor evne materialene har for varmelagringsevne. Konduktiviteten er varmeledning og varmekapasitet for å holde på varmen. Materialer reagerer forskjellig på stråling fra omgivelser, metaller har en hurtig konduktivitet, derav stein eller betong har en tregere. Dette vil si at betong holder på varme bedre over tid enn hva metaller vil. I varmere klima vil betong hus fungere i prinsippet som et varmebatteri, gjennom dagen absorberes varme inn i den termiske massen, etter hvert som det blir kjøligere innendørs vil den stråle varme inn i rom. Samme prinsipp vil opprettholdes i Norge på sommerdager, om vinteren vil denne effekten by på større problematikk. Om vinteren har solen en lavere vinkel som gjør at mer solstråler kan potensielt stråle inn i et bygg over lenger tid, som gjør at energireservoaret kan i prinsippet lagre enn viss mengde energi.

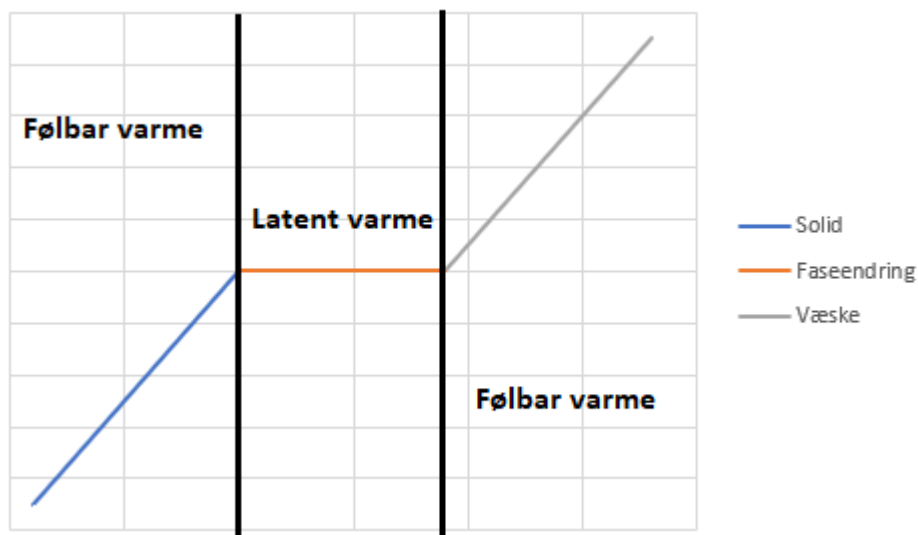
Materialer med høy densitet, lav refleksivitet, høy spesifikk varmekapasitet og konduktivitet har god termisk masse. Når slike materialer brukes som et energireservoar er det viktig å tenke på egenskapene i forhold til en dagsyklus. Metaller, gjerne stål har veldig god varmekapasitet, men igjen så vil dette være en dårlig løsning for termisk masse grunnet at varmekapasiteten er såpass god at materialet ikke klarer å holde på energien over lengre perioder. Betong og andre mur materialer har dårligere varmeledningsevne enn f.eks stål men god varmekapasitet, noe som fører til at betong er et bedre material å bruke i denne sammenheng enn stål. I figur 3 vises et eksempel for et tenkt material og evnen for temperatur buffering. Med noe termisk masse vil temperaturen holdes jevnere og topp temperaturen kommer senere, det er en forsinkelse i systemet. Med høy termisk masse blir det enda jevnere temperatur, lavere topp temperatur på et enda senere tidspunkt. Alle disse faktorene fører til et bedre inneklima.



Figur 3. Temperatur buffering med faseforskyvning.

#### 1.3.4. Latent og følbar varme

Indre energi kan sees på som summen av kinetisk og potensiell energi mellom molekyler. Den delen av energien som utgjøres av kinetisk energi kalles for følbar varme (følbar energi). Hovedgrunnen til at disse terminologiene er lik, er grunnet proporsjonalitet mellom temperatur og hurtighet/aktivitet til molekyler. Høyere aktivitet blant molekyler gir proporsjonalt økt temperatur som igjen fører til høyere indre energi. Ved tilførsel av nok energi vil et solid stoff etter hvert bryte bindekraftene til molekyler som fører til en fasadeendring av solide stoff til væske form, eller væske til gass. Energiendring når materialet er i faseendring kalles latent varme [9].



Figur 4. Latent og følbar varme fra solid til væske.

Latent varme beskrives som energibruk ved faseendring. Eksempelvis når is går til vann eller når vann fordampes til gass. Generelt er dette fra solid til væske eller fra væskeform til gassform. Når disse faseendringene opptrer frigis energi i form av varme. Ved motsatt oppførsel, når eksempelvis vann går til is, kreves energi i form av varme for å reversere prosessen. Når et stoff går fra væske til solid skjer en eksotermisk energiendring, i motsatt tilfelle fra solid til væske så blir det kalt en endotermisk energiendring. Endotermiske prosesser absorberer varme og eksotermiske prosesser gir fra seg varme. Energiendringer angående latent varme foregår over konstant temperatur, se figur 4. Kvantitet av energi som tas opp eller frigis baseres på masse og entalpi endringer, ligning 11 under beskriver denne prosessen:

$$Q = mc_p \Delta T \quad (11)$$

$$mc_p \Delta T = m * \Delta h \quad (12)$$

$$Q = m * \Delta h \quad (13)$$

Følbar varme er når temperaturen i et stoff øker uten at en faseendring oppstår, eksempel på dette er temperatur endring i is eller vann. Så lenge is beholder egenskaper til is vil temperaturendringer være følbar varme, samme konsept gjelder i væskeform. Figur 4 beskriver forskjellene, positiv y-verdi er temperaturøkning, der x-verdier beskriver tid. Ved hjelp av ligninger under kan mengde energi lagret beskrives.

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} dt \quad (14)$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \Delta h = \dot{m} c_p \Delta T \quad (15)$$

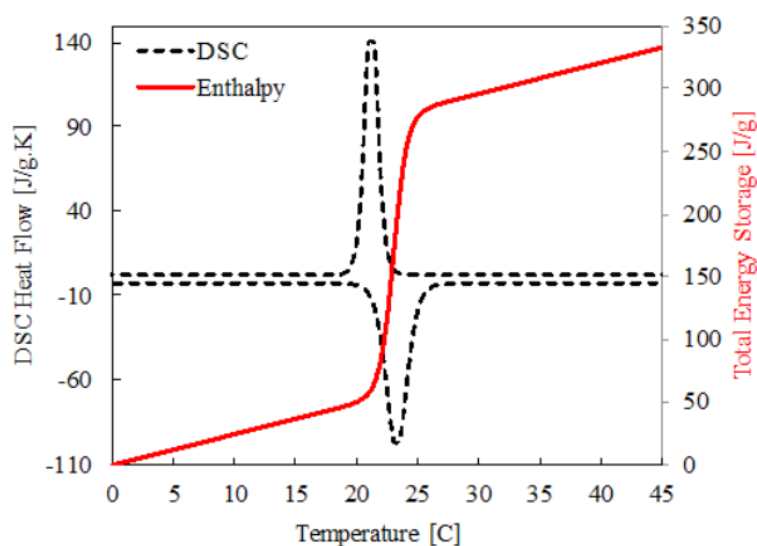
Ved å kombinere ligning 14 og 15 vil vi få ligning 16 som beskriver mengde energi lagret ved følbar varme.

$$Q = \int_{T_0}^{T_1} mc_p dT = mc_p (T_1 - T_0) \quad (16)$$

### 1.3.5. Latent varme, PCM og hygroskopiske materialer

PCM (phase changing materials) er tatt i bruk med den intensjon at PCM materialet skal veksle mellom krystallisk og væske format innenfor visse temperaturer i henhold til behag for brukere. Utføres dette optimalt oppnås jevnere temperatur endringer i et rom, samt at en redusert mengde energi brukes for både oppvarming og kjøling av rommet. Det finnes mange forskjellige PCM, videre i oppgaven brukes PCM fra BioPCM; Q23, M51.

Når PCM går fra solid til væske eller vice versa skjer en endring i latent varme. I denne prosessen tar PCM enten opp eller gir fra seg energi i form av varme. Entalpi er en tilstandsfunksjon i termodynamikken, entalpi beskriver mengde varme i et system. Om en ser på et tidsbilde av PCM fra solid til væske, vil entalpien i materialet få en ekstrem økning i faseendring tilstand, når den går fra solid til væske skjer en økning, fra væske til solid skjer en reduksjon av entalpi i materialet. Figur 5 under viser entalpi endring over temperatur, dette er den røde linjen. De stiplete svarte linjene sier noe om varmflyt, topp og bunn forklarer solidifikasjon- og smeltepunkt. Den nedadgående stiplete linjen er når PCM er helt smeltet. Derav den oppadgående linjen er der PCM har solidifisert [11].



Figur 5. Entalpi/Temperatur og varmflyt graf.

Hygroskopiske materialer handler om et materials evne til å ta opp fukt. Alle materialer med åpne poresystemer gjør dette i større eller mindre grad, men det er store forskjeller på forskjellige materialer. På denne måten vil vegger og møbler, gjerne av tre, fungere som fuktbuffer. Når det er høy fuktighet vil disse materialene trekke til seg fukt, ved mindre relativ fuktighet i rom vil fukt sendes tilbake i rommet. Dette vil føre til bedre innemiljø for brukere. Fuktransport og varmetransport utgjør en symbiotisk sirkel, det som påvirker den ene vil påvirke den andre. Likt som latent varme vil fukt holde på en viss energi som tas opp og slippes ut ved hjelp av endo- og eksotermiske krefter.



## 2. Metode

For å utføre denne oppgaven trengs et testrom for eksperimenter og en korrekt simuleringsmodell. Dette kapitlet omhandler framgangsmåter, utstyr, materialbruk/egenskaper, framgangsmåter ved eksperimenter/simulering og dimensjoner som videre brukes.

### 2.1 Klimarom geometri og egenskaper

Klimalaben er bygget opp av enkle sammensatte elementer. Rommet har et eget ventilasjons aggregat samt mulighet for kjøling.



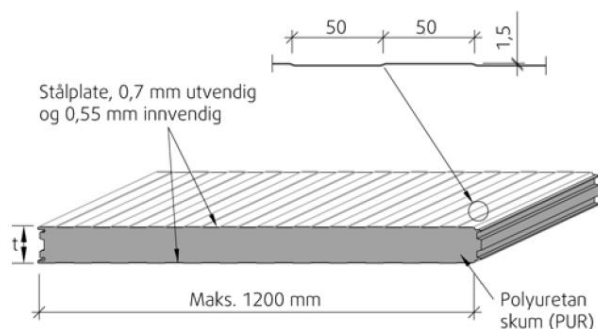
Figur 6. Klimarom.

Det er et ventilasjonsaggregat på utsiden av klimalaben, denne har oppvarming og en varmegjenvinner, men det er ikke inkludert kjøling i ventilasjonsaggregatet. Det er modifisert en egen kjøleenhet til aggregatet for å kunne kjøle ned tilluft til klimarom.

Klimarommet er bygget opp av elementer fra Fresvik, denne produsenten sender ferdigproduserte elementer som byggeklosser. De aktuelle elementene er basert på tre komponenter, der vegg og tak består av et lag aluminium, polyuretan og til slutt et nytt lag av aluminium. Gulv elementer kommer i forskjellige sammensetninger, gjeldene for klimarommet er aluminium, polyuretan og et tynt lag parkett på toppen. Under er en tabell som forklarer klimarommets kvantiteter/kvaliteter og et bilde av hvordan de generiske Fresvik elementene ser ut. Tabell 4 og figur 7 er fra en teknisk godkjenning fra Sintef [12].

Tabell 3 Oppbygning av Fresvik elementer i klimarom

Fresvik elementer	
Type	Utforming (Ute-venstre/inne-høyre)
Tak/vegg	0,7mm aluminium-100mm polyuretan-1,5cm aluminium
Gulv	0,7mm aluminium-100mm polyuretan-0,55mm parkett



Figur 7. Vanlig Fresvik element.

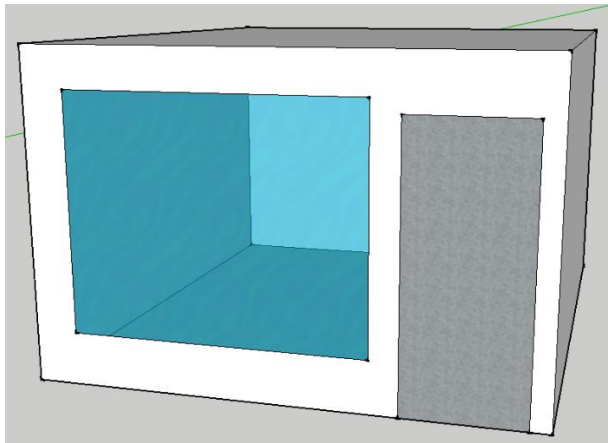
Egenskapene til elementene er forklart videre i tabell 4.

Tabell 4. Egenskaper for stål og polyuretan i Fresvik elementer.

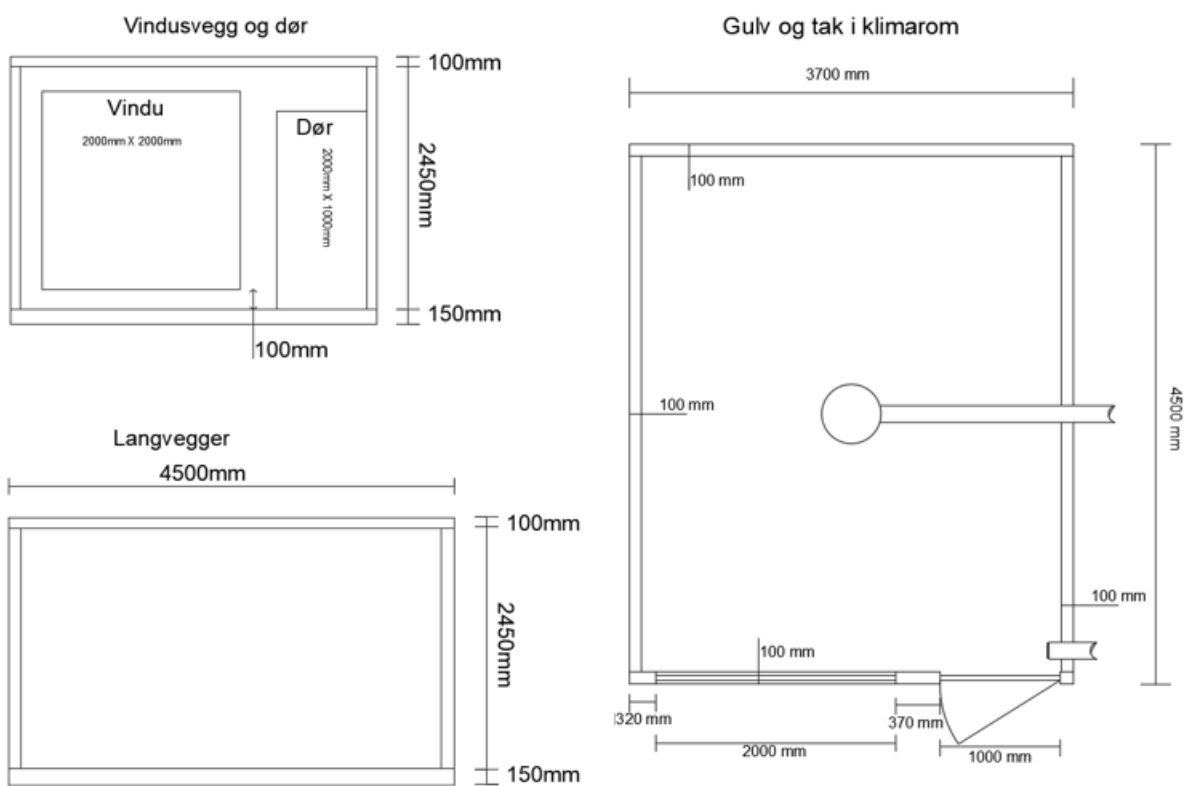
Egenskaper for Fresvik elementer		
	Stål	Polyuretan
Utvendig platetykkelse	0,7mm	-
Innvendig platetykkelse	0,55mm	-
Elastitetsmodul	$E_{\text{stål}}=2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$	$E_{\text{Polyul}}=5,4 \text{ N/mm}^2$
Flytspenning	$F_v=280 \text{ N/mm}^2$	-
Karakteristisk buklingsspenning for 0,55mm	$\sigma_w=128 \text{ N/mm}^2$	-
Skjærmodul med styrkeberegning	-	$G=2,9 \text{ N/mm}^2$
Skjærmodul med def.-beregning	-	$G=301 \text{ N/mm}^2$
Skjærfasthet	-	$f_v= 0,12 \text{ N/mm}^2$
Trykkfasthet	-	$f_c= 0,22 \text{ N/mm}^2$
U-verdi	$U=0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$	

### 2.1.1. Klimarommets geometri

Klimarommet består av to deler, et rom som simulerer vanlige rom, og et rom ved siden av som er et kjølerom. I disse eksperimentene brukes ikke kjølerommet men den andre delen av klimarommet. Figur 8 viser SketchUp versjon av rommet og figur 6 viser det faktiske rommet.



Figur 8. SketchUp figur av klimarom.



Figur 9. Dimensjoner for klimarom.

Figur 9 gir en detaljert beskrivelse av klimarom samt dimensjoner som framgår. Når det gjelder vindu og dør i klimarom skapes ingen forstyrrelser når det gjelder varmeledning. U-verdier skal være lik i disse komponentene som resten av klimarommets bygningskall.

### 2.1.2. Materialer og utstyr

For å utføre alle eksperimentene og simuleringer har et behov for en del materialer og utstyr oppstått. Listen under oppsummerer forskjellig material og utstyr som er blitt brukt.

- Dataprogrammer; WUFI+, EasyView10
- InTab logger
- Termoelementer
- Bygningselementer fra Fresvik
- Betongheller fra Bauhaus
- Varmefolier fra ElektroImportøren
- Timere
- Bio-PCM fra PhaseChange energy solution
- Ventilasjonsaggregat
- PLS styrt kjøler.

Nøyaktighet for utstyr er vist i tabell 5, for en dypere teknisk innsikt se vedlegg 5 for teknisk data.

Tabell 5. Nøyaktighet for logger og termoelementer.

<b>Nøyaktighet</b>		
<b>Type</b>	<b>Nøyaktighet</b>	<b>Tillegsinformasjon</b>
<b>InTab datalogger</b>	+/-0,5 $\mu$ A +/-400 ppm	-Konstant strøm: 500 $\mu$ A
<b>Termiske sensorer</b>	+/- 1,5°C	-Måleområde: -40°C til 375°C

Det er blitt brukt en del digitale enheter og systemer for å korrigere temperatur og spesifikasjoner inne i klimarommet.

For ventilasjonsdelen består materialer hovedsakelig av et ventilasjonsaggregat, en modifisert kjøler for gjeldene aggregat og individuelle sensorer som måler temperatur i tilluftskanal til klimarommet. For selve ventilasjonsaggregatet er det mulig å sette luftmengder samt settpunktstemperatur på tilluft i henhold til driftstider. Originalt klarer ikke aggregatet riktig tiluftstemperatur på varme dagen siden den er utstyrt med bare oppvarming og varmegjenvinner, men med den modifiserte kjølekomponenten klarer den både å redusere og øke tillufttemperatur i henhold til settpunkts verdier.



Figur 10. Ventilasjonsaggregat med modifisert kjøler.



Figur 11. Til høyre: Settpunktstemperatur for driftstid til temperatur og luftmengde. Til venstre: Monitor for tilluftstemperatur

Kjølesystemet er basert på kaldtvannet til bygget. Ved å åpne tilgang til kaldtvannet vil dette kunne brukes som en kjøler for aggregatet. Systemet består hovedsakelig av en PLS styrt settpunkts kontroll og et tilkoblet tidsur. En setter ønsket settpunkts temperatur for driftstider for så å sette tidsuret til riktige driftstider. Slik kan aggregatet gi korrekte settpunkts verdier på alle virkedager uavhengig av utendørs luft temperatur.



Figur 12. Fra høyre til venstre: Tidsur, sammenkobling av tidsur og PLS-styrer, PLS styrer



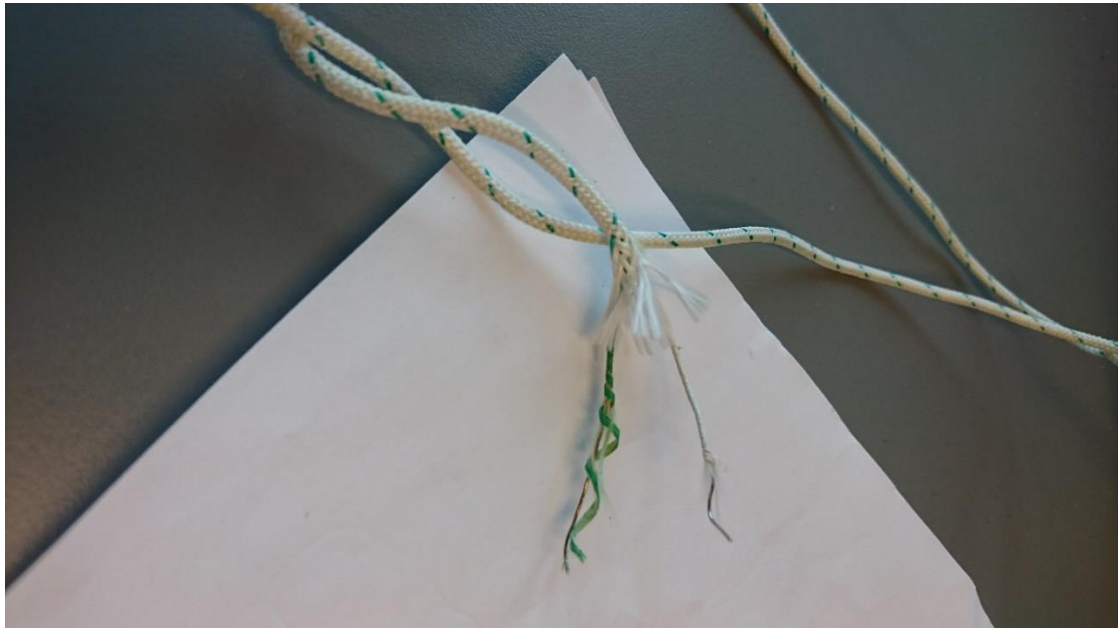
Figur 13. Sammenslåing av kaldtvann fra bygg til kjøler.

Resterende materialer og utstyr er det som brukes inne i klimarom. Dette utstyret består av termopar, intab logger, PCM matter, betong og varmemolier. Termopar kobles sammen til intab logger, andre enden av termopar vil føle temperatur enten på overflater eller lufttemperaturer i forskjellige områder av klimarom. Betong heller plasseres på bakken og varmemolierne som representerer internlast og sol stråling plasseres så naturlig som mulig rundt i klimarommet. I figur 17 er noen av varmemolier plassert, hengende er belysning og solstråling, folier plassert på bord representerer teknisk utstyr og mennesker.





Figur 14. Intab logger.



Figur 15. Termopar.



Figur 16. Pcm matte, betongheller og en del av varmefolier.



Figur 17. Plassering av betongheller og internlaster.



Egenskaper til vanlig betong uten armering har en densitet på  $2400\text{kg/m}^3$ , varmekonduktivitet på  $2,0\text{ W/mK}$  og en varmekapasitet på  $1,09\text{ kJ/kg} \cdot \text{C}^\circ$  [13].

Egenskapene til denne type PCM er gitt i tabell under

Tabell 6 PCM egenskaper

BioPCM Mats	Enheter	Verdi
Produkt vekt, total per $\text{m}^2$	kg	2,59
Tykkelse	mm	9
Dimensjoner (vidde)	mm	450
Smeltepunkt*	$^\circ\text{C}$	23
Frysepunkt *	$^\circ\text{C}$	18,5
Latent varmelagrings kapasitet	$\text{kWh}/\text{m}^2$	0,085

## 2.2. Eksperimenter

### 2.2.1. Eksperimentelt oppsett

Eksperimentene starter med like forhåndsbestemte forhold. Forholdene settes og et referanseforsøk igangsettes. Videre eksperimenter skal ha samme startforhold som referanseforsøket har.

