

# Varmluftsoppvarming av boliger

**Marianne Nordlund Holte**

Master i produktutvikling og produksjon

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Hans Martin Mathisen, EPT

Medveileder: Monica Berner, SINTEF Energi AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for energi- og prosesseteknikk



EPT-M-2013-54

**MASTEROPPGAVE**

for

Stud.techn. Marianne Nordlund Holte

Våren 2013

Varmluftoppvarming av boliger  
*Air heating of residential buildings***Bakgrunn**

I moderne energieffektive boliger er varmetilskuddet fra tekniske installasjoner og personer i prinsippet tilstrekkelig til å dekke store deler av varmebehovet. Ved lave interne varmetilskudd og ved lave utetemperaturer vil det i perioder være behov for å tilføre varme. Fordi effektbehovet er mindre og brukstiden kort, blir kostnaden for varmeinstallasjonen relativt stor. En mulig løsning er å knytte romoppvarmingen til ventilasjonen, dvs heve temperaturen på tilluften i de periodene det er behov for varmetilførsel.

SINTEF Energi AS og NTNU har et forskningsprosjekt for FLEXIT AS knyttet til utvikling av modulbaserte ventilasjon-, oppvarming- og tappevannsløsninger kalt Alt-i-vent. Oppvarming med varmluft inngår som en del av dette prosjektet.

Bruk av varmluft til oppvarming har gjennom flere tiår vært ansett for å være en løsning som gir dårligere termisk og atmosfærisk inneklimate enn andre løsninger. I moderne meget godt isolerte bygninger vil imidlertid varmebehovet være vesentlig lavere, dermed kreves ikke like høy tilluftstemperatur som tidligere. Dessuten vil driftstiden i den tid boligen er i bruk være kortere. Kan man bruke varmluft til oppvarming vil installasjonskostnadene også antagelig reduseres i forhold til bruk av vanlig vannbåren varme. Det er derfor stor interesse knyttet til å undersøke slike løsninger nærmere.

Oppgaven utføres i samarbeid med FLEXIT AS og Rambøll AS. Masteroppgaven er en videreføring av kandidatens prosjektoppgave.

**Mål**

Målet med prosjektoppgaven er å etablere grunnlag for å kunne vurdere bruk av og konsekvenser av varmluftoppvarming i boliger. Dette gjøres ved hjelp av teoretiske betraktninger og fullskalamålinger.

**Oppgaven kan bearbeides ut fra følgende punkter:**

1. Definere og klargjør problemstillingen. Eventuelle avgrensninger.

2. Med basis i prosjektoppgaven gjøres en oppsummering av teoretiske/empiriske modeller for luftstråler, strømning i rom og ventilasjonseffektivitet som er aktuelle for varmluftsoppvarming.
3. Planlegge målinger. Disse utføres primært i bolig med mekanisk balansert ventilasjon hvor tilluftstemperaturen (og mengden) kan manipuleres. Planleggingen gjøres blant annet med utgangspunkt i punkt 2. Aktuelle måleparatre knyttes til termisk komfort (temperatur og temperaturgradienter) og ventilasjonseffektivitet.
4. Bearbeiding og evaluering av måleresultater. Hvordan lar ventilasjonsoppvarming seg forene med krav til luftmengde? Er det nødvendig å øke luftmengden ut over det som er vanlige mengder? Hvordan vil oppvarmingen variere med tiden for ulike geografisk beliggenheter og bruksmønstre? IDA-ICE kan brukes som verktøy i evalueringen.
5. Konsekvenser for komfort, effektbehov, energibruk og økonomi.

” - ”

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

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

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

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

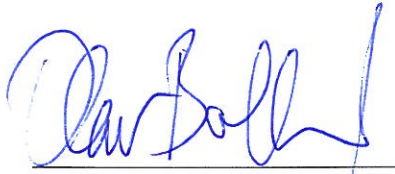
Risikovurdering av kandidatens arbeid skal gjennomføres i henhold til instituttets prosedyrer. Risikovurderingen skal dokumenteres og inngå som del av besvarelsen. Hendelser relatert til kandidatens arbeid med uheldig innvirkning på helse, miljø eller sikkerhet, skal dokumenteres og inngå som en del av besvarelsen. Hvis dokumentasjonen på risikovurderingen utgjør veldig mange sider, leveres den fulle versjonen elektronisk til veileder og et utdrag inkluderes i besvarelsen.

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


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

- Arbeid i laboratorium (vannkraftlaboratoriet, strømningsmeknikk, varmeteknikk)
- Feltarbeid

NTNU, Institutt for energi- og prosesseteknikk, 16. januar 2013



Olav Bolland  
*Instituttleder*



Hans Martin Mathisen  
*Faglig ansvarlig/veileder*

Medveileder:  
Monica Berner



## Forord

---

Denne masteroppgaven er avsluttende oppgave ved sivilingeniørstudiet Produktutvikling og Produksjon våren 2013 ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim.

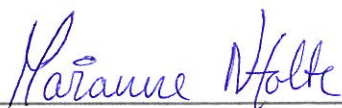
Masteroppgaven besvarer oppgaven «Varmluftsoppvarming av boliger» og er en videreføring av prosjektarbeidet som ble levert høsten 2012. Rapporten vurderer varmluftsoppvarming av boliger ved hjelp av teoretiske betraktninger, fullskalamålinger og datasimuleringer av energi- og inn klima. Oppgaven vektlegges 30 studiepoeng.

Oppgaven er gitt i et samarbeid mellom NTNU og SINTEF Energi AS og er knyttet til et forskningsprosjekt som utføres for FLEXIT AS. Oppgaven utføres i samarbeid med FLEXIT AS og Rambøll AS.

Jeg vil benytte anledningen til å takke hovedveileder Hans Martin Mathisen for utarbeidelse av en spennende oppgave og for god oppfølging underveis i prosessen. Jeg vil også takke ansatte i SINTEF Energi AS, spesielt medveileder Monica Berner, for god veiledning og for hjelp med feltarbeidet. Jeg vil også rette en spesielt stor takk til beboere i Miljøbyen Granåsen som gladelig har stilt hjemmene sine til disposisjon for oppgaven min.

I tillegg vil jeg takke ansatte i Rambøll AS, Heimdal Bolig AS, FLEXIT AS, A-Service AS og Per Knudsen Arkitektkontor for å være hjelpelige med informasjonsinnhenting. Under opplæring i dataprogrammet IDA ICE © har jeg fått veldig nyttig kursing og support fra Jörgen Eriksson, EQUA Solutions AB.

Tilslutt vil jeg gjerne takke min kjære samboer for støtte og oppmuntring under hele skriveprosessen.



---





## Sammendrag

---

Rapporten er et studie av varmluftoppvarming i passivhus for norske vinterforhold, da med spesielt fokus på temperaturgradienter som oppstår i rom, effektbehov fra varmebatterier og opplevelse av komfort hos beboere. Det er foretatt fullskalamålinger i rekkehus i Miljøbyen Granåsen, Trondheim, i perioden februar/mars 2013. En kuldeperiode inntraff i måleperioden med temperaturer på ca.  $-15\text{ °C}$  om natten. Varmluftoppvarming ble installert i én forsøksbolig og to andre boliger fungerte som referanseboliger hvor radiator brukes for distribuering av fjernvarme. Det er i tillegg gjort simuleringer av rekkehuset i IDA ICE 4.5 for dimensjonerende utetemperatur i Trondheim. Ulikhet i personlast og brukervaner for de tre boligene må tas med i betraktningen, da det oppstår en tydelig forskjell i gjennomsnittlige temperaturnivå for boligene.

Maksimal tilluftstemperatur ble satt til  $40\text{ °C}$  og det ble innført nattsinking av denne til  $15\text{ °C}$ . Resultatene fra målinger av temperaturgradienter viser at disse ligger vel innenfor det som regnes som komfortkrav på  $3\text{ K/m}$ . Som forventet er temperaturgradientene i forsøksboligen noe større enn i referanseboligene. For temperaturgradient i trapp ser en at temperaturdifferansen for forsøksboligen er omtrent konstant gjennom måleperioden, mens den for den ene referanseboligen varierer i større grad med utetemperaturen. På tross av at plassering av avtrekk i tak er nærme radiell tilluftsventil på kjøkken, ser man ikke tydelige tendenser til kortslutningsventilasjon. Retning for tilluftsstråle er i dette tilfellet justerbar og det er åpenbart en fordel.