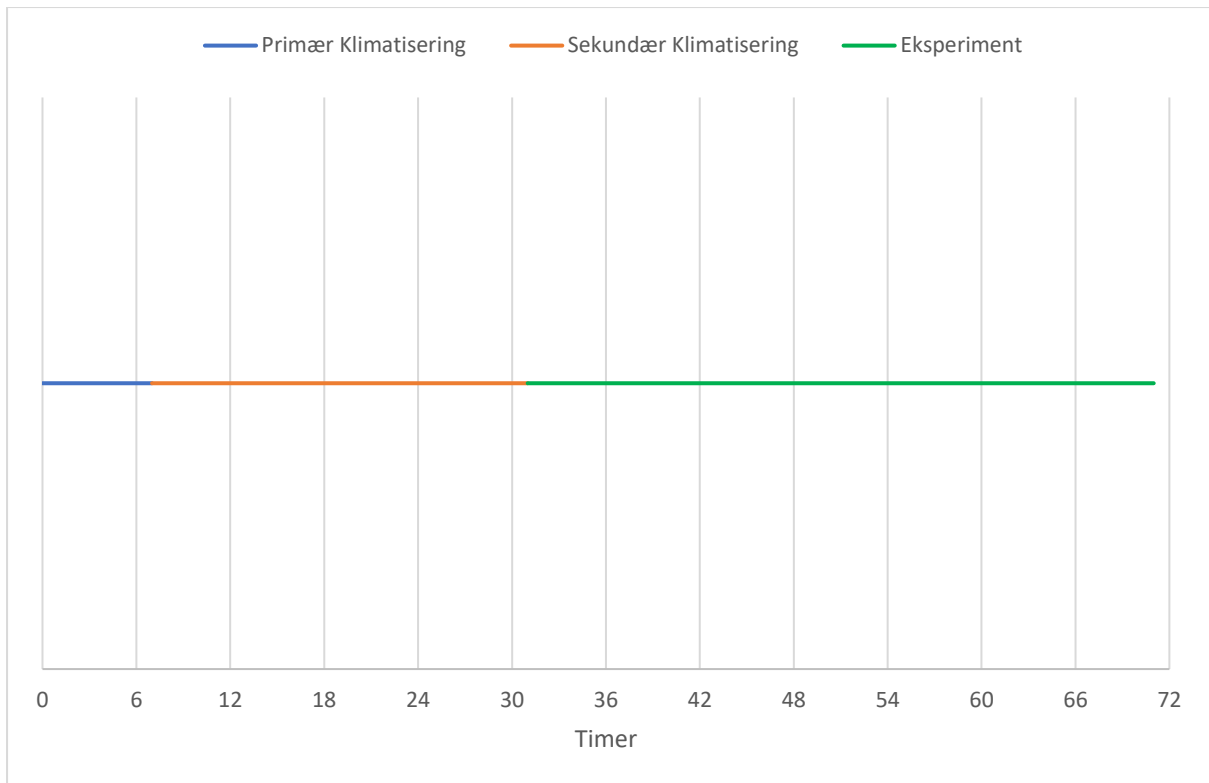
Tabell 7. Startforhold.

Startforhold					
	Temperatur <sub>Luft</sub>	Temperatur <sub>Gulv</sub>	Primær klimatisering	Sekundær klimatisering	PCM <sub>Solid</sub>
Forklaring	16 $\text{C}^\circ$	16 $\text{C}^\circ$	12 $\text{C}^\circ$	16 $\text{C}^\circ$	Skal starte i solid tilstand

PCM som brukes i forsøkene har en faseendring mellom  $18,5\text{ C}^\circ$ - $23\text{ C}^\circ$ , dermed settes klimatisering til under  $18\text{ C}^\circ$  for å få så mye av PCM som mulig i solid tilstand i start av forsøk.

For å oppnå originale startforhold kreves klimatisering av klimalaben. Videre er det forklart framgangsmåte i henhold til både eksperimenter og klimatisering.

Eksperimenter og klimatisering kjøres gjennom en tidsperiode på 72 timer. Primær klimatisering vil foregå de første 7 timene, sekundær klimatisering igangsettes et døgn før eksperiment starter, ved midnatt. Eksperimentet vil så gå i 41 nye timer. Figur 18 og tabell 8 under viser tidspunkt og varighet til eksperiment og klimatisering.



Figur 18. Varighet for klimatisering og eksperimenter.

Tabell 8. Timetabell for klimatisering og eksperimenter.

Timetabell		
Periode	Tidspunkt	Type
1	17:00-00:00	Primær Klimatisering (7 timer) <span style="color: blue;">□</span>
2	00:00-00:00	Sekundær Klimatisering (24 timer) <span style="color: orange;">□</span>
3	00:00-17:00	Eksperiment (41 timer) <span style="color: green;">□</span>

Eksperimentene varer i 41 timer, dette muliggjør observert endring av temperatur over et døgn og temperatur topper gjennom en periode på to døgn. Dette mønsteret vil gjenta seg gjennom alle eksperimenter som utføres.

Settpunkt for ventilasjonsaggregatet og kjøleelementet kan trinnvis innstilles. Ventilasjonsaggregatet har mulighet for detaljstyring ned til nærmeste minutt, derav kjølesystemet har to innstillinger, enten komfort eller environmental. Følgende innstillinger brukes for eksperimenter:

Tabell 9. Settpunkt for temperatur og luftmengder.

Settpunkt for temperatur og luftmengder			
	Ventilasjonsaggregat		Kjøling
	Settpunkts Temperatur	Luftmengde	Settpunkts temperatur
00:00-07:00	16 C°	170 m <sup>3</sup> /h	16 C° ≤
07:00-17:00	19 C°	50 m <sup>3</sup> /h	19 C° ≤
17:00-00:00	16 C°	170 m <sup>3</sup> /h	16 C° ≤

Både internlaster og solstråling blir simulert av varmemolier fra elektroimportøren [14]. Disse gir fra seg 60 W/m<sup>2</sup>. Varmefoliene ble videre klippet opp og plassert på mest mulig ideelle taktiske områder i henhold til hvilke varmekilder som skulle simuleres. Figur 19 viser hvilken type varmemolie som er brukt for forsøkene.



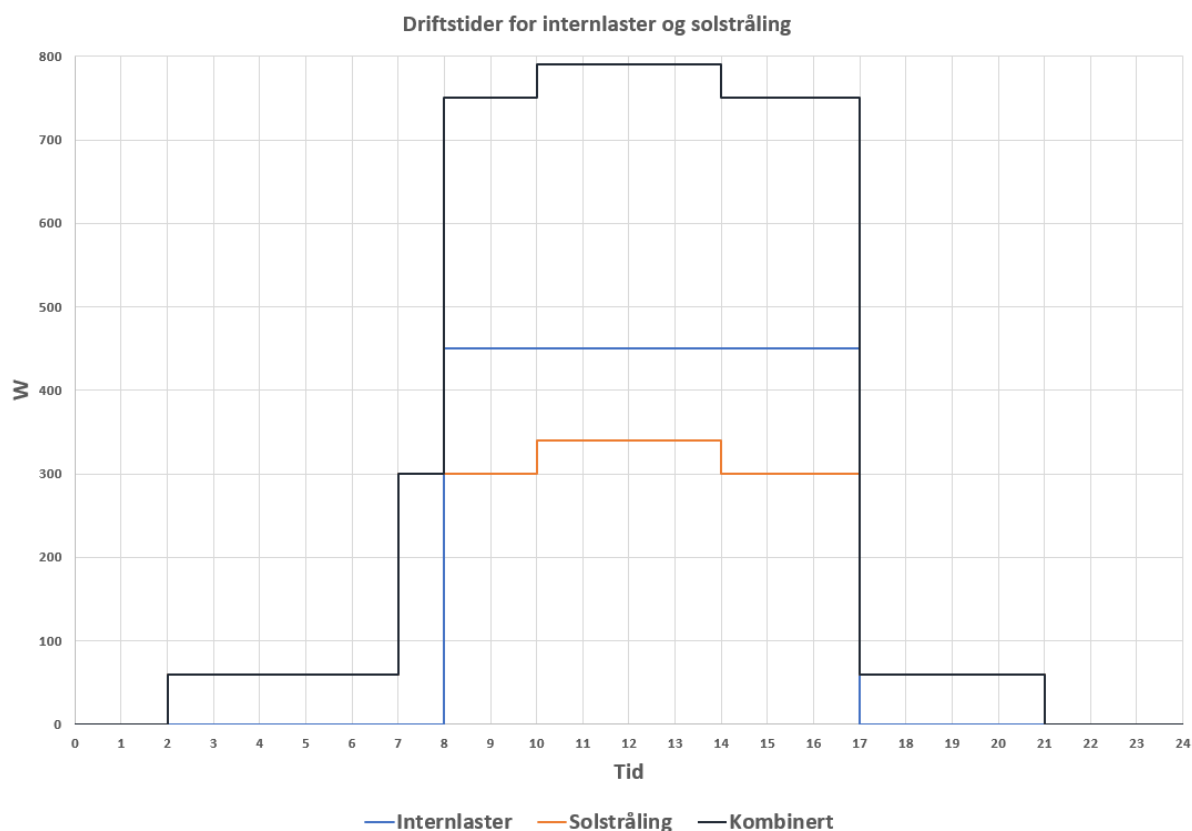
Figur 19. Foliekit fra elektroimportøren.

For internlaster er tidsur koblet opp til varmemolier i ett steg, de går på klokken 08:00 og slås av klokken 17:00. Solinnstråling er simulert ved bruk av tre tidsur, først slås en varmemolie på 03:00 som varer til 21:00, denne gir 60W. Neste steg for solinnstråling er 07:00-17:00, denne gir i tillegg 240W. Siste steg er 10:00-14:00 og gir 40W i tillegg. Dette gir solstråling en trinnvis økning og reduksjon ettersom dagen utspilles. Verdiene som er brukt i solinnstråling er basert på et tidligere studium fra HiOA [15], her er det brukt solinnstråling i et steg der verdien er 240W fra 05:00-22:00. Denne grafen og de tre trinnene brukt i denne oppgaven har samme areal under graf.

Tabell 10 angir verdier og tidspunkt for både internlaster og solstråling gjennom en tenkt dag.

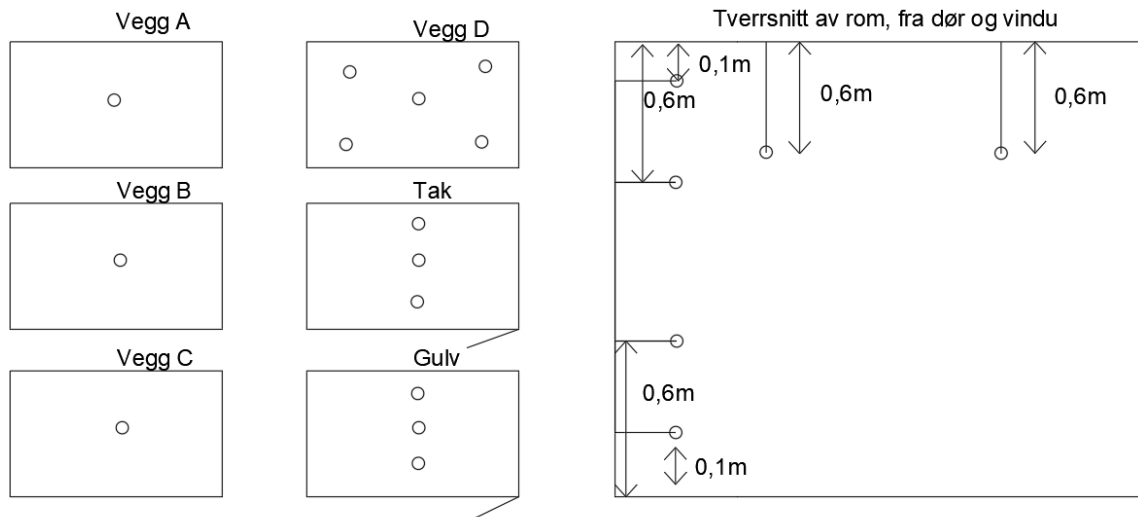
Tabell 10. Tidspunkt og varmetilførsel ved bruk av varmefolier.

Tidspunkt og varmetilførsel		
Internlaster	Tidspunkt	W
Personer $1,5 \text{ personer} \times 100\text{W}$	08:00-17:00	150W
Teknisk utstyr $1,5 \times 150\text{W}$	08:00-17:00	225W
Belysning $5\text{W} \times 15\text{m}^2$	08:00-17:00	75W
Solstråling	Tidspunkt	W
Periode 1	03:00-21:00	60W
Periode 2	07:00-17:00	240W
Periode 3	10:00-14:00	40W



Figur 20. Driftstider for internlaster og solstråling.

En intab logger brukes for å logge temperaturer på forskjellige overflater og luft temperatur, både inne i klimalab og utenfor i omkringliggende rom. Sensorer festes i logger og andre ende i ønsket målepunkt.



Figur 21. Plassering av termopar.

I tillegg til termopar vist i figur 21 er det to ekstra termopar som er plassert utenfor klimarom, en på forsiden og en på baksiden. Disse termoparene er brukt for å få tids verdier av omgivelses temperatur, som senere blir brukt som klimafil i WUFI+.

Når betong og PCM legges, flyttes termopar fra original posisjon til samme område men over betong/PCM.

Oppsett og uthenting av data til InTab logger utføres med programvaren EasyView10. For disse eksperimentene måler loggeren hvert sekund og henter ut en middelvei av 60 målinger hvert minutt. Dette kan endres gjennom easyview, men mer nøyaktig enn en måling hvert minutt er ikke nødvendig for disse eksperimentene. Målingene vises som grafer og tallverdier, minimum, maksimum og gjennomsnittverdier spredt over tid. Se vedlegg 1 for eksperimentelle målinger.

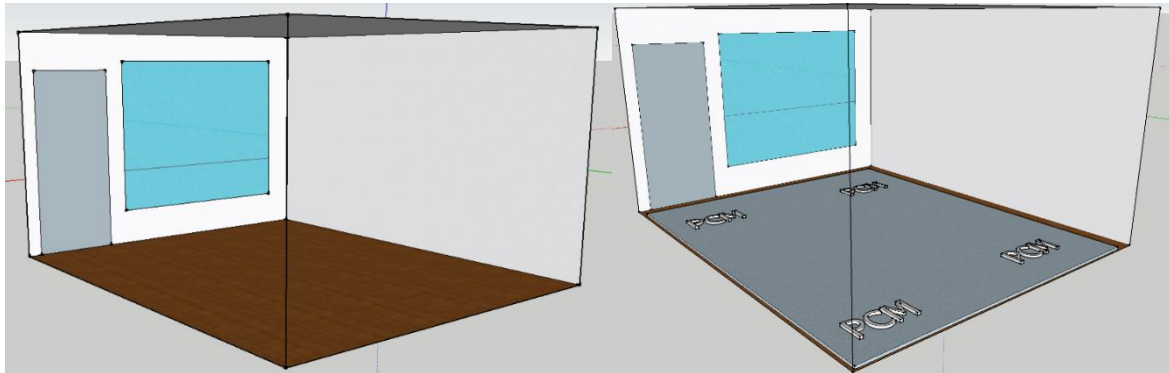
### 2.2.2. Eksperimentelle caser

Gjennom denne oppgaven skal flere scenarier studeres. Det utføres eksperimenter i en fysisk lab, samt simuleringer i WUFI+. Scenarioene utgjør 7 forskjellige varianter, i tabell 10 er hver enkel variant beskrevet sammen med figur. Scenario 5 er også delt opp i underkategorier, grunnen til dette er fordi disse to scenarioene er akkurat det samme bortsett fra temperatur i henhold til driftstider.

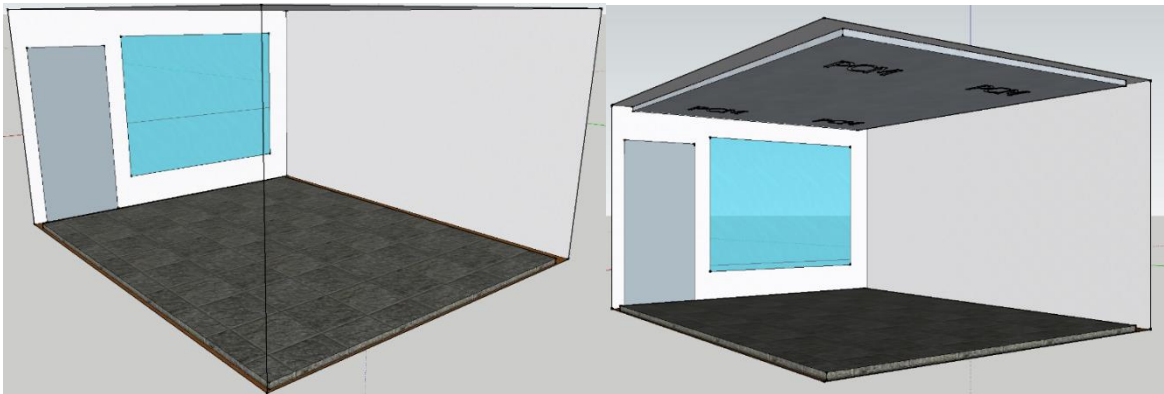
Tabell 11. Varianter av scenarier.

Scenarier			
Variant		Antall termiske elementer	Sammenlignbar med forsøk
1	Referanse	0	N/A
2	PCM på gulv	1	#3
3	Betong på gulv	1	#2
4	Betong på gulv, PCM i himling	2	#5a, 6
5a	Betong på gulv, PCM på vegg og i himling	3	#4, 6, 5b
5b	Betong på gulv, PCM på vegg og i himling, 16°C konstant	3	#5a
6	Betong på gulv, dobbel PCM i himling	3	#5, 6

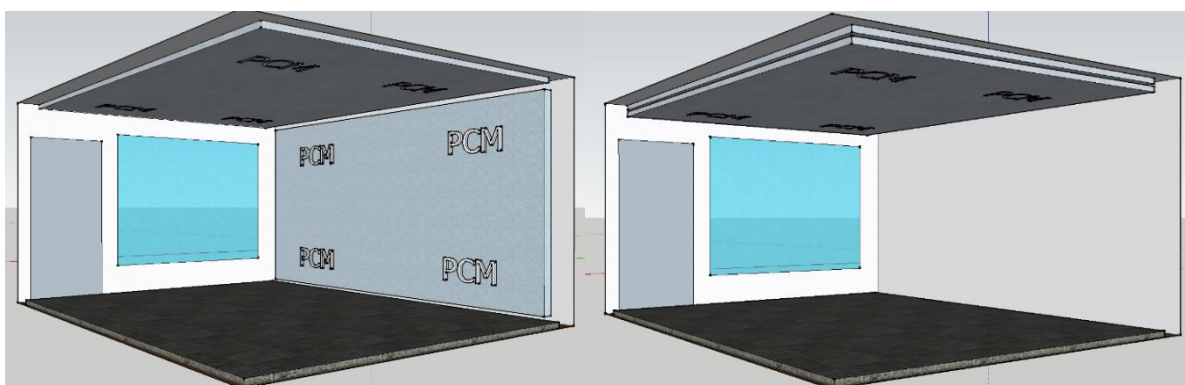
Forsøkene er delt inn i 7 scenarier. Det første eksperimentet er referanse forsøket. I dette tilfellet kjøres eksperimentene uten noen elementer, verken PCM eller betong. For scenario 2 dekkes gulv med PCM og starter med samme grunnbetingelser som referanse forsøket hadde. Scenario 3 bytter ut PCM på gulv med betongheller på gulv, disse to eksperimentene er direkte sammenlignbar. Det fjerde scenarioet er betong på gulv og PCM i himling. Tre elementer blir brukt i scenario 5a, her er det betong på gulv og PCM i tak og på vegg. Grunnen til at scenario 5 er delt opp i 5a og b er fordi scenario 5b er akkurat samme scenario, men med en konstant tilluftstemperatur på 16°C. For scenario 6 flyttes PCM på vegg til tak, dette gir dobbel PCM i tak og betong på gulv. Figur 22 til 24 gir et bilde på hvordan oppsettet blir på de forskjellige scenarioene.



Figur 22. Scenario 1 og scenario 2.



Figur 23. Scenario 3 og scenario 4.



Figur 24. Scenario 5a-b og scenario 6.

## 2.3. Numeriske metoder

### 2.3.1. Simuleringer

I tillegg til eksperimentelle simuleringer utføres 6 forskjellige varianter av termisk masse simuleringer. Disse variantene består av massivtre, betong og PCM. De tre første variantene har respektiv termisk masse på gulv, derav de siste variantene har termisk masse både på gulv og i himling.

Tabell 12. Beskrivelse av tilleggs simuleringer.

<b>Simuleringer som utføres i tillegg til eksperimentelle simuleringer</b>	
<b>Type</b>	<b>Beskrivelse</b>
V1	Massivtre på gulv
V2	Betong på gulv
V3	PCM på gulv
V4	Massivtre på gulv og i himling
V5	Betong på gulv og i himling
V6	PCM på gulv og i himling

For modellen i WUFI+ er det valgt å bruke Stora Enso CLT, se figur 26 for egenskaper. For disse simuleringene er det valgt å kjøre simuleringer for en hel måned for å nå jevnere temperaturutviklinger mot slutten av simuleringer. Med tanke på dimensjoner og modell brukt er det samme modell som brukes for eksperimentelle simuleringer.

#### Simuleringsverktøy WUFI+

WUFI består av flere simuleringsprogram, for denne oppgaven er WUFI+ brukt. WUFI står for «Wärme Und Feuchte Instationär», før, gjennom DIN4108, var det hovedsakelig Glaser metoden som ble brukt. Denne metoden tar bare for seg damp diffusjon transport gjennom diverse komponenter, men tar ikke for seg kapillær transport og sorpsjon gjennom komponenter. Dette gjør derimot WUFI, noe som gjør resultater fra WUFI mer pålitelig [16]. Ligning 17 omhandler varmetransport, nummer 18 er fukttransport.



WUFI+ baserer seg på følgende matematiske modeller:

*Varme transport:*

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\phi p_{sat})) \quad (17)$$

*Fukt transport:*

$$\frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\phi \nabla \phi + \delta_p \nabla (\phi p_{sat})) \quad (18)$$

[17]

WUFI+ bygger opp modeller i gren formasjoner. Først lokasjon, klima, så soner og type bygningskomponenter i sonene som brukes. Videre velges type materialer til forskjellige soner og hvilken startbetingelse som skal brukes for hver komponent i soner valgt. Figur 26 viser forskjellige input i WUFI+ modeller som er brukt for denne oppgaven. Modellene brukt i denne oppgaven er bygget opp etter dimensjoner gitt i klimarommets geometri. Videre er det også nødvendig å velge areal betong og PCM skal dekke. For betong ble det enkelt målt dimensjoner, men for PCM var det nødvendig å finne PCM fraksjonen av hvert PCM teppe. Grunnen til dette er fordi PCM teppene består av forskjellige kammer fylt med PCM. WUFI+ ser på PCM laget som et fortsettende lag med PCM og gips, dermed ble det utregnet fraksjon med hensyn på antall kammer per kvadratmeter. For himling ble arealet utregnet til 3,44 m<sup>2</sup>, for vegg ble det 3,08 m<sup>2</sup>. Disse områdene ble designet med å koordinere korrekte punkter, vertices, i WUFI+ plassert midt på tak og vegg arealer. For eksternt klima i WUFI+ er det skapt en egen klimafil for hvert scenario der input er omgivelsestemperatur for hvert eksperiment som er utført. Både intern laster og solstråling er simulert gjennom intern last muligheten til WUFI+, ingen vindu ble simulert. Solstrålingen ble derimot simulert som en internlastpost med bare varmestråling. Verdier som ble brukt her er forklart i tabell 9 fra eksperiment del av metode. Når det gjelder internlastene er disse delt inn i konvektiv og stråle varme, belysning er kun stråle varme, teknisk utstyr kun konvektiv varme for mennesker en kombinasjon. I tillegg ble det for mennesker brukt kalkulator i WUFI+ for å finne met, fukt og CO<sub>2</sub> verdier for en sittende person, disse verdiene ble så ganget opp med 1,5 som er mengden menneskelig internlast som er satt for disse eksperimentene. Når det gjelder temperatur/entalpi kurve for PCM som er valgt er dette verdier basert på PCM som har samme smelte og fryse forhold som PCM brukt i eksperimenter. Figur 25 viser forholdet mellom temperatur og entalpi brukt for simulert PCM.

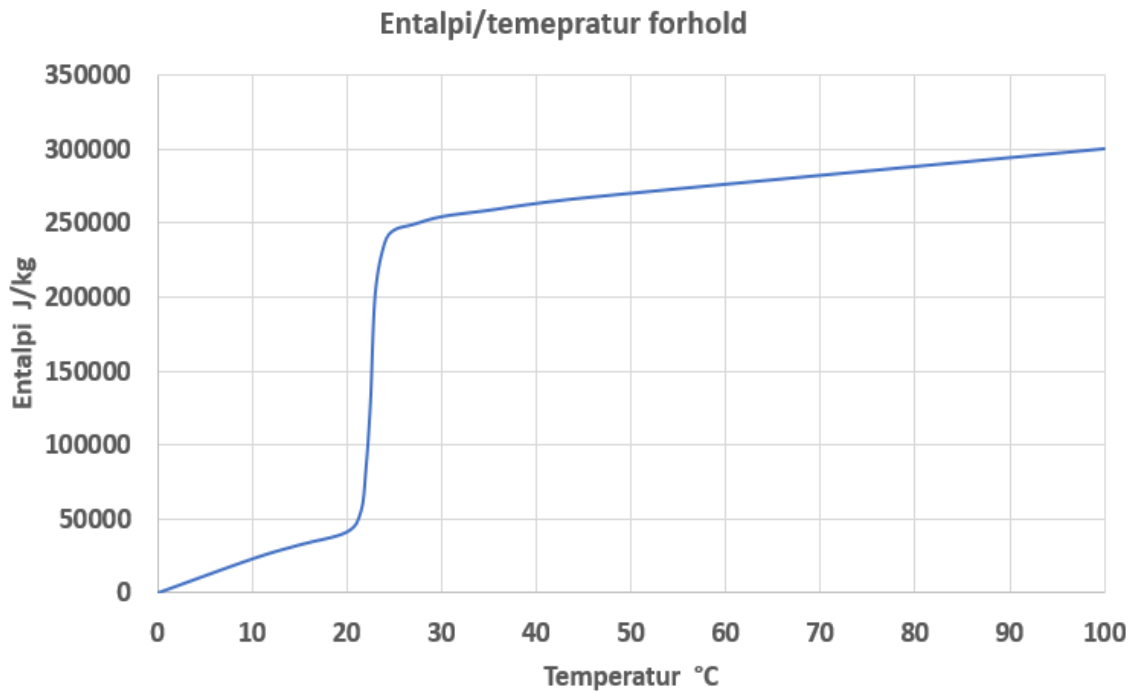
For senere å kunne sammenligne operativ temperatur mellom WUFI+ og eksperimenter er formel 19 og 20 brukt. Det er beregnet operativ temperatur for alle scenarioer hvert minutt ved bruk av disse formelene. Se vedlegg 2 for tall brukt i beregning og vedlegg 3 for alle tabellverdier for hvert scenario, vedlegget viser timesverdier grunnet ekstrem datamengde ved bruk av minutter.

$$t_{op} = \frac{MRT + t_{air}}{2} \quad (19)$$

$$MRT^4 = t_1^4 F_{p-1} + t_2^4 F_{p-2} + \dots + t_n^4 F_{p-n} \quad (20)$$

$$MRT = \sqrt[4]{MRT^4} \quad (21)$$

Det er plassert sensorer på alle overflater, og en del sensorer som måler lufttemperatur. For overflater med flere sensorer enn en er det regnet ut gjennomsnittstemperatur for overflatene. Videre er det beregnet gjennomsnittlig strålingstemperatur som settes direkte inn i formel for operativ temperatur. Etter operativ temperatur er beregnet kan eksperimenter og simuleringer fra WUFI+ sammenlignes gjennom denne variabelen.



Figur 25 Entalpi/temperatur forløp for PCM i simuleringer

Type	Input	Tetthet	Porositet	Spesifikk varme kapasitet	Termisk konduktivitet	Vann damp diffusions resistanse faktor	Typisk innebygd fukt
Tidsintervall	4 døgn	-	-	-	-	-	-
Klimafil	Se vedlegg	-	-	-	-	-	-
Dimensjoner	Se metode	-	-	-	-	-	-
Materialer		-	-	-	-	-	-
Aluminium	-	2700	0.1	900	200	0.1	0.1
Polyuretan	-	44.3	0.97	1450	0.0224	85.8	0.7
Parkett	-	400	0.73	1400	0.09	200	60
Luft	-	1.3	0.999	1000	0.94	0.07	0.01
PCM	-	235	0.0001	1970	0.2	10000	0
Betong	-	2315	0.1296	500	1.4	182.5	52
Massivtre	-	410	0.74	1300	0.098	500	48
Intern laster	Se metode	-	-	-	-	-	-
Design forhold	Se vedlegg (tilluftstemperatur)	-	-	-	-	-	-
Ventilasjon	Se metode	-	-	-	-	-	-
HVAC	Mekanisk ventilasjon	-	-	-	-	-	-

Figur 26. Input i WUFI+ modeller

### 3. Resultater & Diskusjon

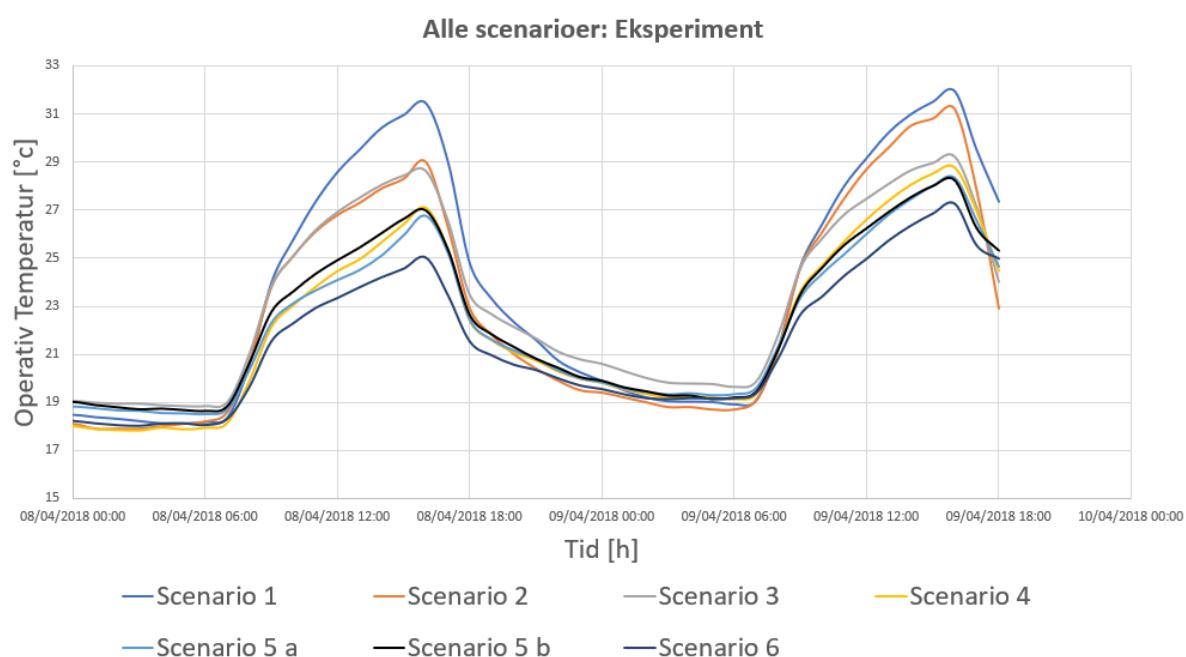
#### 3.1. Eksperimenter

Videre i resultater, både for eksperimenter og simuleringer, framgår det operativ temperatur over fire tidsperioder. Tabell 13 henviser til beskrivelse av topp- og bunnpunkt for de forskjellige scenarioene. For hver av scenarioene er fire punkter av interesse lagt til rette for videre inspeksjon, disse er bunn og toppunktene for hver eksperimentell dag. Det vil si 07:00 på morgenen og 16:00 på ettermiddag, dette er punkter for hvert scenario der temperaturøkning starter og topper seg i disse. Punktene vil bli henvist til som tabell 13 beskriver.

Tabell 13. Kritiske punkter.

Beskrivelse av kritiske punkter	
Kritisk bunnpunkt 07:00 dag 1	B1
Kritisk bunnpunkt 07:00 dag 2	B2
Kritisk toppunkt 16:00 dag 1	T1
Kritisk toppunkt 16:00 dag 2	T2

Figur 27 viser operative temperaturer av alle eksperimenter over en tidsperiode som går over et døgn og 18 timer, logging begynte før denne tidsperioden, som er klimatiseringsperioden. Alle scenarioer starter innenfor en temperaturredifferanse på ca. 1°C. Grafen viser at scenario 1 og 2 er nærmere 18°C, der resterende scenarioer er nærmere 19°C. Grunnen til dette er at resterende scenarioer ble kjørt med tettere intervaller enn de to første scenarioene, noe som igjen førte til at klimatiseringsfasen startet fra en høyere temperatur.



Figur 27. Operativ temperatur for alle scenario.

Ved nærmere inspeksjon er den største differansen på T1 mellom scenario 1 og scenario 5b, denne differansen er 6,5°C. Dette er forventet med tanke på naturen til de to scenarioene, der scenario 1 er uten noen termiske elementer, men scenario 5b har tre termiske elementer samt en konstant tilluftstemperatur på 16°C. Det er en gjengående tendens at T2 har høyere temperatur enn hva T1 har i alle scenarioer, men temperatur differansen er forskjellig fra scenario til scenario.

### 3.1.1. Sammenlignbare scenarioer: Eksperiment

#### Scenario 1, 2 og 3

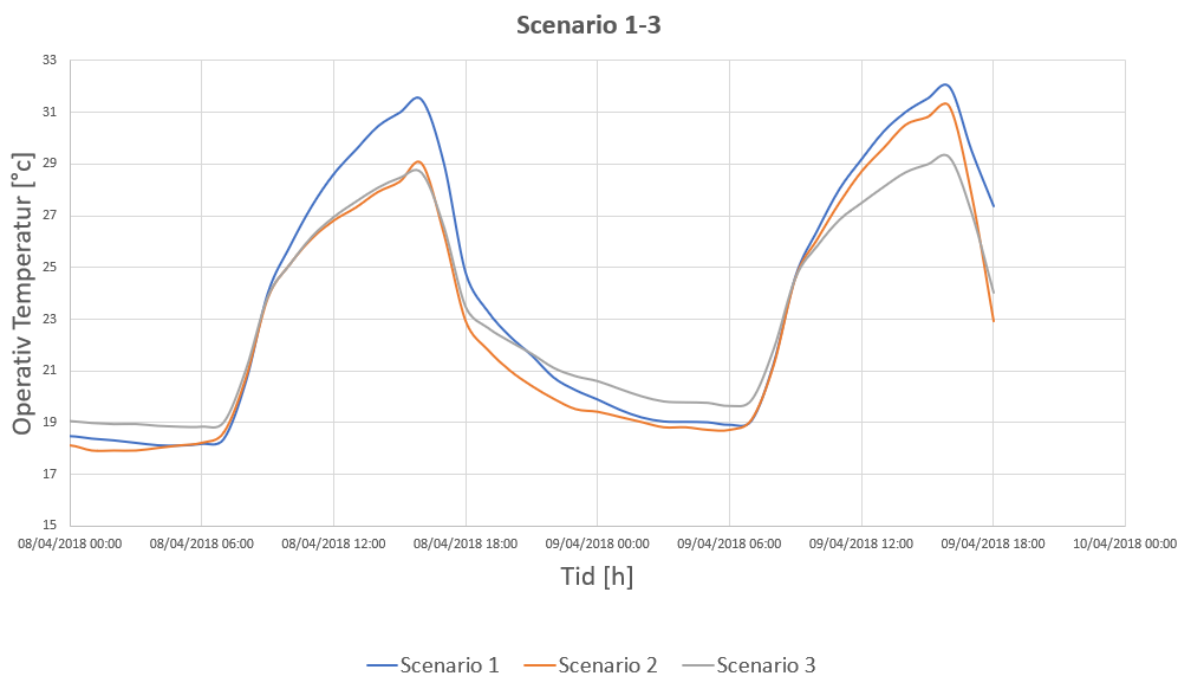
Gjennom den første dagen viser scenario 2 og scenario 3 så å si helt lik temperaturtopp der operativ temperatur ble målt til henholdsvis 29°C og 28,6°C. Referanse varianten, scenario 1, viste en temperaturtopp for den første dagen på 31,46°C. Differansen i operativ temperatur i henhold til referanse scenario for punkt T1 ble dermed beregnet til 6,67% for scenario 2 og 8,95% for scenario 3.

Etter T1 for den første dagen reduseres operativ temperatur jevnt mellom scenario 2 og 3 fram til klokken 18:00. Ved dette tidspunktet måles kraftigere reduksjon i temperatur for scenario 2 enn 3. Fra klokken 21:00 har scenario 1 også en større reduksjon i operativ temperatur enn hva scenario 3 har. Operativ temperatur blir målt høyere for scenario 3 hele natten fram til 09:00 for andre dag og stabiliseres ved 19,7°C. Fra 09:00 er det en lik temperatur utvikling for alle tre scenarioer som vedvarer fram til 10:00.

Målte operative temperaturer for scenario 3 viser starten på en stabiliseringsprosess fra klokken 10:00. Det er en mindre økning i operativ temperatur og T2 for scenario 3 er målt til 29,24°C. For både scenario 1 og 2 er det en kraftigere økning i operativ temperatur før punktet T2. For referanse forsøket er denne toppstemperatur målt til 31,95°C og for scenario 2 målt til 31,2°C. Her observeres en differanse i operativ temperatur mellom scenario 2 og 3 på 2,34°C som utgir 7,4%.

Målinger for scenario 1-3 viser at alle scenarioer har en forhøyet toppstemperatur i henhold til første og andre dag. Scenario 1 har en liten økning på 0,49°C som utgir en prosentdifferanse på 1,54%. PCM på gulv, scenario 2, har den største forskjellen i henhold til operativ temperatur i topppunkter på 2,22°C som utgjør 7,01% differanse. Betong på gulv har en mindre temperaturøkning målt til 0,6°C som tilsier 2,04% temperaturdifferanse.

Scenario 3 som omhandler betong på gulv opprettholder en jevnere temperatur utvikling over to døgn i motsetning til scenario 2 som får en forhøyet temperatur utvikling som er likere referanse scenario.



Figur 28. Operativ temperatur scenario 1-3.

Tabell 14. Differanser mellom scenario 1-3.

	<b>S1-S2</b>		<b>S2-S3</b>		<b>S3-S1</b>	
	<b>Δt</b>	<b>Δ%</b>	<b>Δt</b>	<b>Δ%</b>	<b>Δt</b>	<b>Δ%</b>
<b>B1</b>	0.51	2.68	0.12	0.65	0.63	3.31
<b>T1</b>	<b>2.10</b>	<b>6.67</b>	<b>0.72</b>	<b>2.45</b>	<b>2.82</b>	<b>8.95</b>
<b>B2</b>	0.65	3.31	0.12	0.62	0.78	3.91
<b>T2</b>	<b>0.38</b>	<b>1.18</b>	<b>2.34</b>	<b>7.40</b>	<b>2.71</b>	<b>8.49</b>

Tabell 15. Differanser mellom topp og bunn punkt.

<b>Scenario 1</b>	<b>Operativ temperatur periode 1</b>	<b>Operativ temperatur periode 2</b>	<b>Δt</b>	<b>Δ%</b>
<b>T1-T2</b>	<b>31.46</b>	<b>31.95</b>	<b>0.49</b>	<b>1.54</b>
<b>B1-B2</b>	18.38	19.09	0.71	3.72
<b>Scenario 2</b>				
<b>T1-T2</b>	<b>29.36</b>	<b>31.58</b>	<b>2.22</b>	<b>7.01</b>
<b>B1-B2</b>	18.89	19.39	0.50	2.56
<b>Scenario 3</b>				
<b>T1-T2</b>	<b>28.64</b>	<b>29.24</b>	<b>0.60</b>	<b>2.04</b>
<b>B1-B2</b>	19.01	19.87	0.86	4.31

Som nevnt får scenarioet som omhandler kun betong en mindre reduksjon i operativ temperatur etter 18:00, dag 1, enn hva scenario med PCM på gulv har. Hovedgrunnen til dette ligger i egenskap

karakteristikken til PCM og betong. Betong har en treg varmeledning men en god varmekapasitet. Betong vil ta til seg varme gjennom hele dagen, samtidig som flere og flere varmekilder slutter å være aktiv, som internlast og solstråling. Etter hvert vil det inntreffe et punkt hvor betongen har større varmekapasitet enn omgivelser, da vil operativ temperatur i rom falle saktere enn om betong ikke er til stede. Fra klokken 20:00 dag 1 holder scenario 3 en høyere operativ temperatur gjennom natten enn både scenario 2 og referanse eksperimentet. Denne tendensen vedvarer til 08:00 morgenen etter, men her har scenarioene et krysspunkt der scenario 3 videre har lavere operativ temperatur enn både scenario 1 og 2.

Når det gjelder scenario 2 kan en se en god utvikling over dag 1, men i løpet av natten reduseres ikke operativ temperatur nok, under 18°C, noe som fører til at færre PCM moduler solidifiseres. Dette vises meget tydelig fra B1 til T1, der scenario 2 har en operativ temperatur differanse gitt 1,18%. Hadde en eksperimentdag blitt kjørt det antas at referanse og scenario 2 eksperimentet hadde vært så å si lik, derav scenario 3 ville fått en liten økning i toppetemperatur for neste dag.

#### Scenario 4, 5a og 6

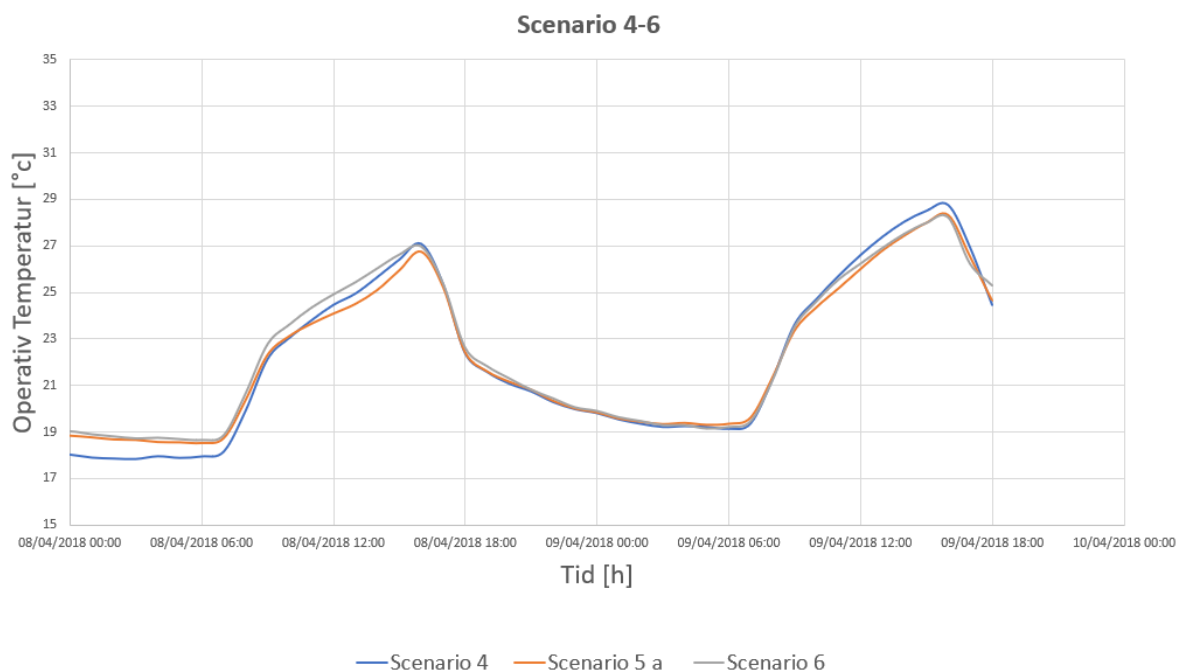
Toppunktet for den første dagen viser omtrent lik operativ temperatur for alle scenario på ca. 27°C, der den største temperturdifferansen er mellom scenario 4 og 5a på 0,33°C. Ved sammenligning av scenario 4 og 6, henholdsvis ett og to lag med PCM i himling, er det nesten helt lik operativ temperatur for T1 første dag.

Etter T1 fortsetter den like temperaturendringen for alle scenarioer hele perioden fram til 10:00 for den andre dagen. En større økning kan observeres for scenario 4 hele veien til T2, klokken 16:00. Selv med denne endringen er det en liten differanse mellom scenarioer i T2, der operativ temperatur for scenario 4 er 0,42°C høyere enn scenario 5a og 0,52°C høyere enn scenario 6. Med tanke på scenarioene som har et og to lag PCM i himling, henholdsvis scenario 4 og scenario 6, er det nesten ingen forskjell i T1. Temperatur økning er 0,1 °C mellom scenario 4 og 6 som gjengir 0,37% differanse forskjell, men i T2 øker denne differansen til 1,8%.

For bunnpunkt på første dagen har scenario 4 en lavere starts temperatur, denne forskjellen er ca. 3°C for å nå lik operativ temperatur som de to andre scenarioene i klimatiseringsperioden. Denne forskjellen i start av eksperimenter kan ha påvirket videre temperatur forløp i klimarommet.

Ved sammenligning av toppunktene for første og andre dag kan en større forskjell observeres i operativ temperatur fra scenario til scenario. For scenario 4 er det en økning av operativ temperatur på 1,67°C som tilsier en temperaturdifferanse på 5,81%. Scenario 5a har en temperaturøkning på 1,58°C som gir en temperaturdifferanse på 5,57%. Den minste differansen kan observeres for scenario 6 med en økning i operativ temperatur målt til 1,25°C som gir en temperaturdifferanse lik 4,44%.

Målingene viser en jevn tendens over hele perioden for alle tre scenarioer. Det er liten operativ temperatur differanse mellom scenarioer, der den er størst mellom scenario 4 og 5a. Lik tendens som alle scenarioer observeres i løpet av andre dag, der en klar økning i operativ temperatur måles mellom T1 og T2.



Figur 29. Operativ temperatur scenario 4,5a og 6.

Tabell 16. Differanser mellom scenario 4, 5a og 6.

	S4-S5a		S5a-S6		S6-S4	
	$\Delta t$	$\Delta\%$	$\Delta t$	$\Delta\%$	$\Delta t$	$\Delta\%$
<b>B1</b>	0.57	3.04	0.14	0.77	0.71	3.79
<b>T1</b>	<b>0.33</b>	<b>1.23</b>	<b>0.23</b>	<b>0.86</b>	<b>0.10</b>	<b>0.37</b>
<b>B2</b>	0.25	1.25	0.14	0.71	0.11	0.55
<b>T2</b>	<b>0.42</b>	<b>1.48</b>	<b>0.09</b>	<b>0.33</b>	<b>0.52</b>	<b>1.80</b>

Tabell 17. Differanser mellom topp og bunn punkt.

Scenario	Operativ temperatur periode 1	Operativ temperatur periode 2	$\Delta t$	$\Delta\%$
<b>Scenario 4</b>				
<b>T1-T2</b>	<b>27.07</b>	<b>28.74</b>	<b>1.67</b>	<b>5.81</b>
<b>B1-B2</b>	18.14	19.35	1.21	6.25
<b>Scenario 5a</b>				
<b>T1-T2</b>	<b>26.74</b>	<b>28.32</b>	<b>1.58</b>	<b>5.57</b>
<b>B1-B2</b>	18.71	19.60	0.89	4.52
<b>Scenario 6</b>				
<b>T1-T2</b>	<b>26.99</b>	<b>28.23</b>	<b>1.25</b>	<b>4.44</b>
<b>B1-B2</b>	18.86	19.46	0.60	3.10

Figur 29 framviser operativ temperatur i scenario 4, 5a og 6 over en gitt tidsperiode. Disse tre scenarioene omhandler forskjellig plassering av PCM i klimarom og et fast lag betong på gulv, alle scenarioer har tre termiske elementer bortsett fra scenario 4 som har to.



Alle tre scenarioer har lignende differanser og tendenser, her er det ikke store forskjeller. De største forskjellene i disse scenarioene framtrer mellom toppunkter i henhold til individuelle scenario. Hovedårsaken til at scenario 4 har større differanse enn de to andre variantene er at dette er det eneste scenarioet med et lag PCM, resterende scenario har to lag PCM, dette er nesten en fordobling av PCM. Siden laveste temperatur i løpet av natten holder seg høyere enn 19°C vil ikke alt av PCM være solidifisert, men et større areal med PCM matter vil gi en større rate av PCM som utfører en faseendring selv om ikke 100% solidifisering er oppnådd.

Det kan også observeres at temperatur fra klimatiseringsperiode er noe lavere for scenario 4, om denne temperaturen hadde vært likere de andre scenarioene kunne en større differanse mellom toppunkter sannsynligvis blitt observert. En forhøyet operativ temperatur i starten ville sannsynligvis gitt en høyere temperatur over hele den eksperimentelle perioden.

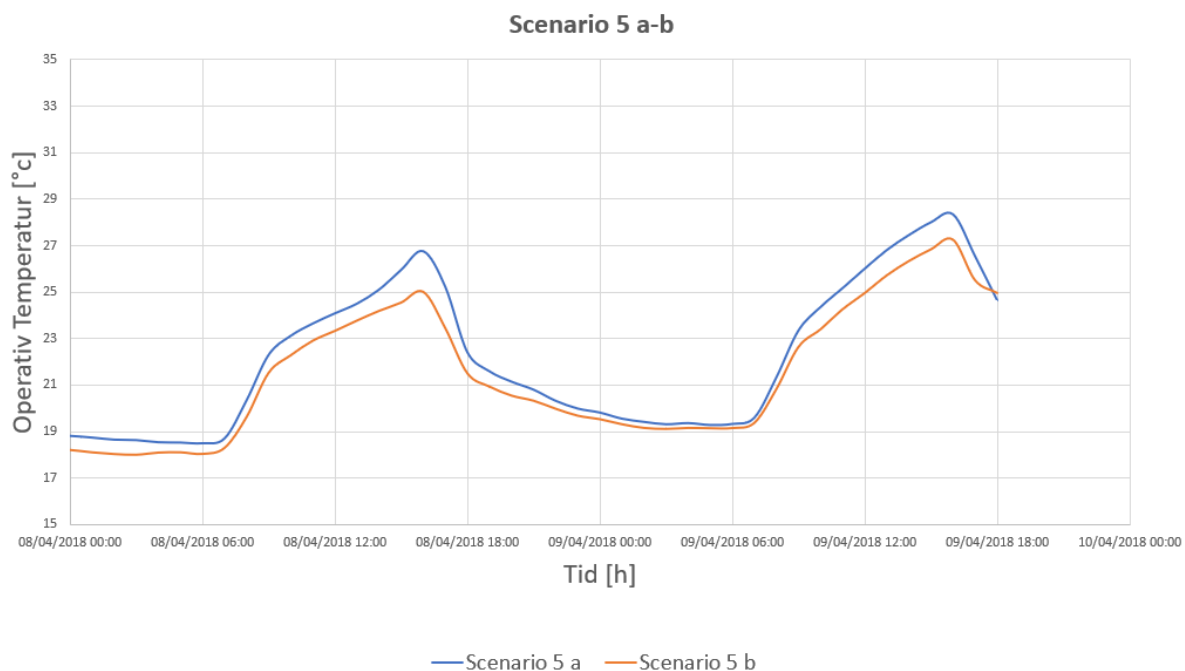
#### Scenario 5a og 5b

Følgende to scenarioer er betong på gulv, PCM i himling og vegg. Eneste forskjell her er tilluftstemperatur. Scenario 5a følger vanlig strategi for tilluftstemperatur, scenario 5b derimot ble utført med 16°C konstant over hele tidsperioden. Begge scenario viser like tendenser over tidsperioden men med differanser i operativ temperatur spesielt ved varmeste tidspunkt på dagen.