I Norge foretrekker man ofte lave temperaturer på soverom og derfor ble nattsinking av tilluftstemperatur på  $15\text{ °C}$  innført i forsøkshus. Nattsinkingen førte til at beboerne opplevde romtemperaturen som noe kald på morgenen, men det antas at problemet løses ved endring av timeplan for nattsinking. Inneklimaet opplevdes ellers som tilfredsstillende. I simuleringene er nattsinking forsøkt for dimensjonerende utetemperatur og man ser at det kan få negative konsekvenser for komforten i boligen. Man bør derfor revurdere bruken av nattkjøling i fyringssesongen. Nattsinking kan bidra til energibesparelser, men dette må veies opp mot den nedkjølingen av huset nattsinkingen medfører og det effektbehovet man deretter får på dagtid. Maksimalt varmetap i kanalstrekket er målt til å være  $7\text{ °C}$  mellom aggregat og tilluftsventil på soverom ved en tilluftstemperatur på  $40\text{ °C}$  ut fra aggregatet. På natten øker tilluftstemperaturen med  $3\text{ °C}$  i samme kanalstrekk og minker virkningen av nattsinkingen til soverommene. Det antas at store deler av varmetapet/varmetilskuddet i kanal veksles med rommene. Det anbefales å isolere kanalstrekk mot rom der en ikke ønsker varmetap eller varmetilførsel for en mer forutsigbar varmefordeling i boligen.



I simuleringene ble det innført ulike reguleringsmessige tiltak for å bedre komfort ved dimensjonerende utetemperatur, spesielt med tanke på morgenen. Disse er; endring av timeplan og temperatur for nattsinking, øke tilluftstemperatur til 55 °C, økning av luftmengde og implementering av ved- eller pelletsovn. Økning av tilluftstemperatur er aktuelt for norske forhold men resultater fra simuleringene gir ikke informasjon om komfort og strømningsmessige endringer for en slik betydelig økning i tilluftstemperatur.

Forsering av luftmengder er simulert som konstante over hele døgnet. En behovsstyring av dette er ønskelig. Høye luftmengder og nattsinking av tilluftstemperatur førte naturlig nok til større nedkjølinger av boligen og høyere effektbehov. Valg av variert eller konstant luftmengde må veies opp mot konsekvenser for komfort og energibesparelser.

Total installert effekt i varmebatteri er 4300 W, 1300 i aggregatets innebygde varmebatteri og 3000 W i eksternt varmebatteri. Maksimalt effektbehov inntreffer på morgenen ved oppstart av eksternt varmebatteri og har kort varighet. Innsatt tak for installert effekt bør settes lavere enn maksimalt behov, mot en forsinkelse for oppstartstid av romoppvarming. Dobling av luftmengde er dimensjonerende faktor for nødvendig installert effekt i varmebatterier.

Det forventes at beboere er villige til å tilpasse brukervaner, som åpning av dører eller forsering av luftmengder, i de få kritiske periodene som oppstår i fyringssesongen.

Det er per i dag gjort veldig få studier av varmluftsoppvarmingens egnethet for norske forhold og denne rapporten er et bidrag til ytterligere utforskning av temaet. Feltarbeidet som er utført i forbindelse med rapporten viser gode resultater for varmluftsoppvarming i et rekkehus i Trondheim. Flere lignende studier bør gjennomføres i ulike boligtyper og ulike norske værforhold for å få bredere kunnskap om temaet.



## Abstract

---

This report is a study of air heating in residential buildings of Passive House standard under Norwegian winter conditions. The focus of the report is temperature gradients in zones, necessary power consumption in heating coils and the thermal comfort conditions experienced by the occupants. A full-scale experiment of air heating in a terraced passive house in Miljøbyen Granåsen, Trondheim, has been conducted in the period February-March 2013. During the field measurements, a longer period of cold days occurred, with temperatures of approx.  $-15\text{ °C}$  at night. Two other dwellings in Miljøbyen served as reference houses where a hydronic radiator was used for space heating. An energy- and indoor climate simulation of the dwelling is conducted in IDA ICE 4.5. There is a certain inequality between occupational load and user habits that must be considered when the results are analyzed.

The limit for the maximum supply air temperature in the full-scale measurements was  $40\text{ °C}$ . The results of the measured temperature gradients show that these are well within what is considered a comfort norm of  $3\text{ K/m}$ . As expected, there is a slight increase from the gradients measured in the reference houses to the air heated house. For the air heated house, the temperature difference in the staircase is approx.  $3\text{ °C}$  and constant throughout the period. For one of the reference houses we see that this temperature difference is depending more on the outside temperature variations.

In Norway people usually prefer low temperatures in the bedroom at night. A night setback of  $15\text{ °C}$  was used in the air heated dwelling. The occupants felt that the mean room air temperature was too cold in the morning. The problem is believed solved by shortening the schedule of the night setback. The thermal climate was perceived otherwise satisfactory. Night setback was also introduced in the IDA simulations. The results showed that this could have a negative effect on the comfort criteria during design outdoor temperatures. The night setback can result in a significant cooling of the building body and this must be weighed against the contribution to energy savings.

Maximum measured temperature loss in the duct is  $7\text{ °C}$  at daytime. This is measured at the supply air terminal in the bedroom when the supply temperature from the air handling unit is  $40\text{ °C}$ . At night, the maximal temperature loss is  $3\text{ °C}$  to the bedroom which reduces the effect of the night setback. It is recommended to insulate ducts that pass rooms where you don't want heat transfer in or out. This will give a more predictable heat distribution.

In the simulations, various regulation strategies were introduced to improve the comfort level at design outdoor temperature, with focus on mornings. The strategies were; change of schedule and temperature for night setback, increase the supply air temperature to  $55\text{ °C}$ , increase the supply air flow and also study the implementation of a wood or pellet stove. Increasing of the supply air temperature to  $55\text{ °C}$  is an interesting topic for Norwegian conditions. But neither the results from the simulations or similar measurements, provides sufficient information of comfort or flow changes for such a significant increase in supply air temperature.



Increased air flow rates are simulated as a constant rate throughout the day. A demand control of increased flow rates is desirable. High air flow rates and night setback of supply air temperature led to undesirable cooling of the dwelling and a larger power requirement to make up for this. Varied and constant air flow must be weighed against the influence on comfort and energy savings.

Total installed power for the heating coils is 4300 W, 1300 W in the unit's built-in heating coil and 3000 W in the external heating coil. Maximum power demand occurs in the morning at the startup of the external heating coil. This maximum power demand has a very short duration before it starts to drop. The limit for installed power should be lower than the maximum demand, though leading to a short delay for the start-up time of the space heating. Doubling the airflow gives the design value for required installed power of the heating coil.

It is expected that residents are willing to adapt their user habits, such as opening doors or increase the air flow rates manually, in the few critical periods that occur during the heating season.

As of today there are very few reports on the suitability of residential air heating in a Norwegian climate. This report is a contribution to additional exploration of the topic. The field work associated with this report shows good results for air heating in a terraced house in Trondheim. Additional similar experiments should be conducted in different types of dwellings and in different weather conditions in Norway for a broader knowledge on this subject.