Det er en klar forskjell i første dags toppunkt. Her har scenario 5b en klart lavere operativ temperatur som er målt til 25°C derav scenario 5a har en operativ temperatur lik 26.75°C, dette gir en differanse i operativ temperatur på 6,51%.

Etter T1 reduseres temperaturdifferanse mellom begge scenarioer og konvergerer mot samme temperatur klokken 07:00 for dag 2. Temperaturforløpet holder seg likt fram til klokken 09:00 hvor effekten av konstant 16°C tilluft vises. Ved andre dags toppunktstemperatur scenario 5b fremdeles lavest toppunktstemperatur. T2 viser for scenario 5b en operativ temperatur på 27,24°C og for scenario 5a er den 28.33°C, differanse på operativ temperatur blir dermed 3,82%.

Som alle utførte scenarioer kan en tydelig temperatur økning observeres fra første til andre dag i henhold til toppunkter. Scenario 5a har en økning på 1,58°C og 5b har en økning på 2,24°C, dette gir en differanse på 5,57% for scenario 5a og 8,22% for scenario 5b.



Figur 30. Scenario 5a-b.

Tabell 18. Differanse mellom scenario 5a-b.

<b>S5a-S5b</b>		
	<b><math>\Delta t</math></b>	<b><math>\Delta\%</math></b>
<b>B1</b>	0.41	2.21
<b>T1</b>	<b>1.74</b>	<b>6.51</b>
<b>B2</b>	0.23	1.16
<b>T2</b>	<b>1.08</b>	<b>3.82</b>

Tabell 19. Differanse mellom topp og bunnpunkt.

<b>Scenario 5a</b>	<b>Operativ temperatur periode 1</b>	<b>Operativ temperatur periode 2</b>	<b><math>\Delta t</math></b>	<b><math>\Delta\%</math></b>
<b>T1-T2</b>	<b>26.74</b>	<b>28.32</b>	<b>1.58</b>	<b>5.57</b>
<b>B1-B2</b>	18.71	19.60	0.89	4.52
<b>Scenario 5 b</b>				
<b>T1-T2</b>	<b>25</b>	<b>27.24</b>	<b>2.24</b>	<b>8.22</b>
<b>B1-B2</b>	18.30	19.37	1.07	5.54

Hovedgrunnen til at scenario 5b har en redusert operativ temperatur over hele tidsperioden har med tilluftstemperatur å gjøre. Alle forutsetninger er lik for disse to scenarioene unntatt redusert temperatur gjennom driftstid. Ved en reduksjon av tilluftstemperatur opprettholdes en lavere operativ temperatur i hele rommet over en gitt tidsperiode. Likheten som opptrer på kveld- og nattperioder er fordi begge scenarioer har lik tilluftstemperatur fra 17:00 og dette vedvarer fram til 07:00 dagen etter når tilluftstemperatur øker til 19°C igjen for scenario 5a. Operativ temperatur

starter å konvergere mot hverandre fra 18:00 til 03:00 på natten hvor operativ temperatur så å si er lik.

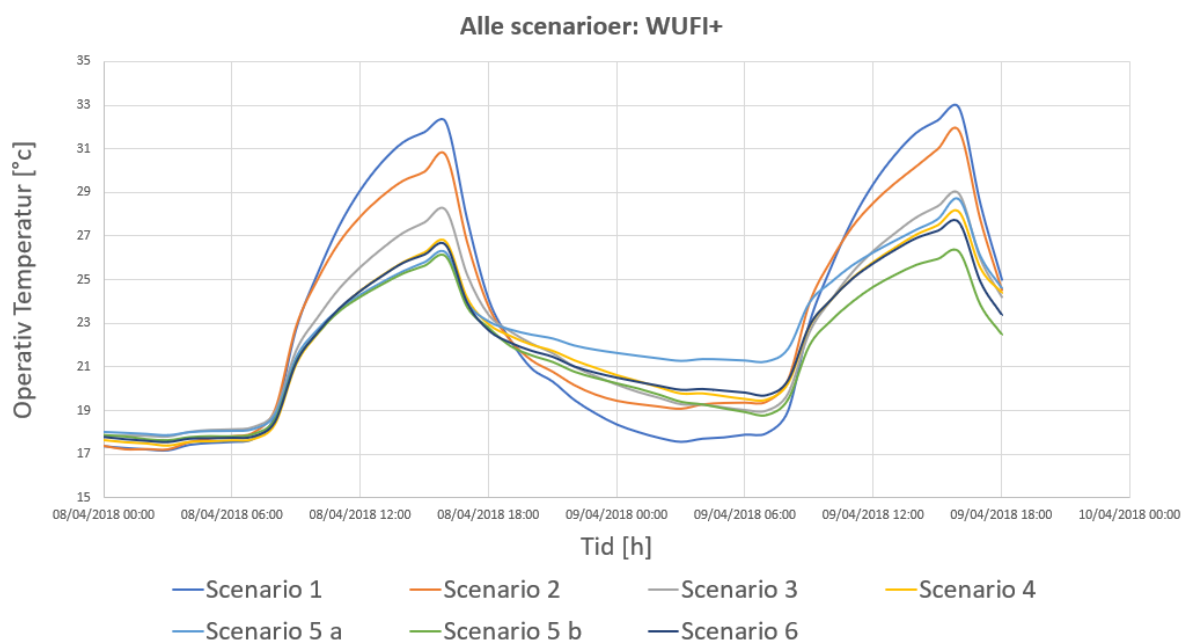
Det kan i tillegg observeres en liten temperaturforskjell ved første dags bunnpunkt. Denne forskjellen i operativ temperatur kan gi en noe forhøyet temperaturtopp for dag 1, men i løpet av natten har begge scenarioer konvergere mot 19,4°C som igjen tilsier at forskjell ved toppunkt 2 stemmer nokså bra.

### Generell diskusjon for eksperimenter

Både internlaster og sol stråling er simulert ved hjelp av varmemolier. Disse er plassert fornuftig i rom i henhold til hvor de forskjellige internlastene og sol strålingen opptrer i virkeligheten. Foliene er i tillegg styrt med tidsur for å gi varierende intensitet i løpet av et døgn. Selv med alle tiltenkte løsninger for å simulere riktig nok vil det sannsynligvis være noe variasjon i henhold til et virkelig kontor. Hver dag har et konstant varmetillegg i tre forskjellige tids steg, i virkeligheten vil både internlaster og solstråling variere i henhold til dager. En kan ikke si sikkert hvor mange personer som bruker kontoret, hvor mye teknisk utstyr som faktisk brukes og lignende. Siden eksperimentene er basert på konstante tall vil dette tilsa at det er en god tilnærming men ikke 100% korrekt. Når det gjelder tilluftstemperatur er aggregatet satt til 19°C i arbeidstid og 16°C utenfor arbeidstid. Som nevnt er det en kjøler som skal kunne redusere temperatur om en sensor føler temperatur stiger over settpunktverdi. Dette fungerer relativt bra, men med hvert skift av sluseåpning tar det ca. 30 minutter før den modifiserte kjøleren konvergerer mot korrekt settpunkt temperatur. Den vil med oppstart over- og underdimensjonere temperatur til slusen treffer f.eks. 16°C. Gjennom eksperimenter ser det ut til at det har hatt lite effekt på eksperimentene og diverse sensorer men på varmere dager vil dette bli et større problem, her er det et forbedringspotensial. I tillegg skulle det vært utført flere eksperimenter med forskjellige betong modifikasjoner, f.eks. betong i himling, betong på vegg osv. Dette vil gi et mer helhetlig bilde ved sammenligning mot for eksempel PCM i himling og vegg. Etter beregninger for klimarom ble det også kjent at dimensjonene for dette rommet ikke hadde klart kreftene som oppstår med en så stor vekt på et lite areal. Gjennom alle scenarioer ble det tydelig framstilt at en klimatiseringsperiode var nødvendig. Grunnet tidspress ble denne perioden satt til 2 dager, der den første dagen hadde tilluft på 12°C, andre klimatiseringsdag hadde tilluft på 16°C. Ved nærmere inspeksjon av klimatiseringsperiode til bunnpunkt 1 finnes en differanse på opptil 1°C mellom de to største avvikende scenarioer. En dag ekstra med 12°C ville sannsynligvis gi et mer konstant starttemperatur før de forskjellige eksperimentene startet.

### 3.2. Sammenligning av numeriske og eksperimentelle resultater

I tillegg til eksperimenter ble alle scenario simulert gjennom to separate dager, operativ temperatur for alle simulerte scenarioer er vist i figur 31. Målinger er gjort for hele perioden, 2 døgn og 18 timer, framstillinger av resultater er vist for de to siste døgn i henhold til topp og bunnpunkter. De fleste simuleringer har gått bra overens med utførte eksperimenter. Der alle topppunkter har vært innenfor en differanse på 5% mellom eksperimentelle og simulerte verdier.



Figur 31. Operativ temperatur for alle simulerte scenario.

Ved sammenligning av numeriske og eksperimentelle resultater ser vi at operativ temperatur treffer relativt greit over hverandre, se figur; 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38.

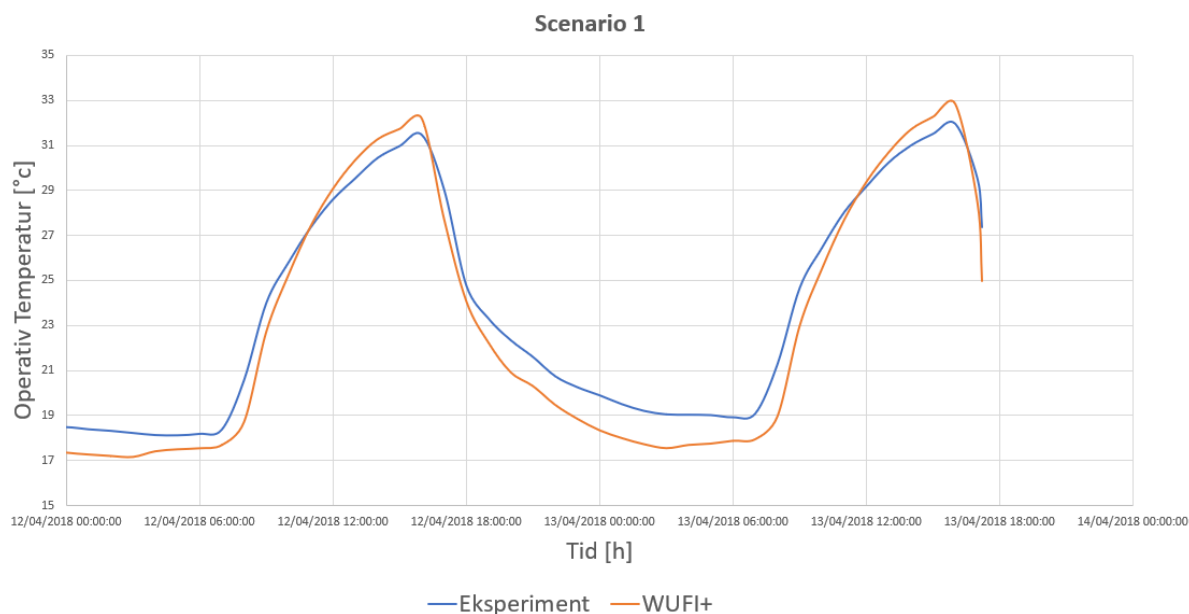
Simuleringer og eksperiment viser at alle topper, klokken 16:00, har en differanse innenfor et konfidensintervall på 95%. Det er derimot tre bunnpunkter som har noe over 5% temperaturforskjell mellom simuleringer og eksperimenter, dette er scenario 1-B2, scenario 5a-B2 og scenario 6-B1. Videre sammenligninger tar for seg hvert enkelt scenario.

#### Scenario 1

Gjennom den første dagen har simuleringer en noe høyere temperaturopp enn hva eksperimenter har. Simulering starter med en lavere operativ temperatur enn eksperimentelle verdier, før verdiene passerer eksperimentelle verdier klokken 11:00. Ved T1 er forskjellen på operativ temperatur 0,73°C, i henhold til denne temperaturen er differansen mellom eksperiment og simuleringer målt til 2,27% ved T1.

Simulerte og eksperimentelle verdier viser en lik reduksjon for operativ temperatur i to timer fra 16:00 (T1) til 18:00 første dag. Etter 18:00 starter en stabilisering av eksperimentelle temperaturer, denne stabiliseringen inntreffer likt for simuleringer men ikke like hurtig som eksperimenter. Ved B1 for andre dag kan en temperatur differanse observeres på 1,16°C, denne differansen reduseres på morgentimene.

Likt som for tidligere eksperimenter øker operativ temperatur ved T2 i henhold til T1. Differansen mellom simuleringer og eksperimenter er ved T2 0,9°C, dette gir en differanse på 2,73%.



Figur 32. Scenario 1 simulert mot eksperiment.

Tabell 20. Differanse mellom wufi og eksperiment S1.

Scenario 1	Operativ Temperatur <sub>Eksperiment</sub>	Operativ Temperatur <sub>Simulert</sub>	$\Delta T$	$\Delta\%$
B1	18.39	17.68	0.71	3.85
T1	<b>31.46</b>	<b>32.20</b>	<b>0.73</b>	<b>2.27</b>
B2	19.10	17.94	1.16	6.08
T2	<b>31.96</b>	<b>32.85</b>	<b>0.90</b>	<b>2.73</b>

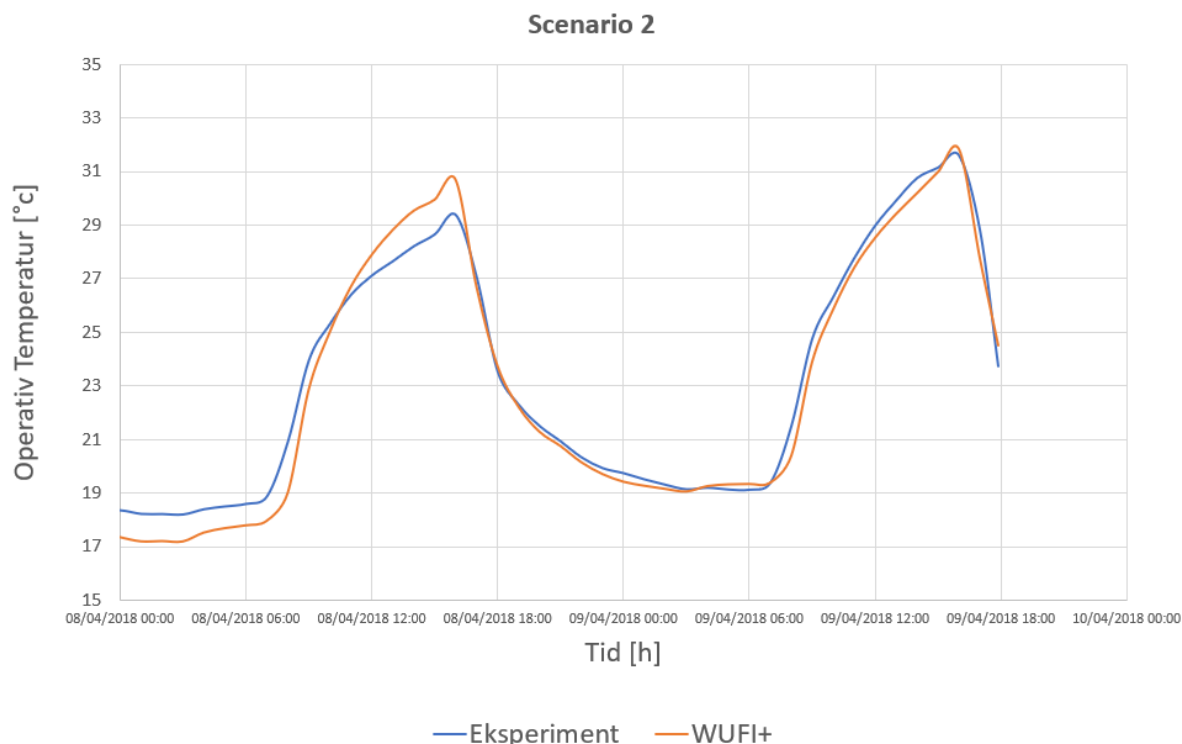
Forskjellen som opptrer mellom T1 og B2 kan forklares av material egenskaper i WUFI+. Modellen i WUFI+ er bygget opp av riktige type materialer og dimensjoner er helt korrekt. Det som kan påpekes er at materialene er bygget opp av egne komponenter i WUFI+. For å speile disse komponentene er det tatt utgangspunkt i et datablad fra Fresvik Produkt som beskriver de faktiske elementene brukt for klimarommet. Det har vært noe informasjon i dette databladet, men mangler nøyaktig beskrivelse av hvilke egenskaper aluminium og polyuretan har. Det som tydelig kommer fram fra figur 32 er at WUFI+ klarer å redusere operativ temperatur over natten bedre enn hva eksperimentene tilsier, men for begge toppunkter opprettholder eksperimenter lavere temperatur enn WUFI+. Dette kan tilsa at det er gitt bedre egenskaper til materialer i WUFI+ angående varmekapasitet enn hva materialene faktisk har.

### Scenario 2

Scenario 2 viser en del differanser for første dag. I begynnelsen av perioden ved B1 har simuleringer lavere operativ temperatur enn eksperimenter. Simuleringer viser 0,91°C lavere temperatur enn for eksperimenter. Klokket 11:00 går operativ temperatur forbi eksperimentelle verdier i simuleringer og viser for toppunkt på første dag en temperatur differanse på 1,35°C som gir en prosentdifferanse på

4,39%. Etter T1, for scenario 2, konvergerer simulerte og eksperimentelle verdier mot samme operative temperatur. Denne tendensen fortsetter gjennom resten av tidsperioden.

For den andre dagen er det nesten ingen forskjell på toppetemperatur. Verdiene viser en forskjell på simulerte og eksperimentelle verdier gitt 0,26°C som tilsier 0,82% differanse i operativ temperatur.



Figur 33. Scenario 2 simulert mot eksperiment.

Tabell 21. Differanse mellom wufi og eksperiment S2.

Scenario 2	Operativ Temperatur <sub>Eksperiment</sub>	Operativ Temperatur <sub>Simulert</sub>	$\Delta T$	$\Delta\%$
B1	18.89	17.98	0.91	4.82
T1	<b>29.37</b>	<b>30.72</b>	<b>1.35</b>	<b>4.39</b>
B2	19.75	19.44	0.31	0.08
T2	<b>31.58</b>	<b>31.84</b>	<b>0.26</b>	<b>0.82</b>

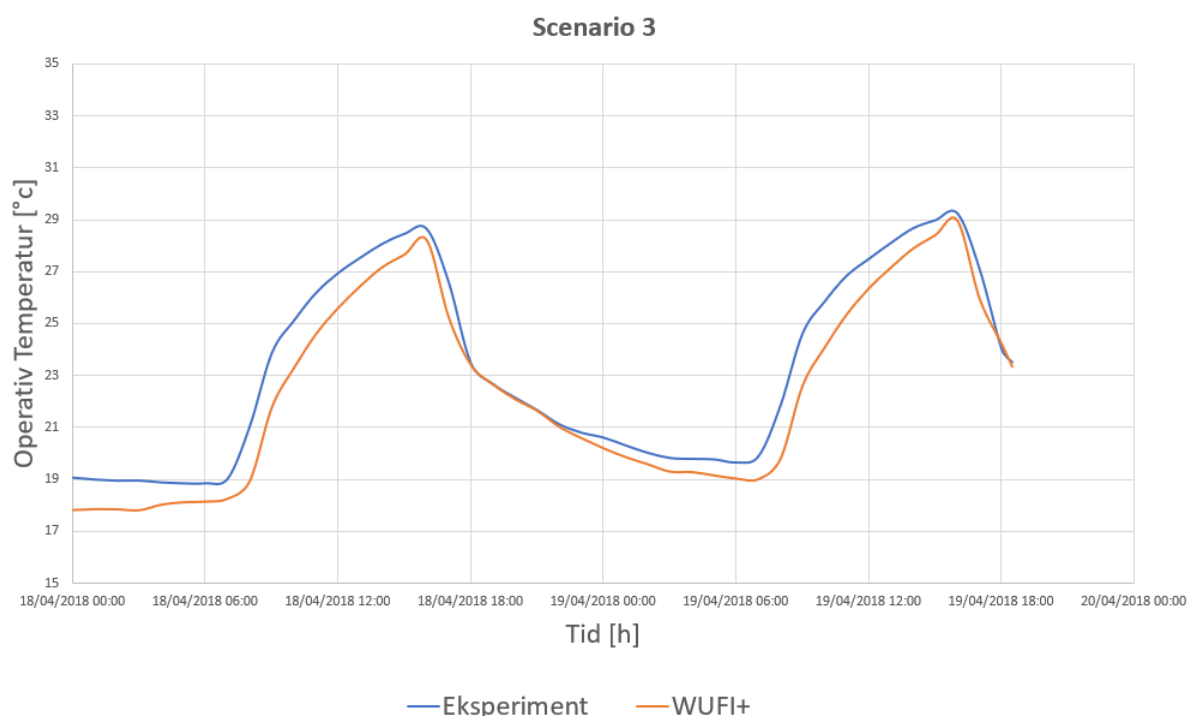
Ved dag 1 kan samme type mønster som foregår i scenario 1 observeres, derav for dag 2 er det bedre speiling mellom eksperimenter og simuleringer. I dette scenarioet kan det tenkes at PCM har vært aktiv til natt på dag 1, men uten å stivne til senere på natten. Dette kan ha ført til likere utgangspunkt for dag 2 der scenarioer speiles bedre. For aktuell PCM er det ikke gitt et klart temperatur/entalpi spekter, men det er utgitt hvor PCM starter å smelte og fryse. Ut i fra disse temperatur verdiene er det funnet et PCM med like fryse og smelte verdier, og dermed brukt denne PCM's temperatur/entalpi forløp. I tillegg til dette har WUFI+ kun tilgang til et PCM materiale, og dette er inkorporert med en gips plate. Dette er en feilkilde i henhold til aktuell PCM og brukt PCM i simulering.

### Scenario 3

Gjennom tidsperioden simuleringer og eksperimenter har forgått for scenario 3 kan like tendenser observeres, men med størst differanse i operativ temperatur på morgentimene.

For første dag så vises en differanse i B1 på 0,77°C, klokken 10:00 øker denne differansen noe før differansen reduseres mot første toppunkt. Ved T1 er det en temperaturdifferanse på 0,44°C hvor eksperimenter er 28,6°C og simuleringer viser 28,2°C.

Etter første toppunkt kan en likere operativ temperatur observeres fram til andre dag klokken 04:00. For dag to oppstår samme tendenser for operativ temperatur både for eksperimenter og simuleringer. For B2 er det en differanse i operativ temperatur på 0,88°C og klokken 10:00 sees en økende differanse før den igjen reduseres mot T2. Forskjellen i operativ temperatur ved T2 for andre dag er 0,29°C og etter klokken 16:00 kan en igjen se et veldig likt temperaturforløp med små differanser.



Figur 34. Scenario 3 simulert mot eksperiment.

Tabell 22. Differanse mellom wufi+ og eksperiment S3.

Scenario 3	Operativ Temperatur <sub>Eksperiment</sub>	Operativ Temperatur <sub>Simulert</sub>	$\Delta T$	$\Delta\%$
B1	19.02	18.25	0.77	4.06
T1	28.65	28.21	0.44	1.54
B2	19.88	19.00	0.88	4.41
T2	29.25	28.96	0.29	0.98

Når det gjelder brukte betongheller var det kun termisk konduktivitet databladet gav innsyn i. Spesifikk varmekapasitet kunne ikke framdrives. Dette førte til prøving og feiling basert på erfaren gjetning for spesifikk varme kapasitet. Det mest framtreddende i figur 34 er periodene B1 til T1 og B2 til T2. Denne

differansen framkommer sannsynligvis av at det er valgt noe bedre egenskaper for betong i WUFI+ i forhold til aktuelle betongheller.

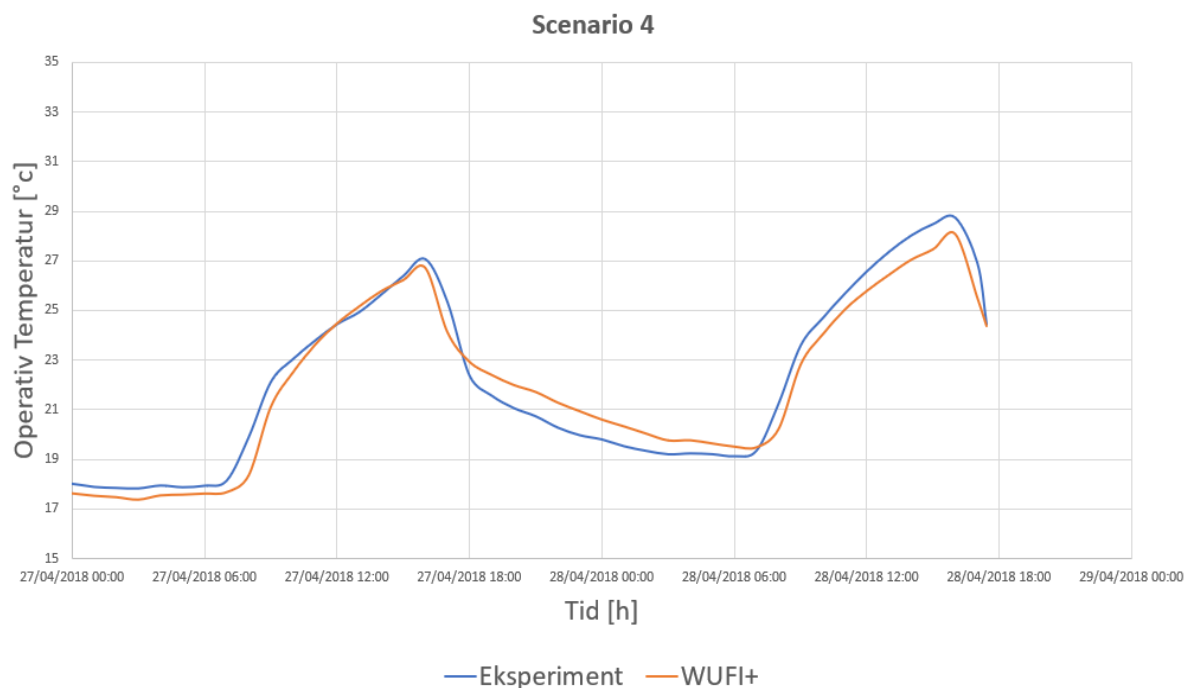
#### Scenario 4

Scenario 4 viser et bra samsvar i operativ temperatur fra klimatiseringsperioden, og en lik tendens i temperaturforløp framstår.

Målinger og simuleringer den første dagen viser liten differanse mellom B1 og T1. For bunnpunktet er det en temperatur forskjell på 0,47°C, videre er det en liten forskjell i operativ temperatur fram til 11:00 hvor temperatur mellom eksperimenter og simulering er lik. Toppunktet for dag en viser en temperaturforskjell på 0,35°C som tilsvarer 1,29% der eksperimenter har noe høyere temperaturer enn simuleringer.

Fra klokken 16:00 til 18:00 er det liten differanse mellom operativ temperatur, men etter 18:00 viser simuleringer en høyere temperatur enn hva eksperimentelle verdier viste. Denne forskjellen vedvarer fram til 04:00 før simulerte temperaturer starter en reduksjon mot eksperimentelle temperaturer.

For dag to sees en noe større differanse i henhold til operativ temperatur som starter etter 08:00, simulerte verdier er lavere enn eksperimentelle verdier resten av dagen. Ved T2 er det en differanse i operativ temperatur på 0,68°C som tilsier en prosentforskjell på 2,28%.



Figur 35. Scenario 4 simulert mot eksperiment.



Tabell 23. Differanse mellom wufi+ og eksperiment S4.

Scenario 4	Operativ Temperatur <sub>Eksperiment</sub>	Operativ Temperatur <sub>Simulert</sub>	$\Delta T$	$\Delta \%$
<b>B1</b>	18.15	17.68	0.47	2.58
<b>T1</b>	<b>27.08</b>	<b>26.73</b>	<b>0.35</b>	<b>1.29</b>
<b>B2</b>	19.36	19.49	0.13	0.68
<b>T2</b>	<b>28.75</b>	<b>28.10</b>	<b>0.65</b>	<b>2.28</b>

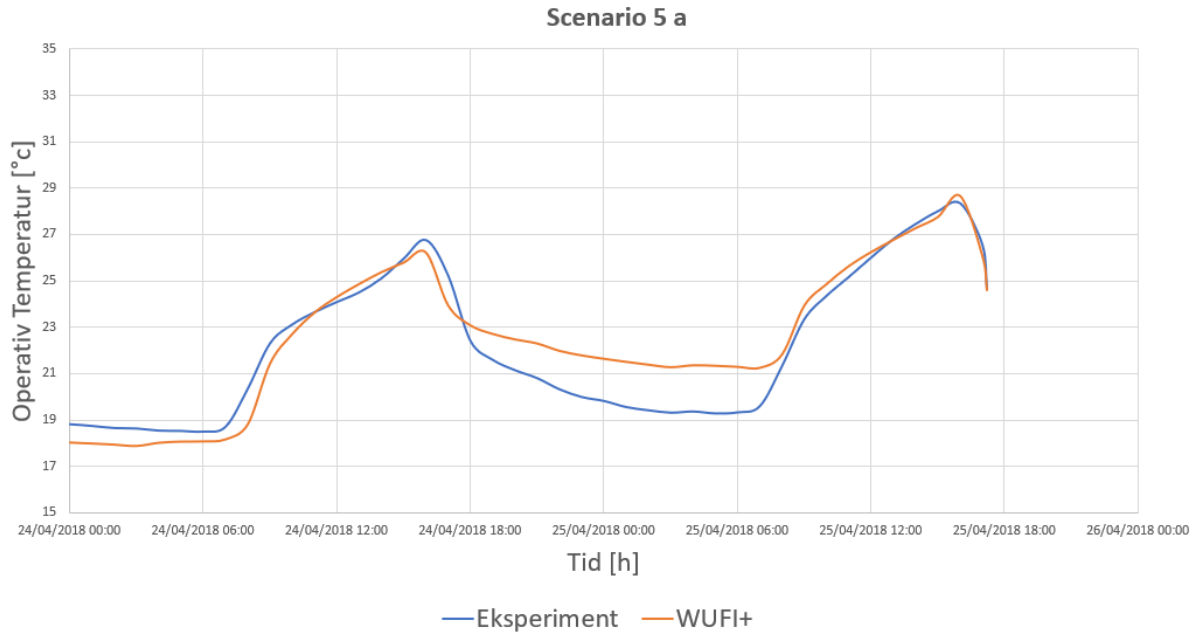
Den største variasjonen i scenario 4 er fra 18:00 dag 1 til 07:00 dag to. Eksperimenter holder lavere operativ temperatur i denne perioden enn hva simuleringer gjør. For dag en følger eksperimenter og simuleringer omtrent like resultater, men fra B2 kan en se samme tendenser som en ser i figur 35 dette kan igjen forklares gjennom hvordan valgt PCM i WUFI+ oppfører seg ved gitte temperaturer. B2 har en operativ temperatur målt til 19.49°C som laveste temperatur dette døgnet, dette er over frysepunktet til aktuell og simulert PCM, noe som igjen tilsier at materialet har en høyere entalpi. Dette kan igjen tilnærmes til at målingene blir lik som scenario 3, som bare har betong på gulv.

#### Scenario 5a

Første dag viser omtrent like tendenser som for scenario 4, operativ temperatur er høyere for eksperimentelle verdier enn for simulerte verdier fram til 11:00 der differansen nesten er lik null. Differansen i operativ temperatur ved T1 viser 0,51°C der eksperimentelle temperaturer er høyest, prosentdifferansen for T1 er 1,92%.

Etter T1 første dag reduseres operativ temperatur omtrent likt fram til 18:00, ved dette tidspunktet reduseres operativ temperatur for eksperimenter mye hurtigere enn for simulerte verdier. Denne tendensen vedvarer fram til 08:00 for andre dag, der det vises en differanse i operativ temperatur ved B2 på 1,64°C.

Fra 08:00 til T2 for dag to er det nesten helt likt temperaturforløp, der temperaturdifferansen mellom eksperimentelle og simulerte verdier er 0,35°C noe som tilsier 1,23%. Videre fram til eksperiment slutt er temperaturforløpet likt mellom simulerte og eksperimentelle verdier.



Figur 36. Scenario 5a simulert mot eksperiment.

Tabell 24. Differanse mellom wufi og eksperiment S5a.

Scenario 5a	Operativ Temperatur Eksperiment	Operativ Temperatur Simulert	$\Delta T$	$\Delta\%$
B1	18.72	18.15	0.57	3.02
T1	<b>26.75</b>	<b>26.23</b>	<b>0.51</b>	<b>1.92</b>
B2	19.60	21.25	1.64	7.74
T2	<b>28.33</b>	<b>28.68</b>	<b>0.35</b>	<b>1.23</b>

For scenario 5a er det klart mellom 18:00 og 08:00 som opprettholder størst differanse i henhold til operativ temperatur. Dette er en forsterkelse av resultater som opptrer i scenario 4, noe som igjen tilsier at det er PCM som ikke har korrekte egenskaper i henhold til faktisk PCM. Egenskapene har høyere verdier i WUFI+ enn for eksperimenter. Det som kommer fram er at det tar lenger tid for simulert PCM å nå fryst tilstand, det kreves mer energi for å fryse PCM.

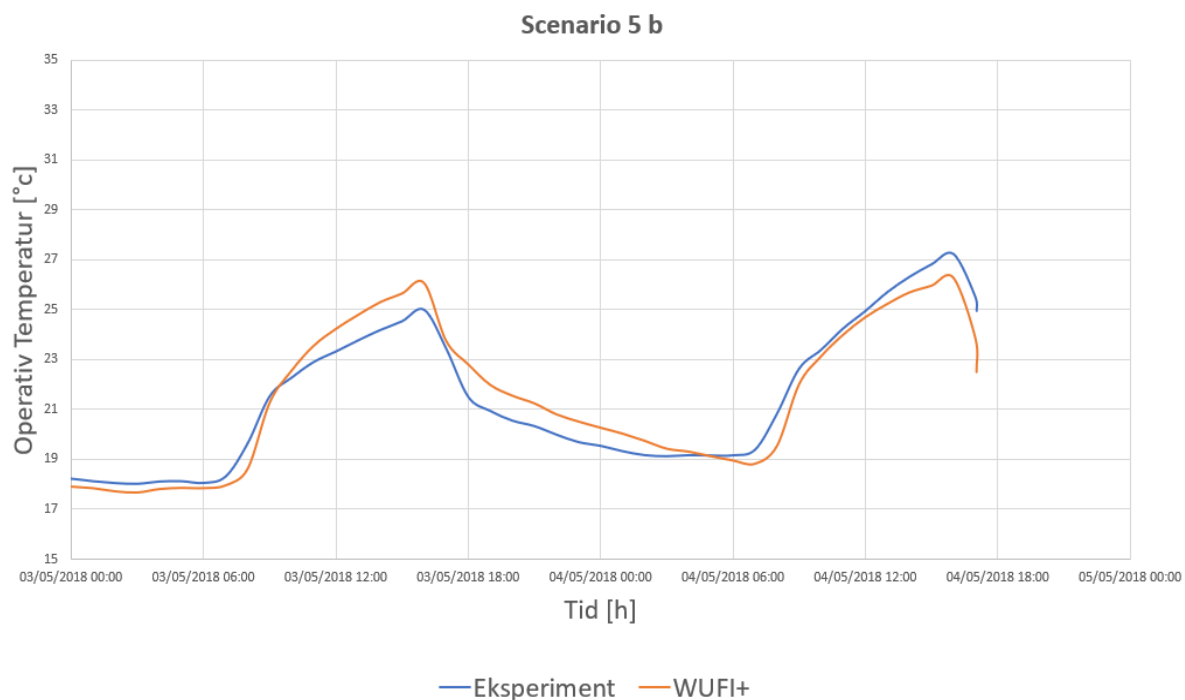
### Scenario 5b

Klimatiseringsperioden fram til 10:00 viser jevnere operativ temperatur i scenario 5b i henhold til eksperimenter og simuleringer. B1 har en operativ temperatur differanse på 0,36°C, men etter 10:00 tiltrer en større divergens mellom temperaturer der simulerte verdier har høyest operativ temperatur.

Ved T1 for første dag er det en større differanse mellom temperatur på 1,07°C som tilsvarer 4,11% forskjell mellom simulerte og eksperimentelle målinger. Fra tidspunkt 17:00 starter en større differanse mellom temperaturer som vedvarer til 05:00 på dag to, etter dette tidspunktet viser eksperimenter en høyere operativ temperatur enn simuleringer.

For andre dag vises et likere temperaturforløp for eksperimenter og simuleringer. Ved B2 er det en differanse på 0,56°C som tilsvarer 2,91% forskjell, der simulerte verdier har lavest temperatur. Klokket

12:00 starter en utvikling i differanse i henhold til operativ temperatur, ved T2 er eksperimentell temperatur 0,96°C varmere enn simulerte verdier.



Figur 37. Scenario 5b simulert mot eksperiment.

Tabell 25. Differanse mellom wufi og eksperiment S5b.

<b>Scenario 5b</b>	<b>Operativ Temperatur<sub>Eksperiment</sub></b>	<b>Operativ Temperatur<sub>Simulert</sub></b>	<b><math>\Delta T</math></b>	<b><math>\Delta\%</math></b>
<b>B1</b>	18.30	17.95	0.36	1.96
<b>T1</b>	<b>25.00</b>	<b>26.08</b>	<b>1.07</b>	<b>4.11</b>
<b>B2</b>	19.38	18.81	0.56	2.91
<b>T2</b>	<b>27.24</b>	<b>26.29</b>	<b>0.96</b>	<b>3.51</b>

For scenario 5b kan samme tendenser som 5a observeres, men i et større spekter. Mellom 18:00 og 08:00 er det differanse i henhold til eksperimenter mot simuleringer. Forskjellen for dette scenarioet er at tilstrekkelig energi i form av temperatur påvirker PCM modulene positivt, både for eksperiment og simuleringer. Ved denne lavere temperaturen har sannsynligvis flere av PCM moduler endret noe fase. Noe som fører til en mindre temperatur differanse fra T1 til T2 for simulerte verdier. For eksperimenter er differansen større, dette igjen kan baseres på forskjellige verdier for PCM for eksperimentelle og simulerte verdier. En større andel PCM har solidifisert eller startet en faseendring mot solid ved simulering enn hva som skjedde i eksperimentet.

### Scenario 6

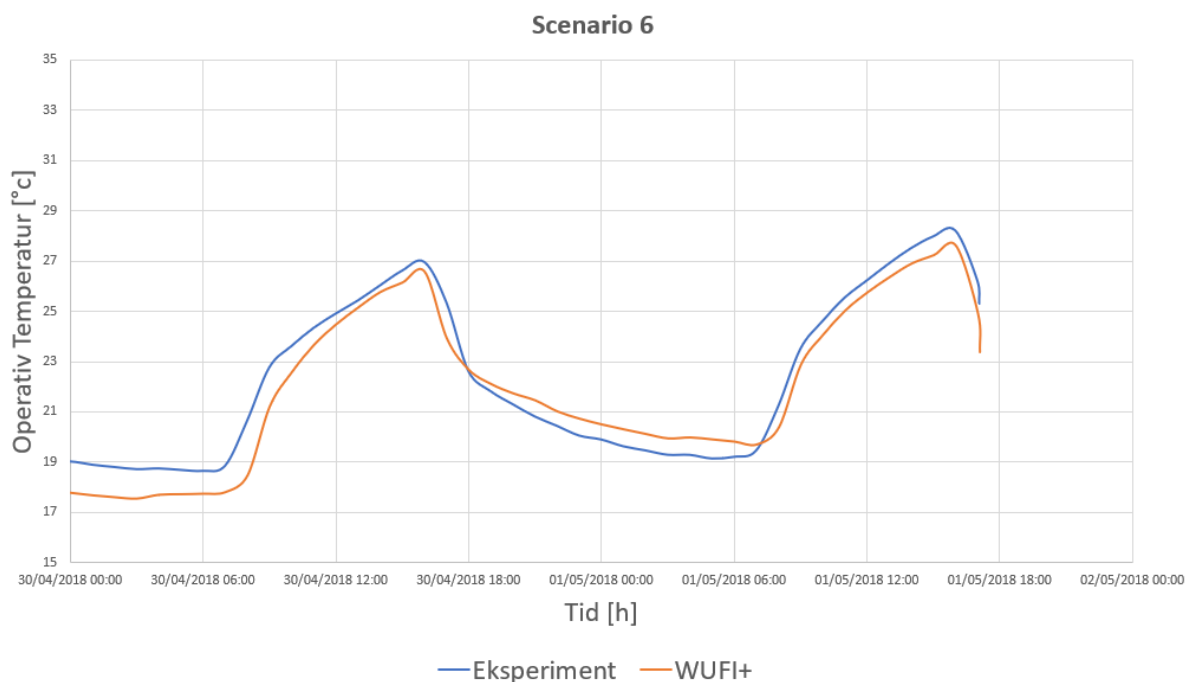
For scenario 6 vises et jevnere temperaturforløp mellom eksperimentelle og simulerte verdier, i starten av eksperimenter er det en større differanse fram til B1. I dette punktet vises høyere verdier for eksperimenter med 1,07°C som tilsvarer 5,67% forskjell i operativ temperatur.

Videre for den første dagen samkjøres operativ temperatur klokken 12:00 for eksperimenter og simuleringer. På det varmeste tidspunktet, T1, er det en temperaturforskjell på 0,4°C og forskjellen tilsvarer 1,47% av operativ temperatur.

I likhet med scenario 5a og b, viser simuleringer en tregere reduksjon i temperatur. Ved tidspunkt 18:00 har simulerte verdier en høyere temperatur enn eksperimentelle verdier. Denne trenden fortsetter fram til 07:00 for dag to.

Fra 07:00 skjer en utjevning av eksperimentell og simulert operativ temperatur, forskjellen i temperatur er ikke nevneverdig før tidspunktet 10:00. Fra dette tidspunktet skjer en gradvis økning i temperaturforskjell og ved T2 er eksperimentelle temperaturer 0,61°C høyere enn simulerte verdier.

Siden begge PCM lagene er i kontakt oppstår en hurtigere varmeledning mellom disse lagene i motsetning til konvektiv varme for to PCM lag som ikke legges i kontakt. Dette kan antas oppstå både positivt og negativt for PCM. Ved korrekt omgivelsestemperatur vil den enklere ta opp og gi fra seg varme, men om det blir for varmt vil det være vanskeligere å nå solid tilstand for begge PCM lag. Denne effekten kan observeres både i start av eksperiment, fra nullpunkt til B1, og kveld/natt mellom T1 og B2. Igjen temperatur/entalpi verdiene for simulering kan være litt for gode noe som fører til at PCM i simulering klarer å holde en jevnere og lavere temperatur fra klimatiseringsperioden. For perioden mellom T1 og B2 kan det doble laget med PCM gi en kjappere varmeendring som har ført til lavere operativ temperatur over natten sammenlignet med scenario 5a-b.



Figur 38. Scenario 6 simulert mot eksperiment.

Tabell 26. Differanse mellom wufi og eksperiment S6.

Scenario 6	Operativ Temperatur <sub>Eksperiment</sub>	Operativ Temperatur <sub>Simulert</sub>	$\Delta T$	$\Delta\%$
B1	18.86	17.79	1.07	5.67
T1	<b>26.98</b>	<b>26.58</b>	<b>0.40</b>	<b>1.47</b>
B2	19.47	19.69	0.23	1.15
T2	<b>28.23</b>	<b>27.62</b>	<b>0.61</b>	<b>2.16</b>

### 3.3. Simulering av massivtre mot betong og PCM

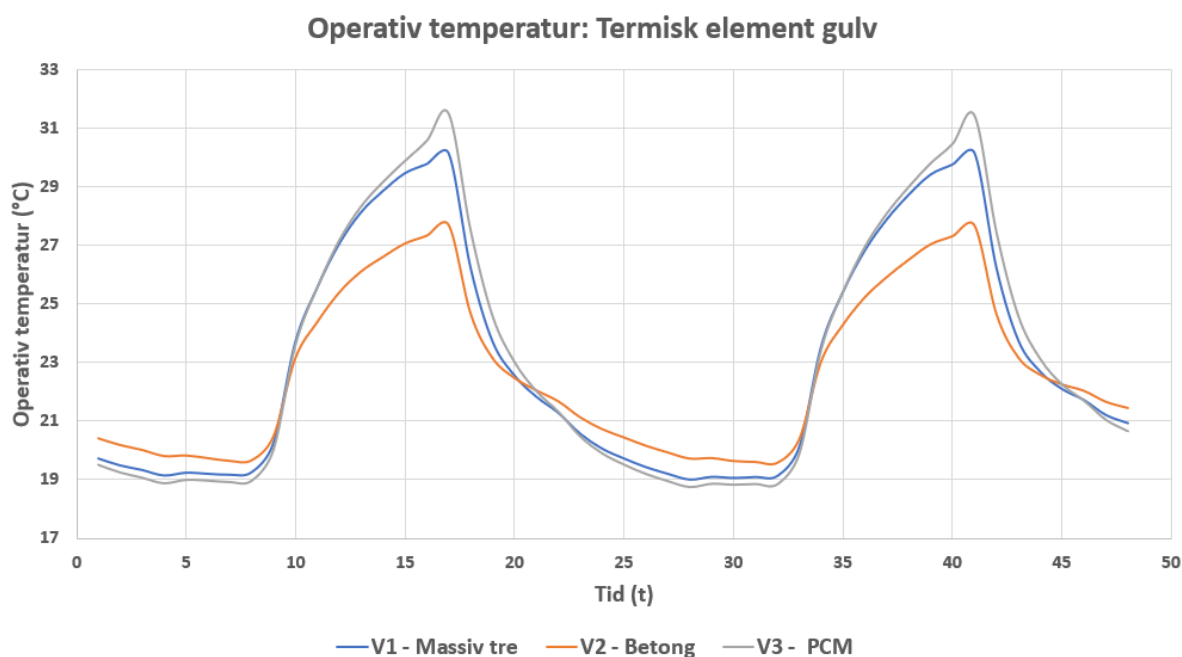
I tillegg til eksperimenter og simuleringer i henhold til eksperimenter er det utført flere simuleringer som ikke er eksperimentelle i denne oppgaven. Videre resultater tar for seg massivtre, betong og PCM bare på gulv og en versjon med gulv og himling.

Ett termisk element: Massivtre, betong og PCM på gulv.

Når det gjelder ett termisk element viser figur 39 operativ temperatur for et lag massivtre, betong og PCM på gulv. Ved toppunktet første dagen har PCM varianten en temperatur forskjell mot massivtre på 1,36°C og en temperaturforskjell på 3,8°C mot betong varianten. Massivtre varianten har en differanse i temperatur mot betongvarianten på 2,45°C.

For andre dagen viser simuleringer en forskjell mellom massivtre og betong en differanse på 2,47°C. Forskjellen mellom PCM og de to andre variantene er henholdsvis 3,75°C mot betong og 1,28°C mot massivtre. Temperaturoppgangene fra dag en til dag 2 viser en mindre forskjell i operativ temperatur. Her er differansen såpass liten at de kan sees på som lik.

Størst differanse kan observeres mellom PCM og betong variant for første dag med en forskjell på 12,07%



Figur 39. Operativ temperatur for et termisk element på gulv.

Tabell 27. Sammenligning av operativ temperatur mellom varianter med ett termisk element.

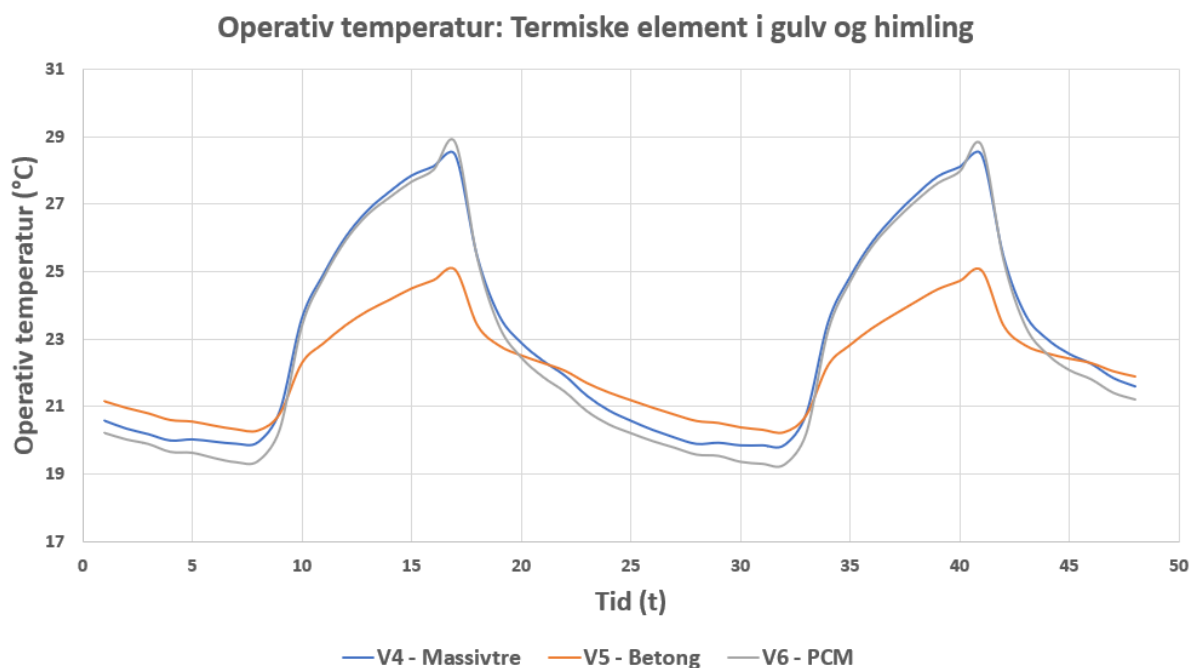
	V1-V2		V1-V3		V2-V3	
	$\Delta$ operativ temperatur °C	$\Delta$ %	$\Delta$ operativ temperatur °C	$\Delta$ %	$\Delta$ operativ temperatur °C	$\Delta$ %
<b>B1</b>	0.41	2.07	0.28	1.46	0.69	3.50
<b>T1</b>	<b>2.45</b>	<b>8.12</b>	<b>1.36</b>	<b>4.30</b>	<b>3.80</b>	<b>12.07</b>
<b>B2</b>	0.45	2.29	0.27	1.43	0.72	3.69
<b>T2</b>	<b>2.47</b>	<b>8.20</b>	<b>1.28</b>	<b>4.07</b>	<b>3.75</b>	<b>11.94</b>

To termisk element: Massivtre, betong og PCM på gulv og i himling.