## Figurer

---

Figur 1-1: Tillufts og avtrekks plassering .....	2
Figur 2-1: Illustrasjon av luftstrålene (a.) aksiell stråle og (b.) radiell stråle (Skåret, 2000) .....	5
Figur 2-2: Avbøyning fra horisontalaksen for rund, fri stråle .....	6
Figur 2-3: Avbøyning fra horisontalaksen for radiell, fri stråle .....	6
Figur 2-4: Luftstrømning ved (a.) lavt Arkimedestall og (b.) høyt Arkimedestall i tilluft (Etheridge & Sandberg, 1996) .....	7
Figur 2-5: Hastighet i stråle for utløpshastighet lik 34 m <sup>3</sup> /h .....	8
Figur 2-6: Hastighet i stråle for utløpshastighet lik 57 m <sup>3</sup> /h .....	8
Figur 3-1: Effektførsløp - Ved og Pellets .....	13
Figur 4-1: Oppsett for temperaturmåling i rom – Eksempel fra bolig 3 .....	18
Figur 4-2: Utetemperatur vs. tilluftstemperatur .....	20
Figur 4-3: (a) Diffuser, (b) Radiell og (c) Avtrekksventil (Systemair, 2013) (FLEXIT, 2013) .....	21
Figur 4-4: Tilluftstemperaturer vs. utetemperatur .....	24
Figur 4-5: Temperaturfordeling i stue 10. mars - Høyde(Temperatur) .....	25
Figur 4-6: Temperaturfordeling i stue 14. mars - Høyde(Temperatur) .....	26
Figur 4-7: Temperaturfordeling i stue 10. mars – Temperatur(Tid) .....	27
Figur 4-8: Temperaturfordeling i stue 14. mars – Temperatur(Tid) .....	27
Figur 4-9: Temperaturfordeling i stort soverom 10. mars - Høyde(Temperatur) .....	28
Figur 4-10: Temperaturfordeling i stort soverom 14. mars - Høyde(Temperatur) .....	29
Figur 4-11: Temperaturfordeling i soverom 9-16. mars .....	29
Figur 4-12: Temperaturfordeling i stort soverom 10. mars – Temperatur(Tid) .....	30
Figur 4-13: Temperaturfordeling i stort soverom 14. mars – Temperatur(Tid) .....	30
Figur 4-14: Temperaturfordeling i trapperom 10. mars - Temperatur(Tid) .....	31
Figur 4-15: Temperaturfordeling i trapperom 14. mars - Temperatur(Tid) .....	32
Figur 4-16: Temperaturfordeling i kjellerstue 10. mars - Høyde(temperatur) .....	33
Figur 4-17: Temperaturfordeling i kjellerstue 10. mars - Temperatur(Tid) .....	33
Figur 4-18: Relativ fuktighet i uteluft og stue vs. utetemperatur .....	34
Figur 4-19: Relativ fuktighet i hovedavtrekk og avrekkstemperatur på bad .....	35
Figur 4-20: Temperaturfordeling i stue 14. mars - Bolig 1 .....	36
Figur 4-21: Temperaturfordeling i stue 14. mars – Bolig 2 .....	36
Figur 4-22: Temperaturfordeling i stue 14. mars - Bolig 3 .....	37
Figur 4-23: Temperaturfordeling i trapp 14. mars - Bolig 1 .....	38
Figur 4-24: Temperaturfordeling i trapp 14. mars - Bolig 2 .....	38
Figur 4-25: Temperaturfordeling i trapp 14. mars - Bolig 3 .....	39
Figur 4-26: Bolig 2, temperaturfordeling soverom 10. mars .....	40
Figur 4-27: Bolig 1(a.) og 3(b.) - Temperaturfordeling i soverom 10. mars .....	40
Figur 4-28: Effektbehov 10. mars .....	42
Figur 4-29: Effektbehov 14. mars .....	43
Figur 4-30: Temperaturvirkningsgrad og lufttemperaturer i aggregat 10. mars .....	44
Figur 4-31: Temperaturvirkningsgrad og lufttemperaturer i aggregat 14. mars .....	44
Figur 5-1: 3D-modell av rekkehus i IDA ICE .....	48

Figur 5-2: Aggregat i IDA.....	49
Figur 5-3: Utetemperaturer i IDA og i målinger .....	52
Figur 5-4: Effektbehov i aggregatet for IDA og målinger .....	52
Figur 5-5: Tilluftstemperaturer i aggregatet 7. mars, regulert som forsøkshus.....	53
Figur 5-6: Temperatur i stue/kjøkken 7.mars, regulert som forsøkshus .....	54
Figur 5-7: Temperatur på soverom 7. mars, regulert som forsøkshus .....	54
Figur 5-8: Temperatur i kjellerstue 7. mars, regulert som forsøkshus .....	55
Figur 5-9: DUT i Trondheim hentet fra IDA ICE.....	56
Figur 5-10: Lufttemperatur ved DUT (a.) kl. 06:00, (b.) 18:00 og (c.) 22:00.....	57
Figur 5-11: Temperaturer i aggregatet for DUT, regulert som forsøkshus .....	58
Figur 5-12: Effekt i aggregat DUT, regulert som forsøkshus .....	58
Figur 5-13: Temperaturkurve for stue DUT, regulert som forsøkshus .....	59
Figur 5-14: Temperaturkurve for stort soverom DUT, regulert som forsøkshus.....	59
Figur 5-15: Tilluftstemperatur for Kiruna og Trondheim DUT.....	60
Figur 5-16: Stuetemperatur for Trondheim og Kiruna DUT.....	61
Figur 5-17: Soveromstemperatur for Trondheim og Kiruna DUT.....	61
Figur 5-18: Sammenligning av tilluftstemperatur DUT.....	63
Figur 5-19: Sammenligning av effektbehov DUT .....	64
Figur 5-20: Sammenligning av stuetemperatur DUT.....	64
Figur 5-21: Sammenligning av soveromstemperatur DUT.....	65
Figur 5-22: Tilluftstemperatur i aggregat for ulike luftmengder [m <sup>3</sup> /h] DUT .....	66
Figur 5-23: Totalt effektbehov for varmebatteriene ved varierende luftmengde [m <sup>3</sup> /h] DUT .....	66
Figur 5-24: Effektbehov i 3 kW varmebatteri med varierende luftmengde [m <sup>3</sup> /h], DUT.....	67
Figur 5-25: Gjennomsnittlig lufttemperatur i stue for ulike luftmengder [m <sup>3</sup> /h], DUT .....	68
Figur 5-26: Gjennomsnittlig lufttemperatur på soverom for ulike luftmengder [m <sup>3</sup> /h], DUT .....	68
Figur 5-27: Effektbehov ved bruk av ovn til dekking av spisslast DUT.....	69

## Tabeller

---

Tabell 1-1: Tilluftstemperaturer for forserte luftmengder (Bernier & Mathisen, 2012).....	4
Tabell 2-1: Ventildimensjoner og andre konstanter .....	5
Tabell 4-1: Fakta – Bolig 1 .....	15
Tabell 4-2: Utdrag fra energikonsept for Miljøbyen Granåsen (Heimdal Bolig AS, 2013) ....	16
Tabell 4-3: Timeplan for regulering av tilluftstemperatur .....	17
Tabell 4-4: Plassering av iButton i bolig 1, 2 og 3.....	19
Tabell 4-5: Laveste utetemperatur i forsøksperioden.....	20
Tabell 4-6: Målt luftmengde: avtrekks- og tilluftsventiler.....	22
Tabell 4-7: Total luftmengde i hver etasje – måling fra ventiler.....	23
Tabell 5-1: Varmetap i distribusjonssystem.....	50
Tabell 5-2: Utvidet driftstid for varmebatterier.....	63
Tabell 5-3: Variasjon av total luftmengde.....	65

## Vedlegg A - Feltarbeid

---

A. 1: Kanaler - 1. etg.....	78
A. 2: Kanaler - 2. etg.....	78
A. 3: Kanaler - 3. etg.....	78
A. 4: Målerplassering - 1. etg.....	79
A. 5: Målerplassering - 2. etg.....	80
A. 6: Målerplassering - kjeller.....	81
A. 7: Målerplassering i aggregat.....	82
A. 8: Installasjon av varmebatteri i forlenging av tilluftskanal.....	83
A. 9: Feltarbeidsrapport.....	84
A. 10 Relativ luftfuktighet og temperatur for uteluft i måleperiode - fra <a href="http://www.eklima.no">www.eklima.no</a> .....	85
A. 11: Relativ luftfuktighet og temperatur for uteluft i måleperiode målt med TinyTag.....	85
A. 12: Bolig 1 - Temperaturer i avtrekk i kald periode.....	86
A. 13: Bolig 2 og 3 - Radiatorbruk i kald periode.....	86
A. 14: Bolig 1/2/3 - Tilluftstemperatur i stue.....	87
A. 15: Bolig 1/2/3 - Maksimale temperaturredifferanser i stue.....	87
A. 16: Bolig 1 - Temperaturfordeling i stue 10. mars - høyde(temperatur).....	88
A. 17: Bolig 1 - Temperaturfordeling i stue 10. mars - temperatur(tid).....	88
A. 18: Bolig 1 - Temperaturfordeling i stue 14. mars - høyde(temperatur).....	89
A. 19: Bolig 1 - Temperaturfordeling i stue 14. mars - temperatur(tid).....	89
A. 20: Bolig 1 – Temperaturfordeling i trapp 10. mars.....	90
A. 21: Bolig 1 – Temperaturfordeling i trapp 10. mars.....	90
A. 22: Bolig 1 - Temperaturfordeling i trapp 14. mars.....	91
A. 23: Bolig 1 - Temperaturfordeling i trapp 14. mars.....	91
A. 24: Bolig 1 - Temperaturfordeling i soverom 10. mars.....	92
A. 25: Bolig 1 - Temperaturfordeling i soverom 10. mars.....	92
A. 26: Bolig 1 - Temperaturfordeling i soverom 14. mars.....	93
A. 27: Bolig 1 - Temperaturfordeling i soverom 14. mars.....	93
A. 28: Bolig 1 - Temperaturfordeling i kjellerstue 10. mars.....	94
A. 29: Bolig 1 - Temperaturfordeling i kjellerstue 10. mars.....	94
A. 30: Bolig 1 - Temperaturfordeling i kjellerstue 14. mars.....	95
A. 31: Bolig 1 - Temperaturfordeling i kjellerstue 14. mars.....	95
A. 32: Bolig 2 - Temperaturfordeling i stue 10. mars - høyde(temperatur).....	96
A. 33: Bolig 2 - Temperaturfordeling i stue 10. mars - temperatur(tid).....	96
A. 34: Bolig 2 - Temperaturfordeling i stue 14. mars - høyde(temperatur).....	97
A. 35: Bolig 2 - Temperaturfordeling i stue 14. mars - temperatur(tid).....	97
A. 36: Bolig 2 - Temperaturfordeling i trapp 10. mars.....	98
A. 37: Bolig 2 - Temperaturfordeling i trapp 10. mars.....	98
A. 38: Bolig 2 - Temperaturfordeling i trapp 14. mars.....	99
A. 39: Bolig 2 - Temperaturfordeling i trapp 14. mars.....	99
A. 40: Bolig 2 - Temperaturfordeling soverom 10. mars.....	100
A. 41: Bolig 2 - Temperaturfordeling soverom 14. mars.....	100
A. 42: Bolig 3 - Temperaturfordeling i stue 10. mars - høyde(temperatur).....	101

A. 43: Bolig 3 - Temperaturfordeling i stue 10. mars - temperatur(tid) .....	101
A. 44: Bolig 3 - Temperaturfordeling i stue 14. mars - høyde(temperatur).....	102
A. 45: Bolig 3 - Temperaturfordeling i stue 14. mars - temperatur(tid) .....	102
A. 46: Bolig 3 - Temperaturfordeling i trapp 10. mars .....	103
A. 47: Bolig 3 - Temperaturfordeling i trapp 10. mars .....	103
A. 48: Bolig 3 - Temperaturfordeling i trapp 14. mars .....	104
A. 49: Bolig 3 - Temperaturfordeling i trapp 14. mars .....	104
A. 50: Bolig 3 - Temperaturfordeling i soverom 10. mars.....	105
A. 51: Bolig 3 - Temperaturfordeling i soverom 14. mars.....	105
A. 52: Bolig 1 og 2 - Temperaturdifferanse i trapp - hele måleperiode.....	106
A. 53: Bolig 1 og 2 - Temperaturdifferanse i trapp - kald periode.....	106

## Vedlegg B – IDA ICE 4.5

---

B. 1: Driftstid belysning og utstyr .....	107
B. 2: Tilstedeværelse bad (Antall personer totalt = 1) .....	107
B. 3: Tilstedeværelse i stue på dagtid (Antall personer totalt = 4).....	107
B. 4: Tilstedeværelse på små soverom (barn) (Antall personer totalt = 1 per rom).....	108
B. 5: Tilstedeværelse på stort soverom (voksen) (Antall personer totalt = 2) .....	108
B. 6: Helårs utetemperatur, Oslo .....	109
B. 7: Gjennomsnittlig lufttemperatur kl. 06:00 .....	109
B. 8: Gjennomsnittlig lufttemperatur kl. 18:00 .....	110
B. 9: Gjennomsnittlig lufttemperatur kl. 22:00 .....	110
B. 10: Effektførlop for Trondheim og Kiruna.....	111
B. 11: Tilluftstemperatur DUT, endret nattsinking .....	111
B. 12: Effekt i aggregat DUT, endret nattsinking.....	112
B. 13: Stuetemperatur DUT, endret nattsinking .....	112
B. 14: Soveromstemperatur DUT, endret nattsinking .....	113
B. 15: Tilluftstemperatur DUT, 55 °C tilluft.....	114
B. 16: Effekt i aggregat 15.01, 55 °C tilluftstemperatur.....	114
B. 17: Stuetemperatur DUT, 55 °C tilluftstemperatur.....	115
B. 18: Soveromstemperatur DUT, 55 °C tilluftstemperatur.....	115
B. 19: Temperaturer i aggregat DUT, utvidet driftstid for varmebatterier.....	116
B. 20: Effekt i aggregat DUT, utvidet driftstid for varmebatterier .....	116
B. 21: Stuetemperatur DUT, utvidet driftstid for varmebatterier.....	117
B. 22: Soveromstemperatur 15.01, utvidet driftstid for varmebatterier .....	117

# Innhold

---

Sammendrag .....	I
Abstract .....	V
Figurer .....	IX
Tabeller.....	X
Vedlegg A - Feltarbeid.....	XI
Vedlegg B – IDA ICE 4.5 .....	XII
Problemstilling og begrunnelse .....	XV
Forskningsmetode og innsamling av data .....	XVI
1. Passivhus og erfaringer med varmluftsoppvarming .....	1
1.1. Hva er et passivhus? .....	1
1.2. Erfaringer med varmluftsoppvarming .....	1
1.2.1. Tyskland .....	1
1.2.2. Danmark .....	2
1.2.3. Norge .....	3
1.2.4. Luftmengder og temperaturbehov i Norge .....	3
2. Teoretiske modeller og anvendelse .....	5
2.1. Tilluftsventiler og plassering .....	5
2.2. Ventilasjonseffektivitet.....	9
2.2.1. Luftskifteeffektivitet.....	9
2.2.2. Ventilasjonseffektivitet.....	10
3. Komfort, energibruk og økonomi.....	11
3.1. Komfort .....	11
3.1.1. Konveksjonsvarme .....	11
3.1.2. Gulvvarme .....	12
3.1.3. Dekking av spisslast .....	12
3.1.4. Innvendige dører.....	13
3.2. Økonomi og energibehov .....	14
4. Målinger i passivhus.....	15
4.1. Planlegging.....	16
4.1.1. Luftbehandling .....	16
4.1.2. Regulering og timeplan .....	16
4.1.3. Settpunkt for temperaturer.....	17
4.1.4. Måleutstyr og plassering.....	17
4.1.5. Måleperiode.....	19

4.1.6.	Ventiler i boligene .....	21
4.1.7.	Korrigerings underveis.....	21
4.1.8.	Brukervaner .....	21
4.2.	Resultater fra måleserie .....	22
4.2.1.	Måling av luftmengde.....	22
4.2.2.	Varmluftsoppvarming av bolig 1.....	24
4.2.3.	Temperaturfordeling i referansehus; bolig 2 og 3 .....	35
4.2.4.	Effekt og energibehov .....	41
4.3.	Analyse av resultater og feilkilder.....	45
4.3.1.	Feilkilder .....	45
4.3.2.	Analyse.....	46
5.	Simulering i IDA ICE 4.5.....	48
5.1.	Om IDA ICE 4.5 .....	48
5.2.	Input-verdier og forenklinger .....	49
5.2.1.	Bygningskropp og energibruk .....	49
5.2.2.	Aggregat og styring .....	49
5.2.3.	Internlast og varmetap .....	50
5.2.4.	Gulvvarme .....	50
5.2.5.	Trapperom .....	50
5.2.6.	Implementering av vedovn .....	51
5.3.	Resultater.....	51
5.3.1.	Regulert som forsøkshus – Simulert for 7. mars i Oslo.....	51
5.3.2.	Dimensjonerende utetemperatur - vinter .....	56
5.4.	Analyse av resultater og feilkilder.....	70
5.4.1.	Feilkilder .....	70
5.4.2.	Analyse.....	70
6.	Konklusjon .....	72
7.	Forslag til videreføring av arbeidet .....	74
	Terminologi.....	75
	Kilder.....	76
	Vedlegg A .....	78
	Vedlegg B.....	107

## Problemstilling og begrunnelse

---

Moderne boliger som bygges etter passivhus- eller lavenergistandard vil i stor grad dekke romoppvarmingsbehovet med varmetilskudd fra internlaster og sol. Men i perioder med lavt varmetilskudd og utetemperatur vil det være nødvendig med et varmesystem. Ofte har varmedistribusjonssystemer beregnet på utnyttelse av fornybar energi en høy investeringskostnad. Med et lavt effektbehov og kort brukstid vil installasjonskostnaden bli stor i forhold til utnyttelsen. Det er derfor interessant å se på muligheten til å benytte et allerede nødvendig ventilasjonsanlegg for oppvarming av hele boligen.

*Med en økt mengde passivhus-boliger under bygging i Norge, øker behovet for kunnskap om oppvarmingsløsninger som egner seg for norsk klima. Er det gunstig med tanke på økonomi, inneklima og komfort å varme opp boliger med kun ventilasjonsluft slik det gjøres i andre land?*

Målet med denne rapporten er altså å undersøke hvordan egnetheten til varmluftsoppvarming er i det norske klimaet og med norske brukervaner. Det eksisterer lite informasjon om dette temaet i dag. Bakgrunnen for masteroppgaven er litteraturstudiet fra et fordypningsprosjekt ved NTNU høsten 2012. Teori som er gjennomgått i prosjektoppgaven skal benyttes til forberedelse og gjennomføring av fullskalamålinger i et rekkehus i Trondheim med passivhusstandard. Relevante måleparametre er luftmengde, utetemperatur, temperaturer i ulike romhøyder og temperaturer i aggregat og ventiler. Det vil samtidig utføres målinger i to referanserekkehus, disse vil driftes som normalt og uten varmluftsoppvarming.