Like tendenser oppstår over hele perioden som ved ett termisk element. Største forskjellen ved to termiske element er redusert operativ temperatur over hele perioden samt en større forskjell mellom betong variant og resterende varianter.

Ved varmeste periode for dag en viser en differanse for betong mot massivtre på 3,41°C der betong varianten har lavest operativ temperatur. Sammenlignes betong variant mot PCM variant oppstår en differanse på 3,78°C. Noe som tilsier en liten differanse mellom massivtre og PCM som måles til 0,36°C.

Lik tendens oppstår ved dag to der betong har en redusert operativ temperatur på 3,43°C og 3,71°C henholdsvis til massivtre og PCM variant. Forskjellen mellom PCM og massivtre er liten for dag to med en differanse på 0,27°C. For to termiske elementer er differansen størst mellom PCM variant og betong variant for dag to med en forskjell i operativ temperatur gitt 12,9%.



Figur 40. Operativ temperatur for varianter med to termiske elementer, gulv og himling.

Tabell 28. Sammenligning av varianter med to termiske elementer.

	V4-V5		V4-V6		V5-V6	
	$\Delta$ operativ temperatur °C	$\Delta$ %	$\Delta$ operativ temperatur °C	$\Delta$ %	$\Delta$ operativ temperatur °C	$\Delta$ %
<b>B1</b>	0.35	1.73	0.58	2.92	0.93	4.60
<b>T1</b>	<b>3.41</b>	<b>11.99</b>	<b>0.36</b>	<b>1.26</b>	<b>3.78</b>	<b>13.10</b>
<b>B2</b>	0.39	1.92	0.60	3.04	0.99	4.90
<b>T2</b>	<b>3.43</b>	<b>12.06</b>	<b>0.27</b>	<b>0.96</b>	<b>3.71</b>	<b>12.90</b>

Sammenligning mellom ett og to termiske elementer.

Videre er det sammenlignet operativ temperatur mellom like materialer men for en og to termiske masser i simulering.

For massivtre er det noe forskjell i operativ temperatur gitt 5,59% og 5,61% henholdsvis for første og andre dag. Temperaturforskjellen er redusert med ca. 1,7°C for begge dager med to termiske elementer.

En større reduksjon av toppetemperatur kan observeres for betong variantene. Simulerte verdier gir helt lik temperatur ved T1 og T2 på 2,65°C som gjengir en prosentdifferanse på 9,58%.

Ved PCM varianten kan en lignende reduksjon som for betong også observeres. Reduksjon i operativ temperatur er så å si lik for T1 og T2 med henholdsvis 2,68°C og 2,7°C, som viser til en prosent differanse på 8,5% for T1 og 8,58% for T2.

For alle varianter er det en reduksjon i operativ temperatur med større mengde termiske elementer der massivtre har en reduksjon på ca 1,7°C, betong har 2,65°C og PCM viser en reduksjon på 2,7°C.

Tabell 29. Sammenligning mellom et og to termiske elementer.

<b>Differanser mellom et og to termiske element</b>						
	V4-V5		V4-V6		V5-V6	
	$\Delta$ operativ temperatur °C	$\Delta$ %	$\Delta$ operativ temperatur °C	$\Delta$ %	$\Delta$ operativ temperatur °C	$\Delta$ %
<b>B1</b>	0.71	3.56	0.65	3.23	0.41	2.11
<b>T1</b>	<b>1.68</b>	<b>5.59</b>	<b>2.65</b>	<b>9.58</b>	<b>2.68</b>	<b>8.50</b>
<b>B2</b>	0.75	3.78	0.69	3.41	0.42	2.18
<b>T2</b>	<b>1.69</b>	<b>5.61</b>	<b>2.65</b>	<b>9.58</b>	<b>2.70</b>	<b>8.58</b>

## Generell diskusjon

I motsetning til eksperimenter og eksperimentelle simuleringer er det en mye mindre endring i temperaturtopp mellom dag 1 og dag 2 for gjeldende simuleringer. Dette kan forklares med naturen til simuleringer gjort for ett og to termiske elementer. Hovedforskjellen mellom disse simuleringene og eksperimentelle simuleringer er at gjeldende simuleringer for kapittel 3.3. har blitt kjørt over en hel måned siden disse ikke trengte å synkronisere opp mot eksperimenter på samme måte som eksperimentelle simuleringer. Dermed oppstod et jevnere likhet fra dag til dag ved slutten av simulering. Dette viser igjen et bedre bilde over langtidseffekt over forskjellige varianter.

Simuleringer for massivtre viser ikke store utbedringer i operativ temperatur i motsetning til betong varianter både med ett og to termiske elementer. Dette kan være en sesongbelagt tendens, gjennom sommermåned og tilhørende temperaturer skjer mindre endringer men gjennom eventuelle vintermåned kan muligens en bedre temperatur utjevning måles. I tillegg til denne effekten har massivtre også mye bedre fuktbuffering enn betong noe som vil øke bruker komfort av eventuelle kontorer med massivtre som termisk masse.



## 4. Konklusjon

Hensikten med denne oppgaven var å undersøke operativ temperatur i et kontor med forskjellige oppsett av termiske elementer og om PCM og betong har like god eller forskjellige innvirkning på operativ temperatur over en gitt tidsperiode. Flere forsøk ble utført med forskjellige oppsett av termiske elementer.

For et kontor med et lag PCM på gulv oppstod en klar reduksjon av operativ temperatur i løpet av den varmeste perioden for den første dagen. I referanse kontoret, uten termiske elementer, ble denne temperaturen målt til 31,5°C, dette ble utbedret til 29°C med et lag PCM på gulv. For dag to ble denne differansen kraftig redusert siden PCM ikke ble kjølt nok ned i løpet av natten for total solidifikasjon. Dette førte til likere målinger av operativ temperatur som målinger av kontoret uten noen termiske elementer.

Når gulvet i kontoret ble endret til et lag betong oppstod omtrent lik temperaturutvikling som ved PCM på gulv for dag en. For kontoret med betong kan en jevnere topptemperatur observeres ved varmeste tidspunkt mellom dag en og dag to med 0,6°C differanse. Dette tilsier for kontorer med et termisk element, med forutsetninger gitt i denne oppgaven, vil betong være en bedre løsning siden dette fører til jevnere og likere temperaturutvikling over to dager.

Ved to og tre termiske elementer oppstod en likere tendens av temperaturutvikling mellom forskjellige kontorvarianter. Forsøk viste at alle varianter med to eller flere termiske element hadde redusert operativ temperatur på varmeste tidspunkt i løpet av første og andre dag i motsetning til kontorvarianter med et termisk element. Det var liten forskjell på temperaturutvikling ved bruk av to og tre termiske elementer i kontoret.

For kontoret med et dobbelt lag PCM i himling mot kontorvarianten som hadde enkelt lag i himling og et lag på vegg, ble det målt nesten helt like verdier der den største temperaturforskjellen var på 0,23°C.

I en variant av kontoret som bestod av betong på gulv, PCM i himling og på vegg ble det utført to eksperimenter. I et tilfelle ble det brukt driftstider der tilluftstemperatur ble økt til 19°C fra 16°C i arbeidstid og en annen variant av samme kontor ble gitt en konstant tilluftstemperatur på 16°C. Kontoret som hadde konstant 16°C viste en betydelig reduksjon av operativ temperatur over hele tidsperioden. Denne varianten viste størst forskjell av operativ temperatur ved varmeste periode på første og andre dag, der toppunktstemperaturen ble redusert med 1,74°C for første dag og 1,08°C for andre dag. Dermed er kontorvarianten med konstant tilluftstemperatur en bedre løsning enn kontoret som øker temperaturen i arbeidstid.

Det framkommer ved sammenligning av operativ temperatur for alle kontorvarianter høyest operativ temperatur opptrer for kontoret uten termiske elementer, noe lavere operativ temperatur for kontorene med ett termisk element og enda lavere operativ temperatur for kontorer med 2 eller flere termiske elementer. Kontoret som hadde tre termiske elementer og konstante tilluftsmengder var kontorvarianten som hadde lavest operativ temperatur over begge dagene i henhold til alle kontorvariantene.

For kontoret der betong sammenlignes med PCM, i henhold til valgte materialer, internlaste og driftstider som brukt i disse eksperimenter, vil betong ha bedre ytelse enn PCM over en periode på to døgn. Det vises også at en økning av kvantitet til PCM vil gi en forbedret ytelse i kombinasjon med korrekt plassering av termiske elementer. Flere termiske elementer gir jevnere og lavere temperaturdifferanser enn færre termiske elementer. De beste løsningene er bruk av flere termiske elementer, både PCM og betong, samt korrekt bruk av tilluftstemperatur og luftmengder.

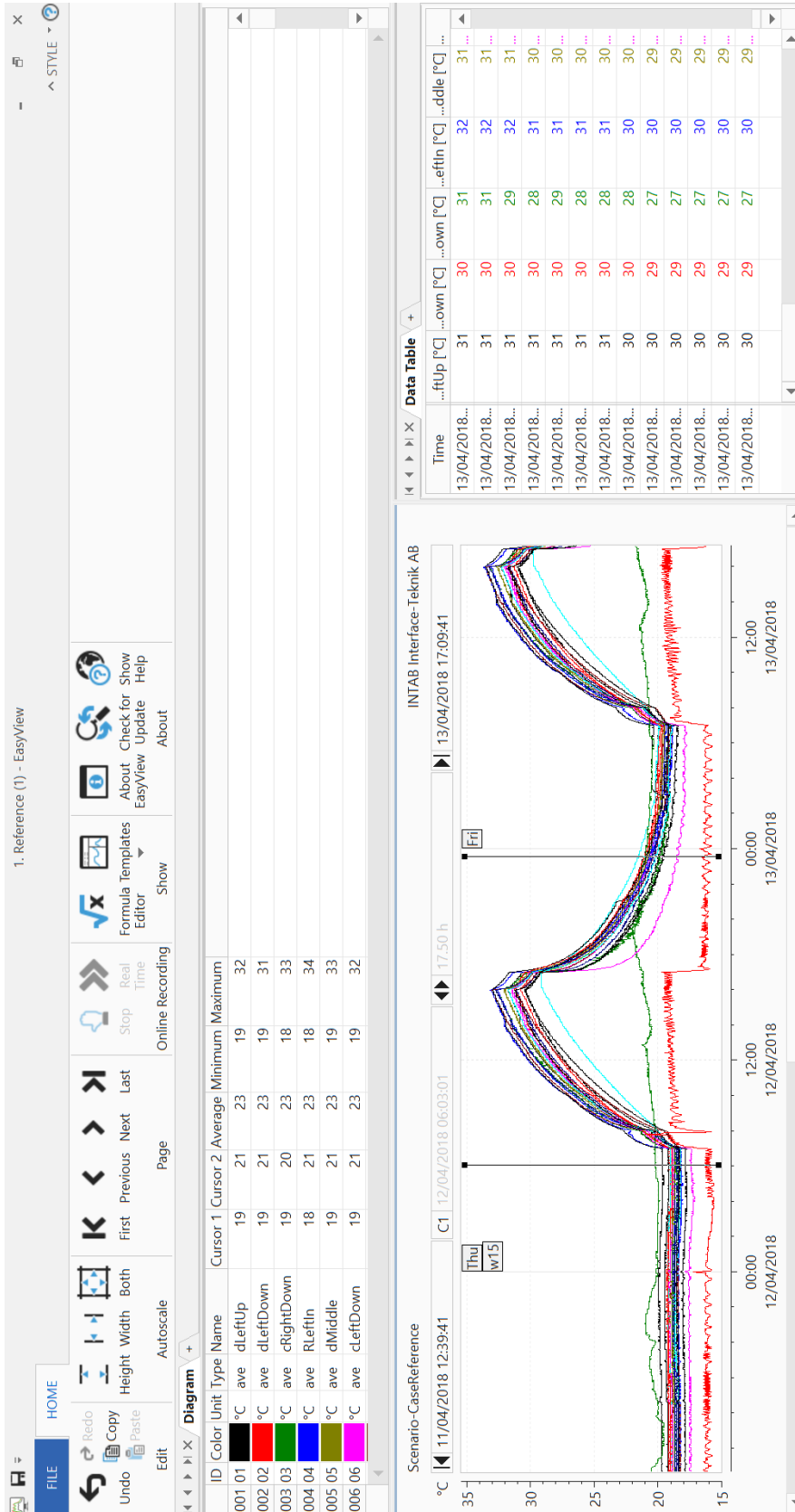
Med tanke på tilleggssimuleringer viser alle kontorvarianter en reduksjon av operativ temperatur, der betong varianten hadde størst reduksjon av temperatur på ca. 2,7°C for begge temperaturtopper. PCM varianten hadde en reduksjon på 2,65°C og massivtre varianten viste en reduksjon på ca. 1,7°C.

## 5. Referanser

- [1] D. f. byggkvalitet. (2017). *TEK17*. Available: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/>
- [2] S. Norge. SN/TS 3031 [Online]. Available: <http://www.standard.no.ezproxy.hioa.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=ns+3031>
- [3] S. Norge, "NS 3700 - Kriterier for passivhus og lavenergibygninger; Boligbygninger," 2013.
- [4] S. Norge, "NS 3701 - Kriterier for passivhus og lavenergibygninger; Yrkesbygninger," 2012.
- [5] M. A. B. Yunus A. Cengel, "Thermodynamics, an engineering approach 8th edition," in *Thermodynamics, an engineering approach 8th edition*: McGraw-Hill Education, 2015, pp. 2, 72-73.
- [6] K. Sarada, Jamie Trahan, Yogi Goswami, Muhammad Rahman, Elias Steafanakos, "Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants," *Progress in Energy and Combustion Science* 39, vol. 39, pp. 285-319, 2013.
- [7] L. F. C. Alvaro de Gracia, "Phase change materials and thermal energy storage for buildings," *Energy and Buildings*, no. 103, pp. 414-419, 2015.
- [8] M. Z. Ali Rahimi, Mohammad Vaziri, Suresh Vadhva, "A simple and effective approach for peak load shaving using Battery Storage Systems," *North American Power Symposium (NAPS)*, p. 1, 2013.
- [9] A. J. G. Yunus A. Cengel, "Heat and Mass Transfer, Fundamentals & Applications," in *Heat and Mass Transfer, Fundamentals & Applications* New York: McGraw-Hill Education, 2015, pp. 6-7, 18-19, 27-29, 378-379.
- [10] I. Katavic, "Moisture buffering and latent heat in exposed wooden surfaces," Master, Fakultet for miljøvitenskap og teknologi, Institutt for matematiske realfag og teknologi, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, 2014.
- [11] P. e. solution, "BioPCM Technical Data Q23," ed.
- [12] F. P. o. F. Element, "Teknisk godkjenning, SINTEF Certification," ed, 2017, pp. 1, 2.
- [13] H. Rasmussen, "Temperaturutvikling i betong," 2011.
- [14] Elektroimportøren.no. (2018). *Varmefolier*. Available: <https://www.elektroimportoren.no/foliekit-namron-14m-100cm-60w-m-14-0m-m-digital-termostat/5410809/Product.html?Event=searchlist>
- [15] H. B. M. Tor Arvid Vik, Petter Aslaksrud, Eirik Folkedal, Ottar S. Øvrevik, "Thermal performance of an office cubicle integrated with a bio-based PCM: Experimental Analyses," *Energy Procedia*, 2016.
- [16] F. IBP. *Software, What is WUFI*. Available: <https://wufi.de/en/software/what-is-wufi/>
- [17] H. K. Achilles Karagiozis, Andreas Holm, "WUFI-ORNL/IBP-A North American Hygrothermal Model," Fraunhofer, Institute of Building Physics, Buildings VIII / Moisture Model Inputs - Principles.
- [18] I. I.-T. AB, "How to use PC-logger 3100i and accessories," Intab, Ed., ed, p. 49.

# 6. Vedlegg

## 6.1. Vedlegg 1 – Easyview10 resultater



FILE HOME

Undo Redo Copy Paste Edit

Height Width Both Autoscale

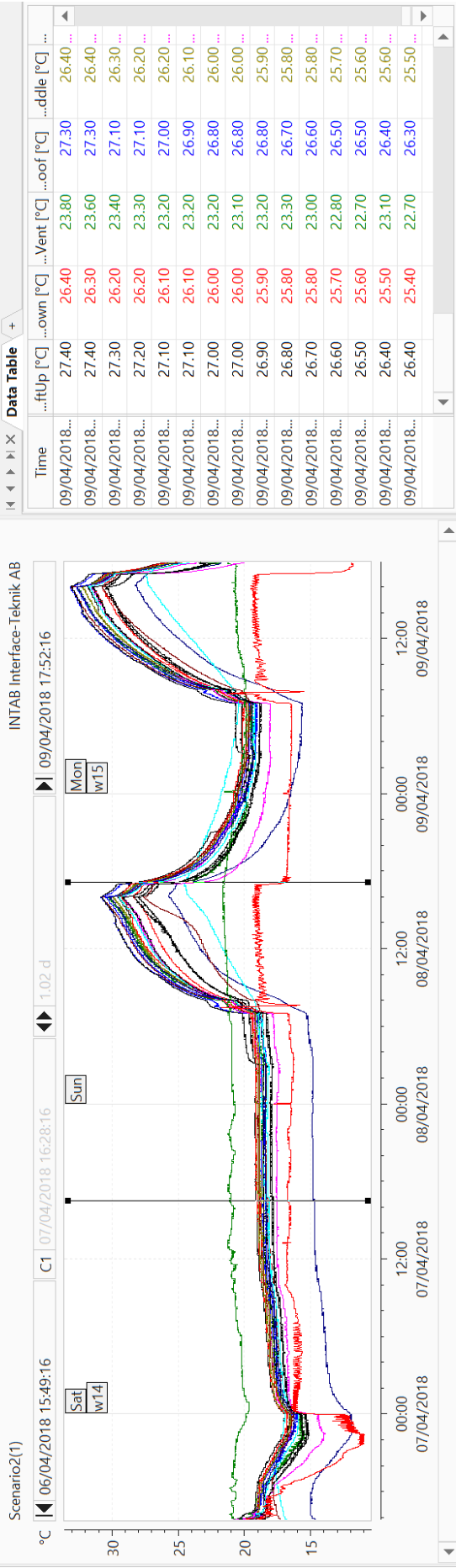
First Previous Next Last Page

Stop Real Time Online Recording

Formula Templates Editor Show

About Check for EasyView Update Help

ID	Color	Unit	Type	Name	Cursor 1	Cursor 2	Average	Minimum	Maximum
001	01	°C	ave	dLeftUp	19.00	27.70	21.66	16.90	31.80
002	02	°C	ave	dLeftDown	19.00	26.80	21.28	16.70	30.70
003	03	°C	ave	Air-Vent	18.50	24.60	21.16	15.30	32.60
004	04	°C	ave	Air-0,1Roof	18.30	27.40	21.45	15.90	33.10
005	05	°C	ave	...	19.00	27.00	21.40	16.60	32.70



FILE HOME

Undo Redo Copy Paste Edit

Height Width Both Autoscale

First Previous Next Last Page

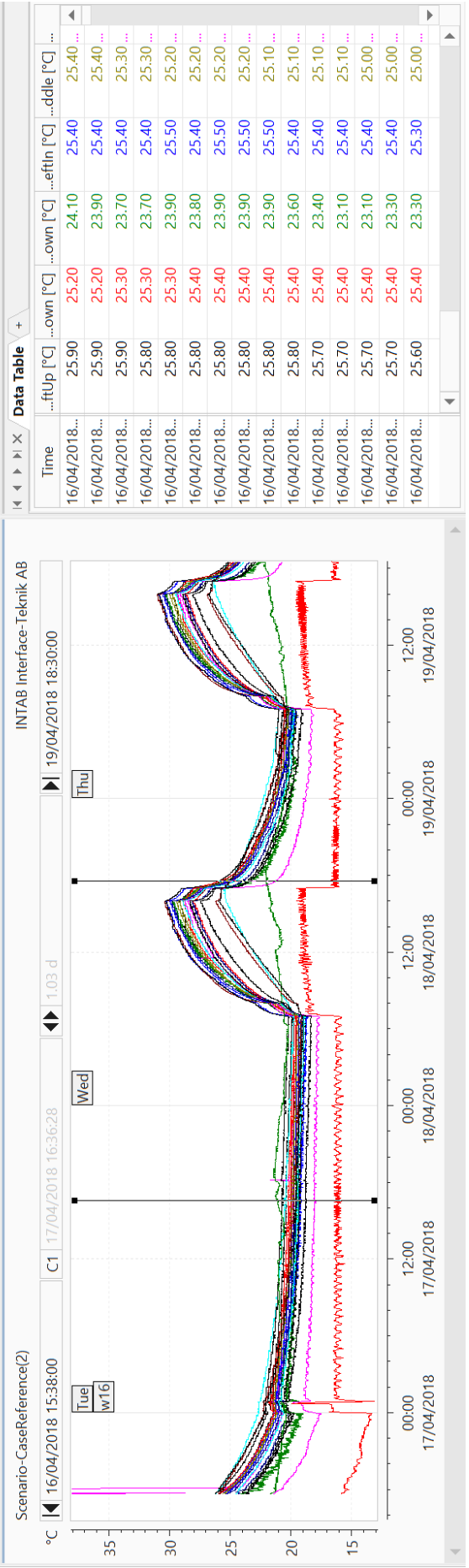
Stop Real Time Online Recording

Formula Templates Editor Show

About Check for EasyView Update Help

Diagram

ID	Color	Unit	Type	Name	Cursor 1	Cursor 2	Average	Minimum	Maximum
001 01	Black	°C	ave	dLeftUp	20.40	25.60	22.91	19.80	29.80
002 02	Red	°C	ave	dLeftDown	20.20	25.10	22.46	19.60	28.60
003 03	Green	°C	ave	cRightDown	19.70	22.90	22.01	18.90	30.30
004 04	Blue	°C	ave	rLeftIn	19.20	25.30	22.64	18.60	30.90
005 05	Yellow	°C	ave	dRightUp	20.00	24.00	22.50	19.50	30.90



FILE HOME

Undo Redo Copy Paste Edit

Height Width Both Autoscale

First Previous Next Last Page

Stop Real Time Online Recording

Formula Templates Editor Show

About Check for Show EasyView Update Help

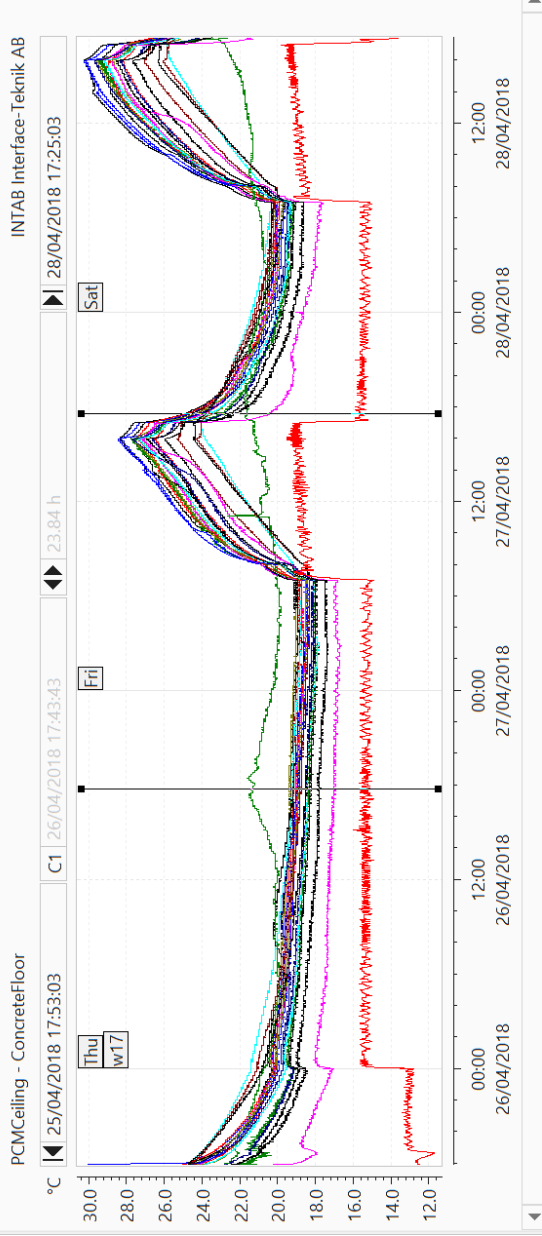
ID	Color	Unit	Type	Name	Cursor 1	Cursor 2	Average	Minimum	Maximum
001_01	Black	°C	ave	dLeftUp	19.30	24.50	21.81	18.80	29.30
002_02	Red	°C	ave	dLeftDown	19.10	23.90	21.35	18.70	28.20
003_03	Green	°C	ave	cRightDown	18.40	23.10	20.97	17.90	29.50
004_04	Blue	°C	ave	RLeftIn	18.93	24.70	21.78	18.30	30.10
005_05	Yellow	°C	ave	dRightUp	10.33	23.40	21.55	10.00	29.70