Målingene fra passivhuset vil gi informasjon om varmluftsoppvarmingens betydning for temperaturgradienter i rom og mellom etasjer. De skal også gi kunnskap om nødvendig installert oppvarmingseffekt og optimalisering av reguleringsmetode for norske klimaforhold og brukervaner. Det forventes at det vil bli generelt høyere temperaturgradienter i forsøkshuset enn i referansehusene grunnet oppdriftskreftenes motvirkende effekt på omrøringsventilasjon. Spørsmålet er om forskjellene er store nok til at det skjer en vesentlig forverring av komforten ved bruk av varmluftsoppvarming.

Rekkehuset med varmluftsoppvarming skal også simuleres i energi- og inneklimaprogrammet IDA ICE 4.5 for ulike klimaforhold og styringsstrategier. Datamaterialet fra simuleringene kan være omfattende og det vil fokuseres på gjennomsnittstemperaturer i soner og effektforbruk i aggregat. Simuleringene vil være nyttige for å teste varmluftsoppvarming under dimensjonerende forhold, både med tanke på innstillinger i anlegget men også geografisk plassering av bolig. Det er ikke valgt å fokusere på nøyaktige tall på energibruk ved varmluftsoppvarming, det er i stedet fokusert på nødvendig installert effekt for dimensjonerende utetemperatur og med varierende reguleringsstrategi.

## Forskningsmetode og innsamling av data

---

For den teoretiske gjennomgangen av temaet varmluftsoppvarming er det benyttet et tidligere utført litteraturstudium fra eget fordypningsprosjekt høsten 2012. Her inngår publiserte forskningsrapporter på internett om sentrale tema, både norske og utenlandske, i tillegg til bruk av bøker om generelle strømnings tekniske og ventilasjonstekniske emner.

For innhenting av data er det selv gjort fullskala målinger i bebodd passivhus hvor varmluftsoppvarming er installert. Observasjoner fra beboere er innhentet muntlig og via e-mail. Andre observasjoner er hentet fra meteorologisk institutts nettsider.

For simuleringene er informasjon om boligen hentet fra byggherre og andre involverte parter og en egen modell av bygningen er bygget opp i programvaren IDA ICE 4.5. Modellen sammenlignes med forsøkshuset ved å benytte lignende klimadata som for måleperioden. Deretter simuleres det for dimensjonerende utetemperatur og det prøves ut ulike endringer i styringsstrategi.



# 1. Passivhus og erfaringer med varmluftsoppvarming

---

## 1.1. Hva er et passivhus?

Passivhus er energieffektive bygg med et minimalt varmetap til omgivelsene. Konseptet ble opprinnelig lansert av det tyske Passivhusintitutet på 80-tallet. Energibesparelse oppnås med passive tiltak som isolert og tett bygningskropp, minimering av kuldebroer, vinduer med lav U-verdi, varmegjenvinning mellom avtrekk og tilluft og passiv utnyttelse av solinnskudd. Målet er at romoppvarmingen skal dekket så mye som mulig av internlaste fra bl.a. mennesker, teknisk utstyr og solinnskudd. Tanken bak det tyske passivhuskonseptet var at bygningskroppen bygges slik at varmetapet minimeres og resterende oppvarmingsbehov kan dekket av ventilasjonsluften.

I Norge er interessen for passivhus økende, både fra byggherrer, prosjekterende og utførende parter (SINTEF AS, 2013). Passivhuskonseptet er tilpasset norske klimaforhold ved utformingen av to norske standarder for passivhus og lavenergihus; NS 3700:2010 for bolig og NS:3701:2012 for yrkesbygg. Disse standardene åpner for bruk av andre oppvarmingsmuligheter enn ventilasjonsluft. Det er ønskelig å undersøke om varmluftsoppvarming alene likevel er en egnet løsning for norsk klima. Det eksisterer veldig lite forskning på dette emnet i dag.

De to norske standardene gjelder for tre ulike nivåer av energieffektive bygg; lav-energi klasse 1, lav-energi klasse 2 og passivhus. Det er foreløpig mest interessant å se på varmluftsoppvarming i passivhus, da dette har det laveste oppvarmingsbehovet og vil være mest egnet for denne løsningen i Norge.

Minimeringen av energibehov til romoppvarming gjør at utbredte oppvarmingsløsninger som elektrisk/vannbåren gulvvarme og radiator kan revurderes. Ved varmluftsoppvarming benytter man et allerede påkrevd ventilasjonsanlegg i passivhus, for distribusjon av varme i boligen. Denne løsningen kan senke investerings-, installasjons- og vedlikeholdskostnader for det totale varmeanlegget.

## 1.2. Erfaringer med varmluftsoppvarming

Tidligere ble varmluftsoppvarming benyttet i sentralvarmeanlegg for oppvarming av bygninger med et vesentlig høyere oppvarmingsbehov enn passivhus. Konsekvensen var at luften måtte ha en så høy temperatur at det kunne oppleves ubehagelig av bruker. Prinsippet luftvarme benyttes også i dag for bl.a. varmepumper. Luftvarme har lenge vært ansett som ugunstig med tanke på bl.a. luftveisplager (Bakke, 4/2007). Helseperspektivet skal undersøkes senere i rapporten (kapittel 3.1.1).

### 1.2.1. Tyskland

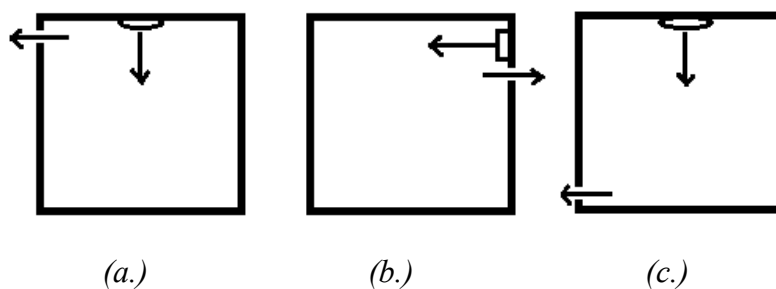
Det tyske Passivhusinstituttet har lagt frem en rapport som omhandler nettopp varmluftsoppvarming i 221 passivhus oppført i 5 ulike europeiske land (Feist, et al., 2005).

Norge er ikke et av disse landene. Omtrent alle husene benyttet varmluftsoppvarming og konklusjonen er at løsningen fungerer. Man oppnår tilstrekkelig varmeleveranse fra varmluften og man opprettholder samtidig den nødvendige luftmengden. Varmeoverføring gjennom vegger, dører og ventilasjonskanaler sørger for en jevn temperatur i hele boligen. Dersom man ønsker enkelte kjøligere rom, som f.eks. soverom, må man være strategisk i plassering av kanaler og ekstra isolasjon. Luften tilføres i et tradisjonelt kaskade-system med tilluft i oppholdsrom og avtrekk på bad og kjøkken, i tillegg til overstrømning i spalter over/under dør. Tilluftsventilen bør ha lengst mulig kastelengde for å unngå trekk ved undertemperert tilluft og bør plasseres ved tak. Maksimal tilluftstemperatur som benyttes er 40 °C. I rapporten opplyses det om at tilluftstemperaturen bør holdes under 55 °C for å forhindre sviing av støv. I Tyskland produseres det allerede kompakte ventilasjons- og oppvarmingsenheter for eneboliger og leiligheter med passivhusstandard. Enheten består av et ventilasjonsaggregat med innebygd varmepumpe for varmeoverføring fra avtrekk til tilluft og/eller varmtvannstank.

### 1.2.2. Danmark

Danmarks Tekniske Universitet har gjennomført et forsøk på kartlegging av strømningsbildet i et rom som varmes opp av ventilasjonsluft (Krajcik, et al., 2012). Forsøksrommet ble bygget inne i en hall og man varierte ventilplasseringer, utetemperatur, internlast og luftskifte. En dukke med realistisk overflatetemperatur og varmeovergangskoeffisient for hver kroppsdel ble plassert i rommet. Det ble gjort undersøkelser av ventilasjons-, luftskifte- og temperatureffektivitet ved kunstig, fullstendig omrøring vha. vifter. Det ble undersøkt tre ulike plasseringer av tilluft og avtrekk (Figur 1-1):

- Rund tilluftsterminal sentrert i tak og avtrekk i hjørnet av taket.
- Rektangulær og perforert tilluftsterminal høyt på vegg og avtrekk like under tilluft.
- Rund tilluftsterminal sentrert i tak og avtrekk lavt på vegg.



Figur 1-1: Tillufts og avtreksplassering.

Det viste seg at løsning C hadde den beste ventilasjonseffektiviteten. Løsning A hadde den dårligste ventilasjonseffektiviteten og får en grad av kortslutningsventilasjon. Rapporten påpeker at ved lave tilluftsmengder vil oppdriftskreftene være dominerende med tanke på luftstrømmer i rommet og ventilasjonseffektiviteten. Oppdriftskreftene vil få mindre betydning for strømningsbildet i rommet ved høyere tilluftsmengder. Det så man da

luftmengden ble justert opp og løsning B og C gikk ned i luftskifteeffektivitet, mens løsning A fikk økt luftskifteeffektivitet.

Temperatureffektiviteten var høyest for løsning C på grunn av den lave plasseringen av avtrekket som igjen førte til at temperaturen i avtrekket ved gulvet var omtrent lik temperaturen i oppholdssonen. Ved økende varmebehov økte den vertikale temperaturdifferansen i rommet. Maksimal temperaturdifferanse mellom 1.7 meter og 0.1 meter for alle alternativene var 0.8 °C. For komfort anbefales en maksimal temperaturdifferanse på 3 °C mellom 1.1 og 0.1 meter (Sørensen, 1996). Alle 3 alternativer oppfyller altså anbefalingen i stor grad. Det ble ikke registrert store vertikale temperaturdifferanser eller betydelig fare for trekk ved noen av løsningene. Det er likevel viktig å merke seg at maksimal temperaturdifferanse mellom tilluft og romluft var kun 10 K i dette forsøket og at den kunstige omrøringen kunne føre til unaturlige termiske forhold.

### 1.2.3. Norge

Sintef har utarbeidet en rapport om inneklimate i ulike passivhus oppført i bl.a. Sverige, Tyskland og Østerrike (Thomsen & Berge, 2012). I rapporten undersøkes beboernes opplevelse av inneklimate i boligen og hvilke faktorer som påvirker inneklimate, som materialer, energibruk, ventilasjon og oppvarming. Alle boligene benytter varmluftsoppvarming via ventilasjon. Tilbakemeldingen fra beboerne var at varmen ikke fordelte seg godt nok i nedre del av rommet og ikke ble distribuert godt nok til enkelte rom. Tilstedeværelse av personer var en viktig forutsetning for å opprettholde komforten i mange tilfeller. Det kunne ta opptil en halv dag å varme opp et hus dersom det ikke hadde vært i bruk på noen dager. Det påpekes i rapporten at dette er noe som kan løses med bedre regulering. Brukere må tilvennes et "usynlig" varmesystem da flere brukere var engstelige for at det ikke fantes noen form for ovn i tillegg til ventilasjonen.

### 1.2.4. Luftmengder og temperaturbehov i Norge

Nødvendig luftmengde beregnes ut fra hva som er dimensjonerende faktor; fjerning av varmeoverskudd, fjerning av forurensning, fjerne fukt, balansering av et bestemt avtrekksbehov eller tilføre varme. Passivhus krever et balansert ventilasjonssystem på grunn av den lave naturlige infiltrasjonen på maksimum 0,6 h<sup>-1</sup>. Minimum tilførte luftmengde i eneboliger og rekkehus er 1,2 m<sup>3</sup>/h per m<sup>2</sup> gulv (NS 3700, 2010).

I en rapport fra SINTEF Energi AS (Berner & Mathisen, 2012) kommer det frem at det er behovet for varmetilførsel som er dimensjonerende faktor for luftmengde i enebolig ved dimensjonerende utetemperatur. I simuleringen utført av Sintef ble det valgt en enebolig av Mesterhus-modellen «Karita». Begrunnelsen er at det er en populær enebolig på markedet i dag og at den dermed representerer en planløsning som er felles for mange nye eneboliger. «Karita har gulvareal lik 165 m<sup>2</sup> og volum lik 398 m<sup>3</sup>. Minimum tilførte luftmengde for «Karita» er 238 m<sup>3</sup>/h, dvs. et luftskifte på 0,6 h<sup>-1</sup>. Simuleringene ble utført med forskjellig luftskifte, opptil 1,3 h<sup>-1</sup> luftskifte (500 m<sup>3</sup>/h total tilluftsmengde). Det ble også simulert med 50 og 100 dager effekt-begrensning for ventilasjonsvarmen, dvs. at i 50 eller 100 dager godtas det at effektbehovet overstiger aggregatets maksimale effekt og spisslasten kan dekkes av

f.eks. en panelovn eller en vedovn. Det ble simulert med klimadata for Stavanger, Oslo, Røros og Karasjok med og uten tilpasning til Karasjok-klima.

Ved lavt luftskifte og ingen effekttak på ventilasjonsaggregatet, ble nødvendig lufttemperatur høy, mellom 75 og 108 °C. Hvis huset i Karasjok derimot forbedres ytterligere for å tilpasses klima i Karasjok, klarer man å senke tilluftstemperaturen til 98 °C. Dersom man setter et effekttak på 50 og 100 timer vil man klare å senke tilluftstemperaturen for ekte passivhus i Karasjok til 70 og 65 °C. Gjør man det samme for Stavanger-klima klarer man å få tilluftstemperaturen helt ned på 43 °C og for Oslo 54 °C. Det er altså fremdeles behov for høye tilluftstemperaturer i store deler av landet ved 0,6 h<sup>-1</sup> luftskifte.

Dermed ble det aktuelt å se på periodevis forserte luftmengder på opptil 500 m<sup>2</sup>/h. Resultatet for Karasjok, med klimatilpasninger, ses i Tabell 1-1. Laveste mulige tilluftstemperatur for Stavanger i tilsvarende simulering ble 31 °C.

Tabell 1-1: Tilluftstemperaturer for forserte luftmengder (Berner & Mathisen, 2012)

Luftmengde	Luftskifte	Dim. Utetemp	Års-sim	n-50	n-100
198	0,5	114,6	98,5	80,6	74,4
239	0,6	98,3	85,0	70,1	64,9
250	0,6	94,7	82,0	67,8	62,9
300	0,8	82,1	71,5	59,7	55,6
350	0,9	73,1	64,0	53,9	50,3
400	1,0	66,3	58,4	49,5	46,4
450	1,1	61,1	54,0	46,1	43,4
500	1,3	56,9	50,5	43,4	40,9

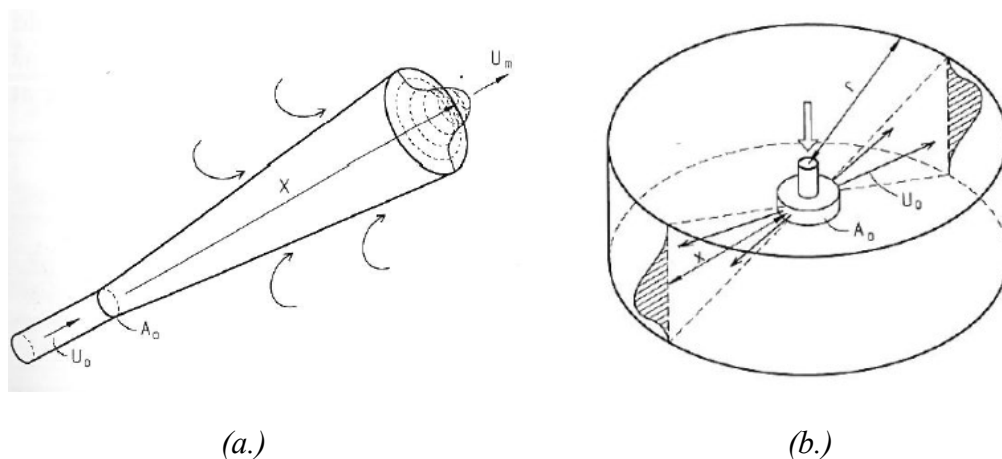
Senere i rapporten skal tilsvarende undersøkelser av forsert luftmengde gjøres for et rekkehus med passivhusstandard i Trondheim (kapittel 5).

## 2. Teoretiske modeller og anvendelse

### 2.1. Tilluftsventiler og plassering

Erfaringene som er gjennomgått i kapittel 1.2 viser at optimal ventilplassering ved overtemperert tilluft er ved tak for tilluft og ved gulv for avtrekk. Som nevnt i forsøket ved DTU (avsnitt 1.2.2) ble det ikke målt trekkrisiko for overtemperert tilluft i den vertikale strålen. Men man bør unngå å rette tilluften direkte mot oppholdssonen da dette kan gi en trekkfølelse når det blir behov for undertemperert tilluft og/eller forsering av luftmengder.

I prosjektoppgaven ble det gjennomgått aktuelle teoretiske modeller og det ble gjort utregninger for tilluftstrålens oppførsel basert på relevante verdier for temperatur og luftmengde i en enebolig i Norge. *Radielle* og *aksielle* stråler ble undersøkt nærmere (Figur 2-1), siden ventiler for boligventilasjon ofte har denne utformingen.