PCMCeiling - ConcreteFloor

INTAB Interface-Teknik AB

25/04/2018 17:53:03 C1 26/04/2018 17:43:43 23.84 h

Time	...ftUp [°C]	...own [°C]	...own [°C]	...eftIn [°C]	...ddle [°C]
28/04/2018...	27.80	26.80	25.50	27.80	26.20
28/04/2018...	27.70	26.70	24.90	27.70	26.10
28/04/2018...	27.60	26.60	25.30	27.70	26.00
28/04/2018...	27.50	26.50	24.70	27.60	25.90
28/04/2018...	27.40	26.40	24.30	27.60	25.80
28/04/2018...	27.30	26.30	24.90	27.50	25.70
28/04/2018...	27.30	26.30	25.10	27.40	25.60
28/04/2018...	27.10	26.20	24.60	27.40	25.50
28/04/2018...	27.00	26.10	24.20	27.30	25.40
28/04/2018...	27.00	26.00	24.10	27.20	25.40
28/04/2018...	26.90	26.00	24.70	27.00	25.30
28/04/2018...	26.80	25.90	24.60	27.10	25.30
28/04/2018...	26.70	25.90	24.00	27.00	25.20
28/04/2018...	26.70	25.80	24.20	27.00	25.20
28/04/2018...	26.60	25.70	24.50	26.90	25.10



5a--ConcreteFloor-PCM-CeilingWall (1) - EasyView

FILE HOME

Undo Redo Copy Paste Edit

Height Width Both Autoscale

First Previous Next Last Page

Stop Real Time Online Recording

Formula Templates Editor Show

About Check for Update EasyView Update Help

Diagram

ID	Color	Unit	Type	Name	Cursor 1	Cursor 2	Average	Minimum	Maximum
001	01	°C	ave	dLeftUp	20.00	23.40	22.17	19.50	29.60
002	02	°C	ave	dLeftDown	19.90	23.10	21.62	19.30	27.80
003	03	°C	ave	dRightDown	19.20	22.30	21.36	18.60	29.10
004	04	°C	ave	RLeftIn	19.73	22.87	21.87	18.90	29.90
005	05	°C	ave	dRightUp	20.00	23.70	21.74	19.50	29.60

PCMWall

22/04/2018 20:32:47 C1 23/04/2018 19:26:07 22.88 h 25/04/2018 17:12:47

INTAB Interface-Teknik AB

Time	...ftUp [°C]	...own [°C]	...own [°C]	...eftIn [°C]	...dble [°C]
25/04/2018...	28.60	27.10	27.30	28.80	27.80
25/04/2018...	28.60	27.10	27.30	28.80	27.70
25/04/2018...	28.60	27.10	27.30	28.70	27.70
25/04/2018...	28.60	27.10	27.30	28.70	27.70
25/04/2018...	28.60	27.10	27.20	28.70	27.70
25/04/2018...	28.50	27.10	27.30	28.70	27.70
25/04/2018...	28.50	27.10	27.30	28.70	27.60
25/04/2018...	28.40	27.00	27.00	28.50	27.50
25/04/2018...	28.20	26.90	26.80	28.30	27.30
25/04/2018...	28.10	26.90	26.70	28.10	27.20
25/04/2018...	28.00	26.90	26.50	28.00	27.00
25/04/2018...	27.80	26.80	26.40	27.80	26.90
25/04/2018...	27.80	26.80	26.10	27.70	26.80
25/04/2018...	27.70	26.70	26.10	27.60	26.70
25/04/2018...	27.60	26.70	25.90	27.50	26.60



FILE HOME

Undo Redo Copy Paste Edit

Height Width Both Autoscale

First Previous Next Last Page

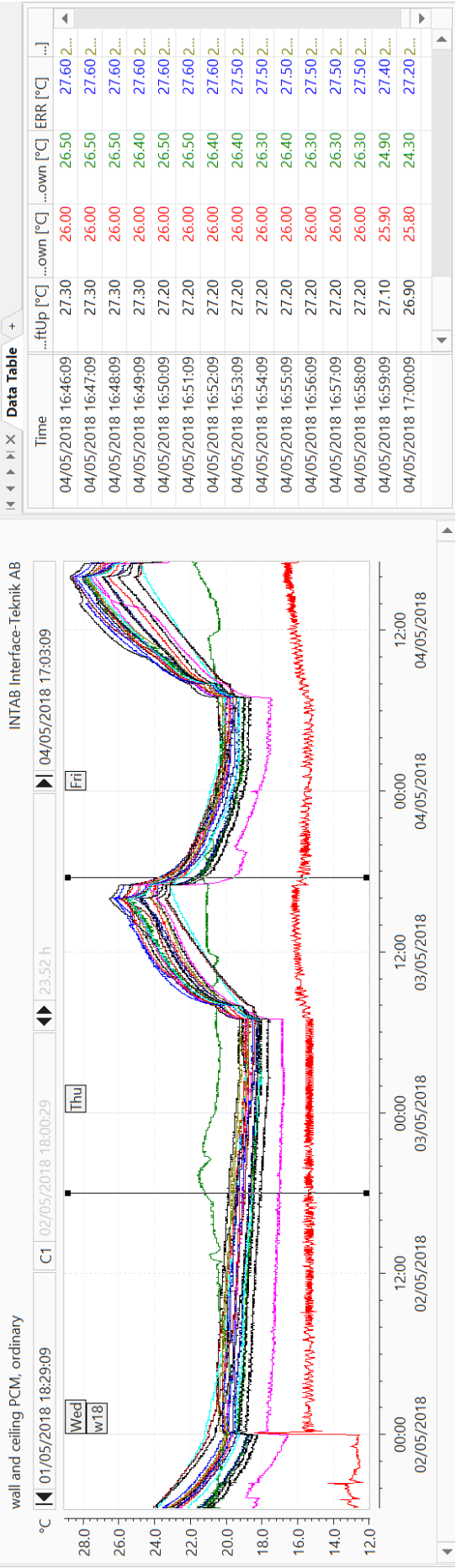
Stop Real Time Online Recording

Formula Templates Editor Show

About Check for Show EasyView Update Help

STYLE

ID	Color	Unit	Type	Name	Cursor 1	Cursor 2	Average	Minimum	Maximum
001 01	Black	°C	ave	dLeftUp	19.80	23.33	21.48	19.20	27.90
002 02	Red	°C	ave	dLeftDown	19.43	22.50	20.87	18.90	26.60
003 03	Green	°C	ave	dRightDown	18.43	21.77	20.43	17.90	28.00
004 04	Blue	°C	ave	ERR	19.40	23.80	21.42	18.80	28.50
005 05	Yellow	°C	ave	dMidUp	19.60	22.80	21.20	19.10	27.80



FILE HOME

Undo Redo Copy Paste Edit

Height Width Both Autoscale

First Previous Next Last Page

Stop Real Time Online Recording

Show

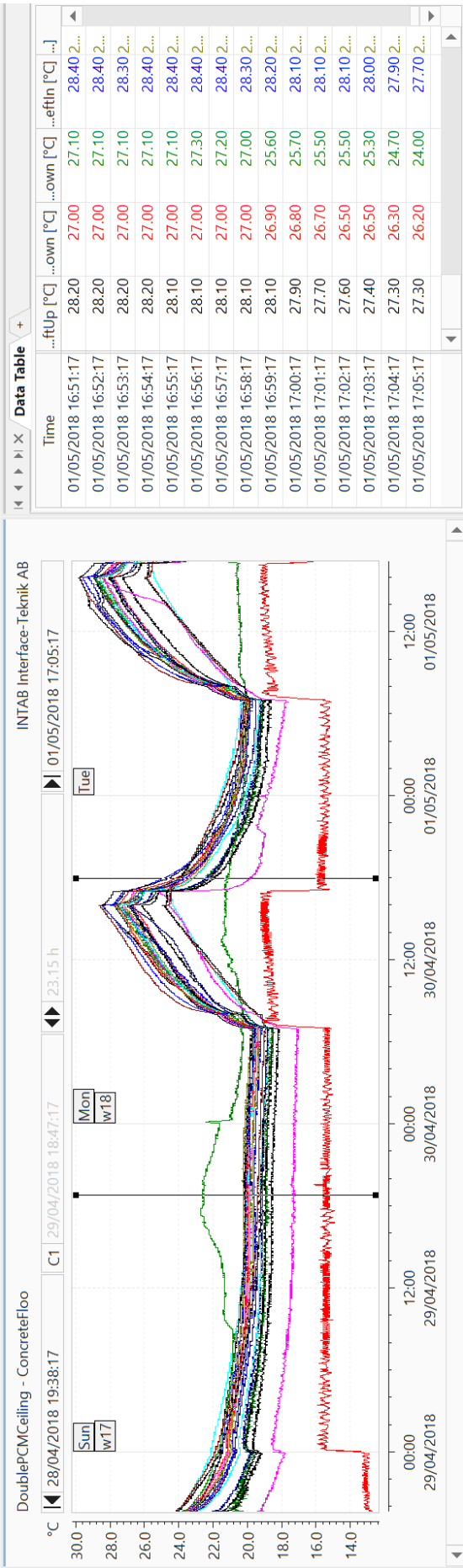
About

Formula Templates Editor

Check for Update Help

STYLE

ID	Color	Unit	Type	Name	Cursor 1	Cursor 2	Average	Minimum	Maximum
001	01	°C	ave	dLeftUp	20.10	23.90	22.15	19.60	28.90
002	02	°C	ave	dLeftDown	19.90	23.30	21.69	19.40	27.70
003	03	°C	ave	cRightDown	18.90	22.20	21.11	18.50	28.90
004	04	°C	ave	rLeftIn	20.10	24.90	22.12	19.50	29.30
005	05	°C	ave	dMLeftIn	20.20	23.10	21.05	19.70	28.30



6.2. Vedlegg 2 – Eksempel på verdier brukt for beregning av operativ temperatur

Time	Wall A			Wall B			Wall C				Wall D			
	aMiddle	bMiddle	cMiddle	dLeftDown	cMiddle	dLeftDown	dLeftUp	dLeftDown	dMiddle	dRightUp	dRightDown	dRightUp	dRightDown	Mean
09/04/2018 18:32:00	23.2	22.8	22.2	22.2	23.8	23.8	23.8	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.2	23.44
09/04/2018 19:00:00	22.4	21.9	21.9	21.9	23.1	22.5	22.9	22.5	22.4	22.7	22.5	22.7	22.5	22.6
09/04/2018 20:00:00	21.1	20.5	20.9	20.9	21.8	21.35	21.7	21.6	21.2	21.3	21.2	21.3	21.2	21.4
09/04/2018 21:00:00	20.2	19.7	20.1	20.1	20.9	20.5	20.8	20.8	20.3	20.4	20.4	20.4	20.4	20.54
09/04/2018 22:00:00	19.6	19.1	19.5	19.5	20.3	19.9	20.2	20.1	19.7	19.8	19.7	19.8	19.7	19.9
09/04/2018 23:00:00	18.9	18.5	18.6	18.6	19.7	19.15	19.5	19.2	19	19.1	19	19.1	19	19.16
<b>Roof</b>														
RWindow	RMiddle	RWall	Mean	MRT	MAT	OperativeTemp								
24	18.7	23.1	21.933333	274616.72	22.891895	20.7	21.7959475							
23.4	17.8	22.4	21.2	240190	22.138018	20.3	21.21900886							
22.1	17.3	20.9	20.1	191109.52	20.908389	19.5	20.20419471							
21.3	16.8	20.1	19.4	162671.98	20.082982	18.7	19.39149082							
20.5	16.4	19.4	18.766667	143669.86	19.4689	18.1	18.7844501							
19.9	14.7	18.8	17.8	122874.71	18.722577	16.8	17.76128851							

### 6.3. Vedlegg 3 – Operativ temperatur/ omgivelsestemperatur/ tilluftstemperatur

#### Scenario 1

	opTemp	Tamb	vent			opTemp	Tamb	vent
10/04/2018 18:00:00	17.5255444	20	16.1		12/04/2018 06:00:00	18.1968852	20.2	15.9
10/04/2018 19:00:00	17.6556395	19.9	15.9		12/04/2018 07:00:00	18.3879979	20.2	16.8
10/04/2018 20:00:00	17.7790026	21	16.1		12/04/2018 08:00:00	20.5884411	20.2	17
10/04/2018 21:00:00	17.897018	20.8	16		12/04/2018 09:00:00	24.0089335	20.3	18.6
10/04/2018 22:00:00	17.954269	20.7	15.9		12/04/2018 10:00:00	25.808413	20.5	18.6
10/04/2018 23:00:00	18.0875329	20.3	16.2		12/04/2018 11:00:00	27.3659519	20.7	18.8
11/04/2018 00:00:00	18.1534222	20	17		12/04/2018 12:00:00	28.6070673	20.8	18.8
11/04/2018 01:00:00	18.0989892	20	16		12/04/2018 13:00:00	29.536475	20.8	19
11/04/2018 02:00:00	18.0436588	20	15.9		12/04/2018 14:00:00	30.4410136	20.5	18.7
11/04/2018 03:00:00	18.0342829	20	15.9		12/04/2018 15:00:00	30.9738363	20.7	19.4
11/04/2018 04:00:00	18.0242968	19.9	16		12/04/2018 16:00:00	31.4648729	21.1	19.4
11/04/2018 05:00:00	18.0968989	19.8	16.2		12/04/2018 17:00:00	29.0369059	21.1	19
11/04/2018 06:00:00	18.1022415	19.8	16.1		12/04/2018 18:00:00	24.7811015	21.6	16.2
11/04/2018 07:00:00	18.1723612	20.1	16.3		12/04/2018 19:00:00	23.3112497	21.9	16.3
11/04/2018 08:00:00	18.1064333	20.1	15.8		12/04/2018 20:00:00	22.3522399	21.5	16.3
11/04/2018 09:00:00	18.0415716	20.1	15.8		12/04/2018 21:00:00	21.6085023	21.4	16.1
11/04/2018 10:00:00	18.1074596	20.3	16.2		12/04/2018 22:00:00	20.7534162	21.4	16.1
11/04/2018 11:00:00	18.2848349	20.4	15.1		12/04/2018 23:00:00	20.2647852	21.2	16.5
11/04/2018 12:00:00	18.186343	20.4	15.8		13/04/2018 00:00:00	19.9063577	20.9	16.5
11/04/2018 13:00:00	18.2242722	20.2	15.9		13/04/2018 01:00:00	19.5137914	20.8	16.3
11/04/2018 14:00:00	18.2242722	19.6	16.2		13/04/2018 02:00:00	19.2148161	20.6	16.2
11/04/2018 15:00:00	18.2210249	19.6	16		13/04/2018 03:00:00	19.0608534	20.6	16.1
11/04/2018 16:00:00	18.2327494	19.9	16		13/04/2018 04:00:00	19.0453918	20.4	16.2
11/04/2018 17:00:00	18.3030844	20.1	16.2		13/04/2018 05:00:00	19.0286638	20.4	15.9
11/04/2018 18:00:00	18.3104869	20.4	15.9		13/04/2018 06:00:00	18.9318864	20.3	16.3
11/04/2018 19:00:00	18.3518418	20.6	16.2		13/04/2018 07:00:00	19.0985081	20.7	16.1
11/04/2018 20:00:00	18.4191138	20.2	16.3		13/04/2018 08:00:00	21.2922957	20.7	18.3
11/04/2018 21:00:00	18.4083878	20.9	16.3		13/04/2018 09:00:00	24.6734072	20.8	18.7
11/04/2018 22:00:00	18.4342347	20.7	16.2		13/04/2018 10:00:00	26.4532486	20.9	18.9
11/04/2018 23:00:00	18.4273854	20.4	16.2		13/04/2018 11:00:00	28.0356617	21.1	18.8
12/04/2018 00:00:00	18.4938733	20.1	16.6		13/04/2018 12:00:00	29.1768196	21.2	19.2
12/04/2018 01:00:00	18.3989469	20.1	16.2		13/04/2018 13:00:00	30.2410442	21.2	19.3
12/04/2018 02:00:00	18.3310092	20	15.9		13/04/2018 14:00:00	30.9968797	20.8	19.2
12/04/2018 03:00:00	18.2352003	20	15.7		13/04/2018 15:00:00	31.5156045	21	19.4
12/04/2018 04:00:00	18.1436445	19.9	15.7		13/04/2018 16:00:00	31.9572537	21.3	19
12/04/2018 05:00:00	18.1319962	19.9	15.6		13/04/2018 17:00:00	29.50748	21.5	19.1
					13/04/2018 17:12:01	27.3656063	22.2	16.1

## Scenario 2

		opTemp	Tamb	Tvent			opTemp	Tamb	Tvent	
06/04/2018 15:49	15	19.4	20.7	19.6		08/04/2018 05:00	5	18.1	20.9	16.6
06/04/2018 16:00	16	18.8	20.8	18.7		08/04/2018 06:00	6	18.2	20.9	16.5
06/04/2018 17:00	17	18.2	20.9	18.1		08/04/2018 07:00	7	18.6	21.1	17.1
06/04/2018 18:00	18	17.9	20.7	17.1		08/04/2018 08:00	8	20.7	21.1	18.9
06/04/2018 19:00	19	17.5	20.8	15.5		08/04/2018 09:00	9	23.8	21.2	18.8
06/04/2018 20:00	20	16.7	20.8	13.4		08/04/2018 10:00	10	25.1	21.2	18.5
06/04/2018 21:00	21	16.1	20.7	12.4		08/04/2018 11:00	11	26.1	21.3	19
06/04/2018 22:00	22	15.4	20.6	11.1		08/04/2018 12:00	12	26.8	21.4	19.1
06/04/2018 23:00	23	15.3	20.1	12.1		08/04/2018 13:00	13	27.3	21.5	19
07/04/2018 00:00	24	15.6	19.9	14.9		08/04/2018 14:00	14	27.9	21.5	19
07/04/2018 01:00	1	16.6	19.8	16		08/04/2018 15:00	15	28.3	21.5	19.1
07/04/2018 02:00	2	16.8	20.1	16.2		08/04/2018 16:00	16	29	21.6	19.2
07/04/2018 03:00	3	16.9	20.1	15.8		08/04/2018 17:00	17	26.3	21.5	17.3
07/04/2018 04:00	4	17	20.2	15.8		08/04/2018 18:00	18	22.9	21.4	16.8
07/04/2018 05:00	5	17	20.2	15.9		08/04/2018 19:00	19	21.8	21.2	16.7
07/04/2018 06:00	6	17.1	20.2	15.9		08/04/2018 20:00	20	21	21.1	16.7
07/04/2018 07:00	7	17.2	20.5	16.3		08/04/2018 21:00	21	20.4	20.9	16.6
07/04/2018 08:00	8	17.3	20.6	16.1		08/04/2018 22:00	22	19.9	20.8	16.6
07/04/2018 09:00	9	17.4	20.7	16.4		08/04/2018 23:00	23	19.5	20.7	16.6
07/04/2018 10:00	10	17.6	20.8	16.9		09/04/2018 00:00	24	19.4	20.6	17
07/04/2018 11:00	11	17.6	20.9	16.8		09/04/2018 01:00	1	19.2	20.3	16.5
07/04/2018 12:00	12	17.7	21	16.8		09/04/2018 02:00	2	19	20.1	16.5
07/04/2018 13:00	13	17.8	21.2	16.8		09/04/2018 03:00	3	18.8	20	16.5
07/04/2018 14:00	14	17.8	21	16.6		09/04/2018 04:00	4	18.8	19.9	16.4
07/04/2018 15:00	15	17.8	20.9	16.5		09/04/2018 05:00	5	18.7	19.8	16.4
07/04/2018 16:00	16	17.8	20.8	16.6		09/04/2018 06:00	6	18.7	19.8	16.4
07/04/2018 17:00	17	17.9	21	16.7		09/04/2018 07:00	7	19.1	20	16.6
07/04/2018 18:00	18	17.9	21.1	16.7		09/04/2018 08:00	8	21.2	20	17.7
07/04/2018 19:00	19	17.9	20.9	16.6		09/04/2018 09:00	9	24.6	20.1	19.1
07/04/2018 20:00	20	17.9	20.8	16.5		09/04/2018 10:00	10	26.1	20.1	18.6
07/04/2018 21:00	21	17.9	21	16.6		09/04/2018 11:00	11	27.5	20.3	18.9
07/04/2018 22:00	22	17.9	21.1	16.7		09/04/2018 12:00	12	28.7	20.4	19.2
07/04/2018 23:00	23	18	20.8	16.5		09/04/2018 13:00	13	29.6	20.5	19.2
08/04/2018 00:00	24	18.1	20.8	17.4		09/04/2018 14:00	14	30.5	20.6	19.2
08/04/2018 01:00	1	17.9	20.9	16.4		09/04/2018 15:00	15	30.8	20.6	19.1
08/04/2018 02:00	2	17.9	20.9	16.3		09/04/2018 16:00	16	31.2	20.6	19.3
08/04/2018 03:00	3	17.9	20.9	16.2		09/04/2018 17:00	17	27.8	20.6	16.4



### Scenario 3

	opTemp	Tamb	Tvent			opTemp	Tamb	Tvent
16/04/2018 17:39	25.1780122	21.6	15.8		18/04/2018 04:00	18.875604	20.3	16.3
16/04/2018 18:00	25.00673575	21.2	15.3		18/04/2018 05:00	18.8401984	20.2	15.9
16/04/2018 19:00	22.98183358	21.1	14.9		18/04/2018 06:00	18.8433952	20.2	16.2
16/04/2018 20:00	22.29320928	20.8	14.4		18/04/2018 07:00	19.0179243	20.5	16.2
16/04/2018 21:00	21.62549307	20.8	14.2		18/04/2018 08:00	21.0355616	20.7	18.3
16/04/2018 22:00	21.14348783	20.7	14		18/04/2018 09:00	23.8628184	20.8	18.3
16/04/2018 23:00	20.70691522	20.5	13.6		18/04/2018 10:00	25.1131606	20.9	18.6
17/04/2018 00:00	20.37523926	20.4	15.7		18/04/2018 11:00	26.1819363	21.1	19
17/04/2018 01:00	20.57956336	20.7	15.6		18/04/2018 12:00	26.9453949	21.3	19.1
17/04/2018 02:00	20.48876686	20.7	16		18/04/2018 13:00	27.536574	20.9	18.7
17/04/2018 03:00	20.35542968	20.6	16		18/04/2018 14:00	28.0742969	21	18.8
17/04/2018 04:00	20.24820094	20.6	16.3		18/04/2018 15:00	28.4586211	21.4	18.9
17/04/2018 05:00	20.06311827	20.6	15.7		18/04/2018 16:00	28.6479181	21.7	19.3
17/04/2018 06:00	20.01179439	20.5	16.4		18/04/2018 17:00	26.5800201	21.8	19
17/04/2018 07:00	19.78708481	20.8	16		18/04/2018 18:00	23.4645357	22	16.5
17/04/2018 08:00	19.75548732	20.9	15.8		18/04/2018 19:00	22.666624	21.8	16.5
17/04/2018 09:00	19.67247135	20.9	16.1		18/04/2018 20:00	22.1399052	21.6	16.4
17/04/2018 10:00	19.58396045	20.9	16.2		18/04/2018 21:00	21.6597303	21.3	16.1
17/04/2018 11:00	19.54970908	21	16.2		18/04/2018 22:00	21.1150765	21	16.2
17/04/2018 12:00	19.46913397	20.9	16.3		18/04/2018 23:00	20.792096	20.7	16.3
17/04/2018 13:00	19.44232309	20.7	16.3		19/04/2018 00:00	20.6022046	20.6	16.5
17/04/2018 14:00	19.35700601	20.5	16		19/04/2018 01:00	20.3013312	20.4	16.3
17/04/2018 15:00	19.27644509	20.6	15.9		19/04/2018 02:00	20.0151635	20.3	15.9
17/04/2018 16:00	19.27644509	21	16.1		19/04/2018 03:00	19.8179251	20.2	16.3
17/04/2018 17:00	19.27345218	21.2	16.2		19/04/2018 04:00	19.7826184	20.1	16.2
17/04/2018 18:00	19.24644772	21	16.3		19/04/2018 05:00	19.7638114	20	16.1
17/04/2018 19:00	19.19956603	21.4	16.2		19/04/2018 06:00	19.6442955	20.2	16.2
17/04/2018 20:00	19.19007459	21.2	16.3		19/04/2018 07:00	19.8751601	20.3	16.6
17/04/2018 21:00	19.15694696	21.1	16.2		19/04/2018 08:00	21.8371619	20.4	18.6
17/04/2018 22:00	19.13485849	21	15.9		19/04/2018 09:00	24.6138955	20.5	18.7
17/04/2018 23:00	19.07017414	20.9	16.2		19/04/2018 10:00	25.8470054	20.7	18.9
18/04/2018 00:00	19.05925887	20.7	16.5		19/04/2018 11:00	26.84342	20.5	18.7
18/04/2018 01:00	18.98487486	20.6	16.2		19/04/2018 12:00	27.4912834	20.8	18.9
18/04/2018 02:00	18.94229146	20.6	16.1		19/04/2018 13:00	28.1084301	21.1	18.9
18/04/2018 03:00	18.94659057	20.4	16.3		19/04/2018 14:00	28.6710023	21.4	18.7
					19/04/2018 15:00	28.9795506	21.5	19.6