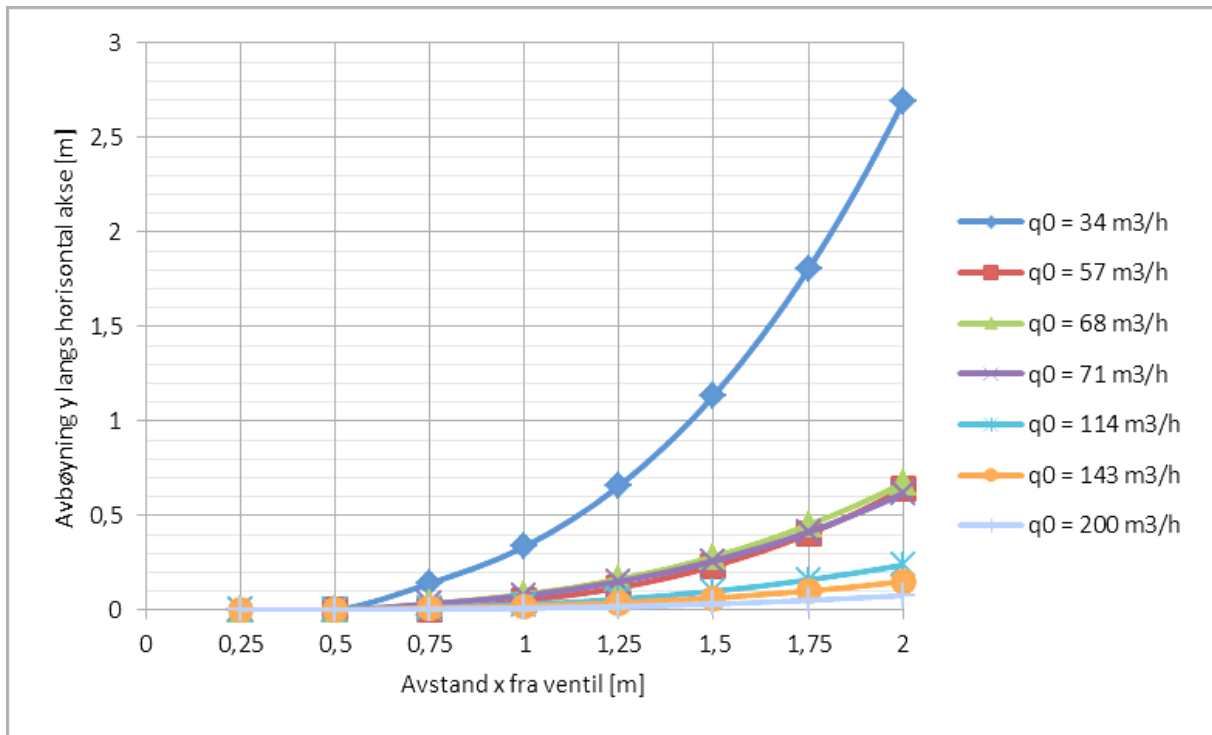
Figur 2-1: Illustrasjon av luftstrålene (a.) aksiell stråle og (b.) radiell stråle (Skåret, 2000)

Ved overtemperert lufttilførsel er det en risiko for stagnering av varmluft ved tak, grunnet oppdriftskrefter. Formler og konstanter for utregning er hentet fra Eimund Skårets "Ventilasjonsteknisk håndbok" (Skåret, 2000). Dimensjoner for ventiler ble estimert etter samtale med veileder og sammenligning med vanlige ventiler for boligventilasjon (Tabell 2-1).

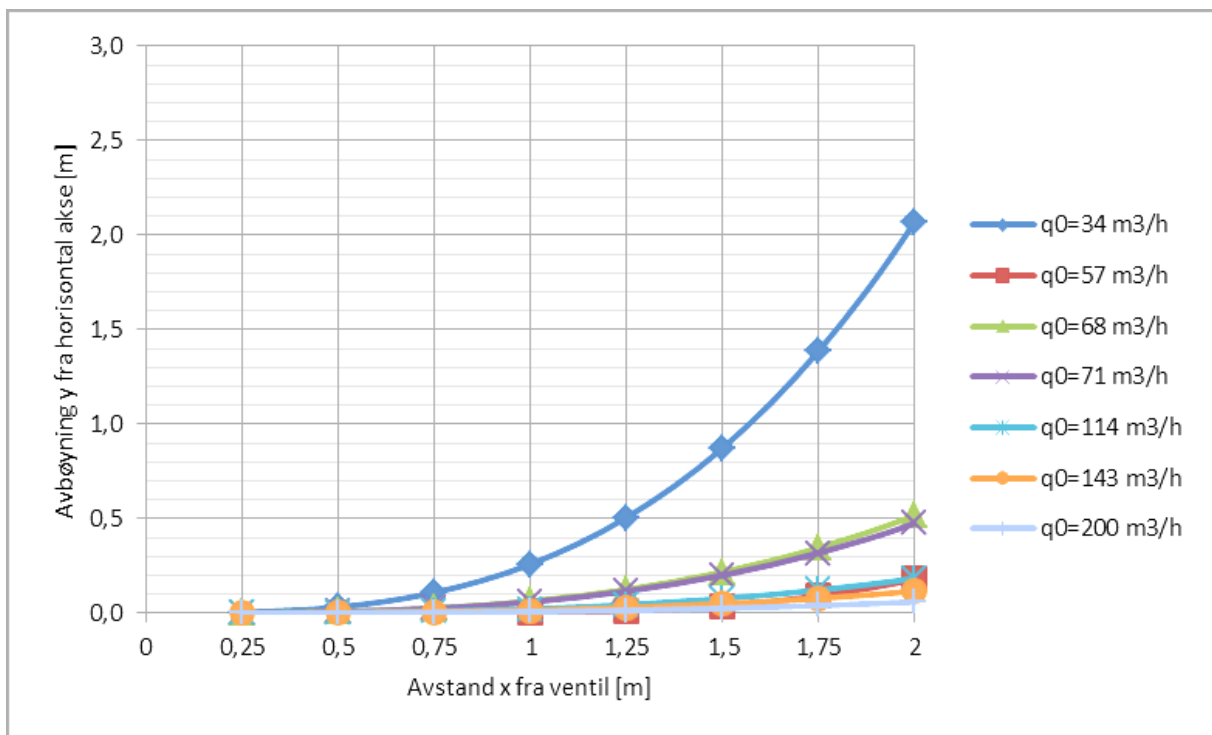
Tabell 2-1: Ventildimensjoner og andre konstanter

Konstant	Aksiell	Radiell
Diameter [d]	10 cm	16 cm
Høyde spalte [h]	-	0,5 cm
Utløpsareal [A]	78,5 cm <sup>2</sup>	25,1 cm <sup>2</sup>
Kontraksjonskoeffisient [ε]	1	1
Impulsfaktor [i]	1	1
Blandingsfaktor [C <sub>b</sub> ]	0,235	0,235
Empirisk bestemt konstant [K]	6,5	1,04

Temperaturdifferansen mellom strålen og gjennomsnittlig romtemperatur ble satt til 20 °C. Resultatet for utregnet avbøyning i aksial fri stråle og radiell fri stråle, når det ikke tas hensyn til klebeffekten, kan ses i Figur 2-2 og Figur 2-3. Avbøyningen mot tak øker raskt for denne temperaturdifferansen og det er hurtigst stigning for den aksielle strålen.