Scenario 4

	opTemp	ambTemp	Vent			opTemp	ambTemp	Vent
25/04/2018 17:53	23.8462021	22.7	12.5		27/04/2018 06:00	17.9405516	19.9	15.1
25/04/2018 18:00	22.8874808	22.6	12.6		27/04/2018 07:00	18.1483338	20	15
25/04/2018 19:00	21.554567	22.2	12.9		27/04/2018 08:00	19.9083658	20.1	18.6
25/04/2018 20:00	20.7895827	21.9	13.1		27/04/2018 09:00	22.1290201	20.2	18.3
25/04/2018 21:00	20.2696858	21.5	13.1		27/04/2018 10:00	23.0458651	20.3	18.4
25/04/2018 22:00	19.8112214	21.2	13		27/04/2018 11:00	23.7921428	20.4	18.7
25/04/2018 23:00	19.4954556	20.9	13.2		27/04/2018 12:00	24.4572155	20.8	18.7
26/04/2018 00:00	19.1709168	20.7	13.5		27/04/2018 13:00	24.9406902	20.5	19.1
26/04/2018 01:00	19.4327929	20.3	15.5		27/04/2018 14:00	25.6512815	20.6	18.8
26/04/2018 02:00	19.2827918	20.3	15.3		27/04/2018 15:00	26.4026048	21	18.9
26/04/2018 03:00	19.1496576	20	15.2		27/04/2018 16:00	27.0787827	21.2	19.5
26/04/2018 04:00	19.0432439	20	15.6		27/04/2018 17:00	25.341785	21.2	18.7
26/04/2018 05:00	18.941213	19.9	15.6		27/04/2018 18:00	22.3760601	21.7	15.9
26/04/2018 06:00	18.8369803	20	15.3		27/04/2018 19:00	21.5747516	21.7	15.5
26/04/2018 07:00	18.7599857	20	15.1		27/04/2018 20:00	21.0727772	21.4	15.8
26/04/2018 08:00	18.7653674	20	15.3		27/04/2018 21:00	20.7392438	21.4	15.4
26/04/2018 09:00	18.7019632	20.1	15.5		27/04/2018 22:00	20.2828333	21.4	15.3
26/04/2018 10:00	18.6275119	20.1	15.2		27/04/2018 23:00	19.9755486	21.1	15.2
26/04/2018 11:00	18.6200214	20.1	15.1		28/04/2018 00:00	19.8055981	20.8	15.6
26/04/2018 12:00	18.5160128	20	15.5		28/04/2018 01:00	19.5320685	20.7	15.1
26/04/2018 13:00	18.4894581	20.1	15.5		28/04/2018 02:00	19.3465219	20.5	15.5
26/04/2018 14:00	18.3966533	20.4	15.3		28/04/2018 03:00	19.209111	20.5	15.6
26/04/2018 15:00	18.3194438	20.5	15.3		28/04/2018 04:00	19.2444498	20.8	15.3
26/04/2018 16:00	18.3474894	20.9	15.1		28/04/2018 05:00	19.2118872	20.8	15.1
26/04/2018 17:00	18.2851045	21.4	15.2		28/04/2018 06:00	19.1302541	20.8	15.5
26/04/2018 18:00	18.2673971	21.2	15.2		28/04/2018 07:00	19.358655	21.1	15.3
26/04/2018 19:00	18.262239	21.1	15.2		28/04/2018 08:00	21.2635486	21.3	18.8
26/04/2018 20:00	18.1864139	20.9	15.2		28/04/2018 09:00	23.6032809	21.5	18.7
26/04/2018 21:00	18.162176	20.8	15.5		28/04/2018 10:00	24.7035953	21.3	18.7
26/04/2018 22:00	18.1334225	20.6	15		28/04/2018 11:00	25.6924674	21.4	18.7
26/04/2018 23:00	18.0444957	20.4	15.3		28/04/2018 12:00	26.589898	21.5	19.1
27/04/2018 00:00	18.018788	20.3	15.5		28/04/2018 13:00	27.3755485	21.6	19
27/04/2018 01:00	17.8914392	20.1	15.3		28/04/2018 14:00	28.0301866	21.7	19
27/04/2018 02:00	17.8510517	20.1	15.4		28/04/2018 15:00	28.4943341	21.9	19.1
27/04/2018 03:00	17.8321482	19.9	15.4		28/04/2018 16:00	28.7495352	22.3	19.2
27/04/2018 04:00	17.9489162	19.9	15.2		28/04/2018 17:00	26.92014	22.8	19.3
27/04/2018 05:00	17.8800884	19.8	15.1		28/04/2018 17:25	24.4528076	23.4	13.6

Scenario 5a

	opTemp	ambTemp	Vent		opTemp	ambTemp	Vent	
22/04/2018 20:32	21.6319968	22.5	12.8		24/04/2018 09:00	22.3077109	20.4	18.8
22/04/2018 21:00	21.158973	22.4	13.1		24/04/2018 10:00	23.1187467	20.5	18.5
22/04/2018 22:00	20.6210901	22	12.9		24/04/2018 11:00	23.6454563	20.7	18.7
22/04/2018 23:00	20.2923299	21.8	13.2		24/04/2018 12:00	24.0825513	20.5	18.8
23/04/2018 00:00	20.0161787	21.7	13.4		24/04/2018 13:00	24.4970193	20.8	19
23/04/2018 01:00	20.2879669	21	15.5		24/04/2018 14:00	25.0990199	20.6	18.8
23/04/2018 02:00	20.1850229	20.8	15.3		24/04/2018 15:00	25.9441629	20.7	19
23/04/2018 03:00	20.0194101	20.5	15.3		24/04/2018 16:00	26.746169	20.9	19
23/04/2018 04:00	19.906083	20.4	15.4		24/04/2018 17:00	25.2154785	21.1	18.8
23/04/2018 05:00	19.7820047	20.4	15.5		24/04/2018 18:00	22.4098477	21.2	15.5
23/04/2018 06:00	19.6555453	20.4	15.2		24/04/2018 19:00	21.5955272	21.2	15.3
23/04/2018 07:00	19.4903346	20.4	15.3		24/04/2018 20:00	21.1509705	21.2	15.3
23/04/2018 08:00	19.4441765	20.5	15.6		24/04/2018 21:00	20.8069123	21.4	15.4
23/04/2018 09:00	19.3442336	20.4	15.2		24/04/2018 22:00	20.3292782	21.2	15.6
23/04/2018 10:00	19.2669229	20.5	15.2		24/04/2018 23:00	19.997281	21	15.3
23/04/2018 11:00	19.2199711	20.4	15.4		25/04/2018 00:00	19.8264926	20.8	15.5
23/04/2018 12:00	19.1512274	20.4	15.6		25/04/2018 01:00	19.5645215	20.8	15.1
23/04/2018 13:00	19.0739019	20.5	15.3		25/04/2018 02:00	19.4262229	20.7	15.4
23/04/2018 14:00	19.0726496	20.5	15.3		25/04/2018 03:00	19.3246835	20.6	15.1
23/04/2018 15:00	19.0579207	20.4	15.3		25/04/2018 04:00	19.3747879	20.4	15.5
23/04/2018 16:00	19.0267074	20.5	15.4		25/04/2018 05:00	19.2933725	20.4	15.3
23/04/2018 17:00	19.0319156	20.6	15.6		25/04/2018 06:00	19.3374733	20.3	15.3
23/04/2018 18:00	18.9766781	20.8	15.5		25/04/2018 07:00	19.6044529	20.6	15.7
23/04/2018 19:00	18.9702879	20.9	15.5		25/04/2018 08:00	21.3381319	20.6	18.6
23/04/2018 20:00	18.9567951	20.9	15.4		25/04/2018 09:00	23.3466094	20.8	18.5
23/04/2018 21:00	18.9577253	20.9	15.4		25/04/2018 10:00	24.3519432	20.9	18.7
23/04/2018 22:00	18.8681797	20.7	15.4		25/04/2018 11:00	25.1624544	20.6	18.6
23/04/2018 23:00	18.8504264	20.5	15.3		25/04/2018 12:00	25.9950054	20.4	19
24/04/2018 00:00	18.8265785	20.4	15.6		25/04/2018 13:00	26.7936589	20.5	18.6
24/04/2018 01:00	18.7535297	20.3	15.1		25/04/2018 14:00	27.4365908	20.8	18.9
24/04/2018 02:00	18.6640654	20.1	15.4		25/04/2018 15:00	27.9845271	21.8	19.1
24/04/2018 03:00	18.6440759	20.1	15.3		25/04/2018 16:00	28.3252609	21.8	19.4
24/04/2018 04:00	18.5535807	20	15.3		25/04/2018 17:00	26.5324819	22.3	19
24/04/2018 05:00	18.5402648	20	15.5		25/04/2018 17:12	24.63778	22.6	15
24/04/2018 06:00	18.5108608	20	15.5					
24/04/2018 07:00	18.7177622	20.3	15.2					
24/04/2018 08:00	20.3604138	20.3	18.7					



Scenario 5b

	opTemp	ambTemp	ventTemp			opTemp	ambTemp	ventTemp
01/05/2018 18:29	21.7713636	20.9	12.8		03/05/2018 07:00	18.3036191	20.5	15.1
01/05/2018 19:00	21.1979043	20.6	13.1		03/05/2018 08:00	19.636185	20.5	15.6
01/05/2018 20:00	20.5870637	20.5	13.2		03/05/2018 09:00	21.5319269	20.6	15.9
01/05/2018 21:00	19.9810985	20.3	12.8		03/05/2018 10:00	22.2809374	20.5	16
01/05/2018 22:00	19.4579201	20.2	12.5		03/05/2018 11:00	22.9078074	20.7	15.8
01/05/2018 23:00	19.1768931	20.2	12.7		03/05/2018 12:00	23.3271126	20.9	16.1
02/05/2018 00:00	18.9906661	20	15		03/05/2018 13:00	23.7709423	21.1	15.8
02/05/2018 01:00	19.2528884	19.9	15.3		03/05/2018 14:00	24.1859339	21.1	16
02/05/2018 02:00	19.175453	19.8	15.4		03/05/2018 15:00	24.5424603	21.1	15.9
02/05/2018 03:00	19.1469547	19.7	15.2		03/05/2018 16:00	25.0045534	21.1	15.9
02/05/2018 04:00	19.1410762	19.7	15.2		03/05/2018 17:00	23.4414552	20.9	15.4
02/05/2018 05:00	19.05688	19.8	15.5		03/05/2018 18:00	21.5041493	21.4	15.9
02/05/2018 06:00	19.0503863	19.8	15.4		03/05/2018 19:00	20.935586	21.1	15.8
02/05/2018 07:00	18.9785395	20.1	15.4		03/05/2018 20:00	20.5474906	20.7	15.3
02/05/2018 08:00	19.0324843	20.1	15.6		03/05/2018 21:00	20.3274011	20.6	15.6
02/05/2018 09:00	18.9032738	20.3	15.3		03/05/2018 22:00	19.9835856	21.2	15.6
02/05/2018 10:00	18.9356237	20.4	15.3		03/05/2018 23:00	19.6848393	20.9	15.6
02/05/2018 11:00	18.8799082	20.3	15.4		04/05/2018 00:00	19.5348737	20.5	15.4
02/05/2018 12:00	18.8079335	20.4	15.5		04/05/2018 01:00	19.3184062	20.5	15.3
02/05/2018 13:00	18.7756468	20.6	15.3		04/05/2018 02:00	19.1602543	20.2	15.2
02/05/2018 14:00	18.7652464	20.3	15.5		04/05/2018 03:00	19.1176521	20.3	15.3
02/05/2018 15:00	18.6700188	20.7	15.3		04/05/2018 04:00	19.1592076	20.1	15.4
02/05/2018 16:00	18.5788134	20.7	15.3		04/05/2018 05:00	19.1462066	20.1	15.2
02/05/2018 17:00	18.5659456	20.7	15.4		04/05/2018 06:00	19.1536912	20	15.2
02/05/2018 18:00	18.5401464	21.2	15.1		04/05/2018 07:00	19.3774635	20.4	15.4
02/05/2018 19:00	18.4817362	21.4	15.5		04/05/2018 08:00	20.8306633	20.5	15.9
02/05/2018 20:00	18.4126134	21.2	15.4		04/05/2018 09:00	22.6373855	20.6	15.7
02/05/2018 21:00	18.3759964	21.2	15.5		04/05/2018 10:00	23.3971831	20.8	15.9
02/05/2018 22:00	18.3356461	21.2	15.5		04/05/2018 11:00	24.2560204	20.9	16.1
02/05/2018 23:00	18.2479622	20.9	15.2		04/05/2018 12:00	24.9505109	20.4	16.2
03/05/2018 00:00	18.2135695	20.6	15.5		04/05/2018 13:00	25.7115779	20.4	16.1
03/05/2018 01:00	18.1105175	20.5	15.5		04/05/2018 14:00	26.3254851	20.6	16.3
03/05/2018 02:00	18.037511	20.5	15.1		04/05/2018 15:00	26.8277707	21	16.4
03/05/2018 03:00	18.008373	20.4	15.1		04/05/2018 16:00	27.2439555	21.4	16.5
03/05/2018 04:00	18.1000825	20.4	15.3		04/05/2018 17:00	25.5004959	21.6	16.6
03/05/2018 05:00	18.1126117	20.4	15.5		04/05/2018 17:03	24.9560329	21.9	15.9
03/05/2018 06:00	18.0436274	20.5	15.4					

Scenario 6

	opTemp	ambTemp	Vent			opTemp	ambTemp	Vent
28/04/2018 19:38	22.3691413	23.6	12.9		30/04/2018 07:00	18.8626	20.3	15.2
28/04/2018 20:00	21.5272554	23.3	13.1		30/04/2018 08:00	20.6639571	20.3	18.2
28/04/2018 21:00	20.891108	22.6	12.9		30/04/2018 09:00	22.7801218	20.4	18.6
28/04/2018 22:00	20.6053841	22.2	13		30/04/2018 10:00	23.6280513	20.5	18.5
28/04/2018 23:00	20.1736799	21.9	13.1		30/04/2018 11:00	24.3501746	20.7	18.5
29/04/2018 00:00	20.0194358	21.7	13.7		30/04/2018 12:00	24.921099	20.8	18.7
29/04/2018 01:00	20.1691196	21.5	15.4		30/04/2018 13:00	25.4422912	21.4	18.6
29/04/2018 02:00	20.0491806	21.3	15.6		30/04/2018 14:00	26.0421633	21.2	18.8
29/04/2018 03:00	19.9459449	21.2	15.5		30/04/2018 15:00	26.6313147	21.3	18.8
29/04/2018 04:00	19.8158915	21.1	15.4		30/04/2018 16:00	26.979117	21.2	18.7
29/04/2018 05:00	19.7012507	20.9	15.5		30/04/2018 17:00	25.3720284	21.1	18.7
29/04/2018 06:00	19.5180681	20.8	15.3		30/04/2018 18:00	22.6259619	21.1	15.6
29/04/2018 07:00	19.4732976	20.7	15.6		30/04/2018 19:00	21.8318101	20.9	15.6
29/04/2018 08:00	19.3764248	20.8	15.6		30/04/2018 20:00	21.3127598	20.8	15.9
29/04/2018 09:00	19.2902686	20.8	15.2		30/04/2018 21:00	20.8231066	20.6	15.7
29/04/2018 10:00	19.2381094	21.3	15.4		30/04/2018 22:00	20.4508506	20.5	15.3
29/04/2018 11:00	19.1607826	21.3	15.3		30/04/2018 23:00	20.0644394	20.4	15.4
29/04/2018 12:00	19.0955124	21.3	15.6		01/05/2018 00:00	19.9072603	20.2	15.7
29/04/2018 13:00	19.0693546	21.4	15.3		01/05/2018 01:00	19.6363373	20.1	15.3
29/04/2018 14:00	19.0476537	21.5	15.4		01/05/2018 02:00	19.4730409	20.1	15.7
29/04/2018 15:00	19.0298706	21.8	15.5		01/05/2018 03:00	19.3001411	20.1	15.3
29/04/2018 16:00	19.0640877	22.2	15.3		01/05/2018 04:00	19.2960693	20	15.4
29/04/2018 17:00	19.0620505	22.5	15.4		01/05/2018 05:00	19.1513026	19.9	15.2
29/04/2018 18:00	19.0598393	22.6	15.6		01/05/2018 06:00	19.2167296	19.9	15.4
29/04/2018 19:00	19.0724264	22.6	15.2		01/05/2018 07:00	19.4654907	20.1	15.5
29/04/2018 20:00	19.0733921	22.5	15.4		01/05/2018 08:00	21.2325605	20.1	18.6
29/04/2018 21:00	19.01292	22.2	15.4		01/05/2018 09:00	23.5135416	20.4	18.7
29/04/2018 22:00	18.9960956	21.9	15.5		01/05/2018 10:00	24.6192379	20.5	18.6
29/04/2018 23:00	18.9838647	21.8	15.6		01/05/2018 11:00	25.5533036	20.3	18.7
30/04/2018 00:00	19.0327539	21.6	15.7		01/05/2018 12:00	26.2370934	20.4	18.7
30/04/2018 01:00	18.9023513	20.9	15.5		01/05/2018 13:00	26.913043	20.4	18.8
30/04/2018 02:00	18.8118636	20.6	15.4		01/05/2018 14:00	27.5249473	20.6	18.9
30/04/2018 03:00	18.7275472	20.5	15.3		01/05/2018 15:00	27.9921475	20.5	18.8
30/04/2018 04:00	18.7555909	20.3	15.2		01/05/2018 16:00	28.2329797	20.6	19.1
30/04/2018 05:00	18.6960855	20.3	15.2		01/05/2018 17:00	26.2327058	20.4	17.3
30/04/2018 06:00	18.6587745	20.3	15.3		01/05/2018 17:05	25.3077313	21.1	16.1

#### 6.4. Vedlegg 4 – Differanse verdier for operativ temperatur

Differanse mellom topp og bunnpunkter fra eksperimentell dag 1 til dag 2

Scenario 1	optemp B/T 1	optemp B/T 2	dT	d%
T1-T2	31.46487288	31.95725365	0.49	1.54
B1-B2	18.38799785	19.09850805	0.71	3.72
<b>Scenario 2</b>				
T1-T2	29.36603017	31.58113426	2.22	7.01
B1-B2	18.89439398	19.39113074	0.50	2.56
<b>Scenario 3</b>				
T1-T2	28.64791814	29.24506522	0.60	2.04
B1-B2	19.01792427	19.87516009	0.86	4.31
<b>Scenario 4</b>				
T1-T2	27.0787827	28.74953522	1.67	5.81
B1-B2	18.14833377	19.35865499	1.21	6.25
<b>Scenario 5 a</b>				
T1-T2	26.74616904	28.32526093	1.58	5.57
B1-B2	18.71776218	19.60445291	0.89	4.52
<b>Scenario 5 b</b>				
T1-T2	25.00455344	27.24395553	2.24	8.22
B1-B2	18.30361915	19.37746349	1.07	5.54
<b>Scenario 6</b>				
T1-T2	26.97911704	28.2329797	1.25	4.44
B1-B2	18.86260001	19.46549075	0.60	3.10

Differanse mellom numeriske og simulerte resultater

Scenario 1	Eksperimentell opTemp	Simulert opTemp	dT	d%
B1	18.39	17.68	0.71	3.85
T1	31.46	32.20	0.73	2.27
B2	19.10	17.94	1.16	6.08
T2	31.96	32.85	0.90	2.73
<b>Scenario 2</b>				
B1	18.89	17.98	0.91	4.82
T1	29.37	30.72	1.35	4.39
B2	19.75	19.44	0.31	0.08
T2	31.58	31.84	0.26	0.82
<b>Scenario 3</b>				
B1	19.02	18.25	0.77	4.06
T1	28.65	28.21	0.44	1.54
B2	19.88	19.00	0.88	4.41
T2	29.25	28.96	0.29	0.98
<b>Scenario 4</b>				
B1	18.15	17.68	0.47	2.58
T1	27.08	26.73	0.35	1.29
B2	19.36	19.49	0.13	0.68
T2	28.75	28.10	0.65	2.28
<b>Scenario 5</b>				
B1	18.72	18.15	0.57	3.02
T1	26.75	26.23	0.51	1.92
B2	19.60	21.25	1.64	7.74
T2	28.33	28.68	0.35	1.23
<b>Scenario 6</b>				
B1	18.86	17.79	1.07	5.67
T1	26.98	26.58	0.40	1.47
B2	19.47	19.69	0.23	1.15
T2	28.23	27.62	0.61	2.16
<b>Scenario 7</b>				
B1	18.30	17.95	0.36	1.96
T1	25.00	26.08	1.07	4.11
B2	19.38	18.81	0.56	2.91
T2	27.24	26.29	0.96	3.51

Differanse mellom eksperimentelle scenarior

		S1-S2		S2-S3		S3-S1	
		Diff	Prosent	Diff	Prosent	Diff	Prosent
B1		0.51	2.68	0.12	0.65	0.63	3.31
T1		2.10	6.67	0.72	2.45	2.82	8.95
B2		0.65	3.31	0.12	0.62	0.78	3.91
T2		0.38	1.18	2.34	7.40	2.71	8.49
		S4-S5a		S5a-S6		S6-S4	
		Diff	Prosent	Diff	Prosent	Diff	Prosent
B1		0.57	3.04	0.14	0.77	0.71	3.79
T1		0.33	1.23	0.23	0.86	0.10	0.37
B2		0.25	1.25	0.14	0.71	0.11	0.55
T2		0.42	1.48	0.09	0.33	0.52	1.80
		S5a-S5b					
		Diff	Prosent				
B1		0.41	2.21				
T1		1.74	6.51				
B2		0.23	1.16				
T2		1.08	3.82				

## 6.5. Vedlegg 5 - Nøyaktighet

Termoelementers temperaturområde og nøyaktighet, i eksperimenter er type K brukt.



### 5.3 Tolerancer

Her skelnes mellom tre toleranceklasser. Klasse 1 er den mest nøyagtige. Klasse 2 er standard, dvs. denne kvalitet leveres, hvis intet annet er nævnt. En samlet oversikt er angivet nedenfor.

Tolerancer for termoelementer iht IEC 584 - 2		
Termopar	Temperaturområde	Tolerance <sup>1)</sup>
<b>Klasse 1</b>		
Cu-CuNi Type T	-40 til 350°C	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ eller $\pm 0,004 \cdot t_{\text{aktuel}}^{\circ}\text{C}$
NiCr-CuNi Type E	-40 til 800°C	$\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ eller $\pm 0,004 \cdot t_{\text{aktuel}}^{\circ}\text{C}$
Fe-CuNi Type J	-40 til 750°C	$\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ eller $\pm 0,004 \cdot t_{\text{aktuel}}^{\circ}\text{C}$
NiCr-Ni Type K	-40 til 1000°C	$\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ eller $\pm 0,004 \cdot t_{\text{aktuel}}^{\circ}\text{C}$
Nicrosil-Nisil Type N	-40 til 1000°C	$\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ eller $\pm 0,004 \cdot t_{\text{aktuel}}^{\circ}\text{C}$
Pt10%Rh-Pt Type S	0 til 1100°C 1100 til 1600°C	$\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ $\pm (1,0^{\circ}\text{C} + 0,003(t_{\text{aktuel}} - 1100))^{\circ}\text{C}$
Pt13%Rh-Pt Type R	0 til 1100°C 1100 til 1600°C	$\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ $\pm (1,0^{\circ}\text{C} + 0,003(t_{\text{aktuel}} - 1100))^{\circ}\text{C}$

InTab loggers nøyaktighet

## 4 TECHNICAL DATA

At 25°C and nominal current 500µA (other ranges on request)

<b>Constant Current</b>	<b>500µA</b>
<b>Accuracy</b>	<b>+/-0.5µA</b>
<b>Compliance</b>	<b>2.5V (0≤RL≤5kΩ)</b>
<b>Tempco (max)</b>	<b>+/-150ppm/°C</b>

For mer data angående intab logger 3100i henvises til referanse [18].