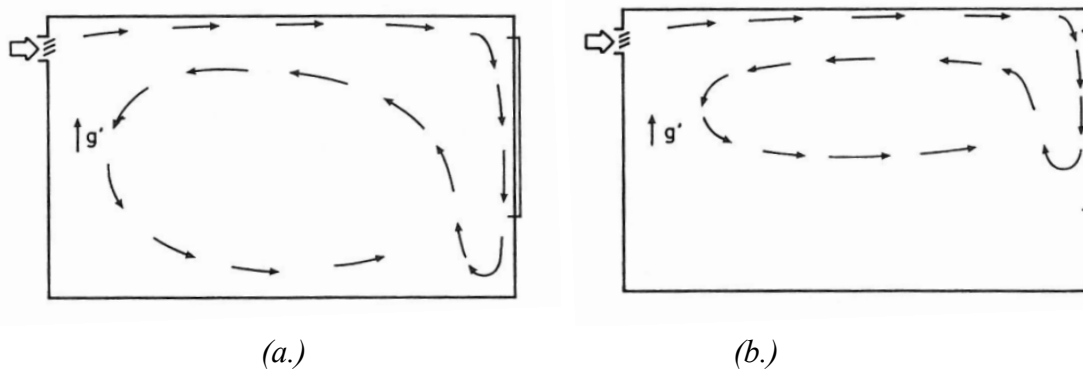


Figur 2-2: Avbøyning fra horisontalaksen for rund, fri stråle



Figur 2-3: Avbøyning fra horisontalaksen for radiell, fri stråle

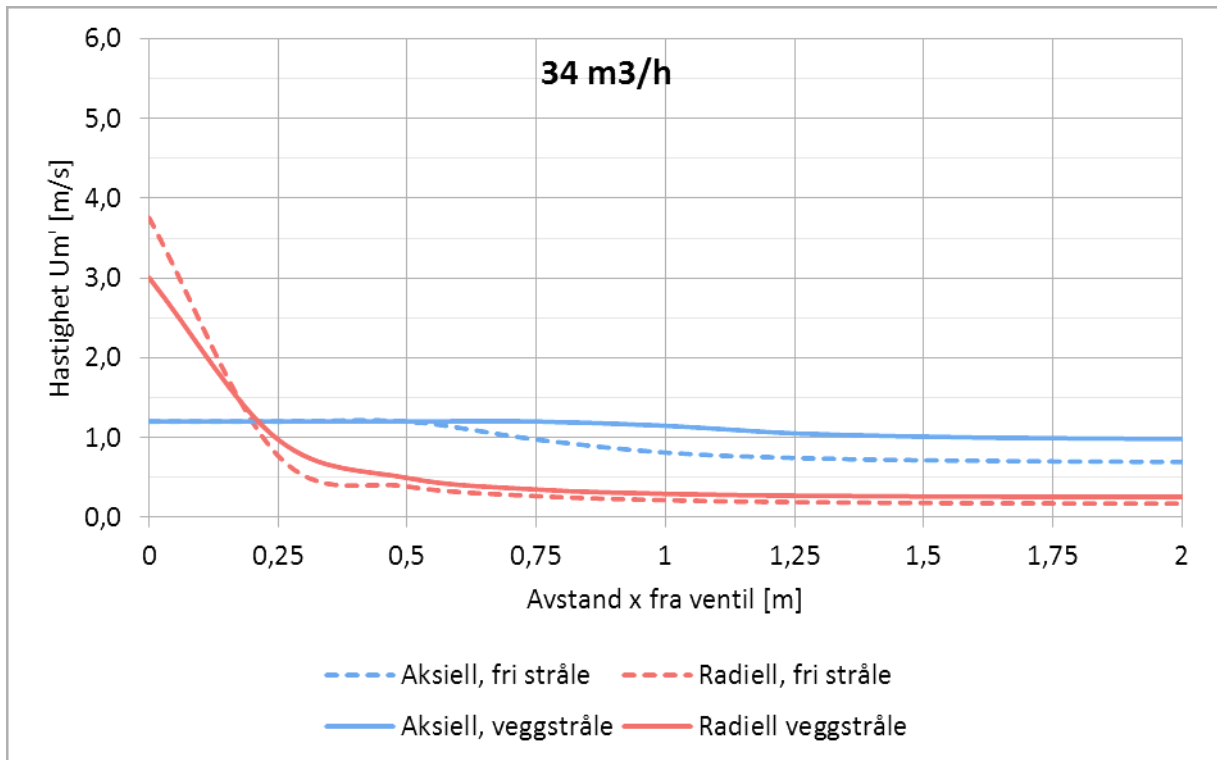
En del av forklaringen for krumningen av overtemperert luftstråle ligger i *Arkimedestallet* [ $Ar$ ]. Tallet er en viktig størrelse for luftstråler ved ikke-isoterme forhold, når det finnes temperaturforskjeller mellom luftstrømninger. Arkimedestallet er definert som forholdet mellom oppdriftskrefter og treghetskrefter. For en luftstråle vil oppdriftskreftenes betydning i forhold til treghetskreftene øke med avstanden  $x$ , altså vil Arkimedestallet [ $Ar$ ] øke med  $x$ . En overtemperert luftstråle vil få en krumning mot tak og bremses ned. Det er denne krumningen som fører til at det ofte oppstår en varm luftpute under taket. I figuren under ser man konsekvensen av å øke Arkimedestallet for tilluften, det vil si øke temperaturen eller senke hastigheten for tilluften i utløpet. For tilførsel av varmluft ønsker man altså å øke hastigheten og dette skjer ved å utnytte *klebeffekten* mot taket.



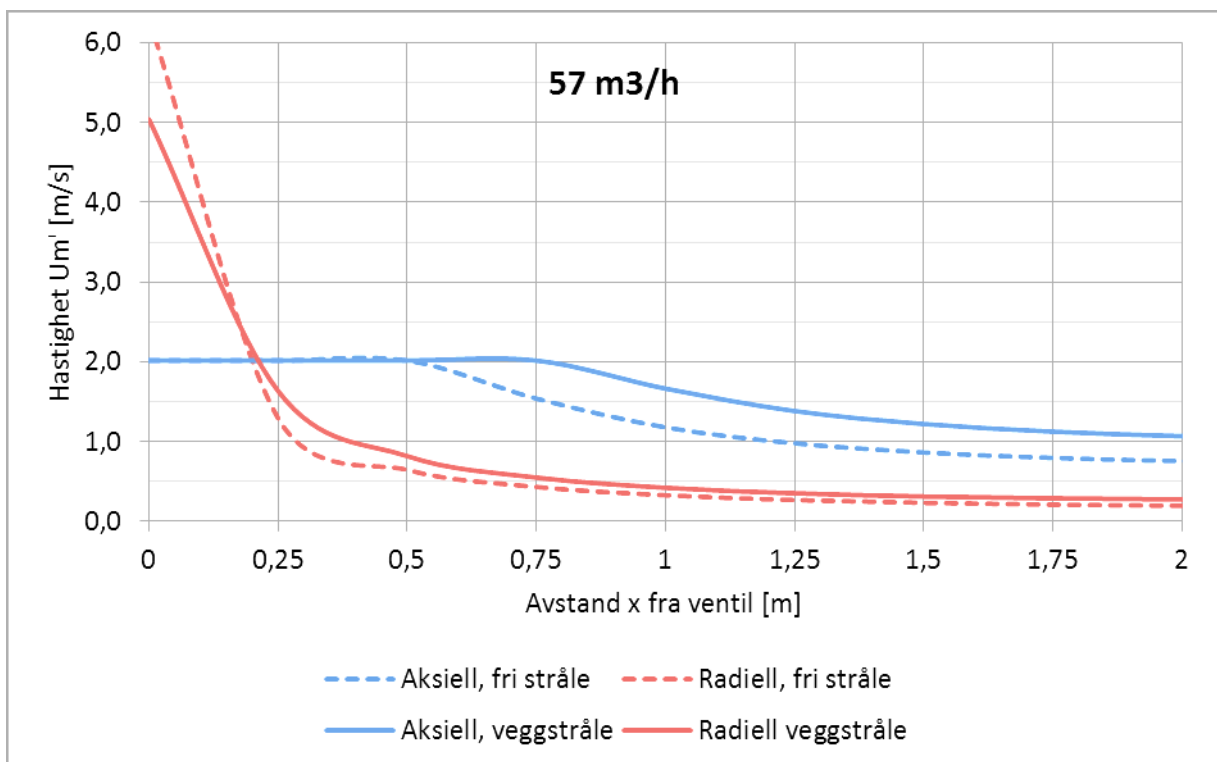
Figur 2-4: Luftstrømning ved (a.) lavt Arkimedestall og (b.) høyt Arkimedestall i tilluft (Etheridge & Sandberg, 1996)

Resultatene av utregninger for *veggstråler* ga hastighet, temperatur og luftmengde i strålen. Utgangshastigheten i den radielle strålen er høyere enn for den aksielle grunnet mindre utløpsareal i den radielle ventilen (Figur 2-5). Legg merke til at den radielle strålens hastighet minker raskere enn for den aksielle strålen, og at den aksielle strålen beholder hastigheten over lengre tid.

Senere i oppgaven får man se at en radiell tilluftsventil benyttes i forsøkshuset (avsnitt 4.1.6). Denne har mulighet for begrensning på rekkevidden og da blir utløpsarealet enda mindre og hastigheten større.



Figur 2-5: Hastighet i stråle for utløpshastighet lik 34 m<sup>3</sup>/h



Figur 2-6: Hastighet i stråle for utløpshastighet lik 57 m<sup>3</sup>/h



## 2.2. Ventilasjonseffektivitet

Man benytter ofte ordet *ventilasjonseffektivitet* som et samlingsbegrep for to forskjellige effektiviteter. Ventilasjonseffektivitet i ordets rette forstand er evne til å fjerne forurensninger. En annen måte å måle effektivitet på er å benytte *luftskifteeffektivitet*, som er et mål på anleggets evne til å skifte ut luften i rommet (Skåret, 2000).

### 2.2.1. Luftskifteeffektivitet

Når man skal regne på luftskifteeffektiviteten tar man i bruk begrepet *luftalder*, altså hvor lenge luften har vært i rommet. Teorien bak luftskifteeffektivitet er at jo lenger luften er i rommet, desto mer forurensninger klarer den å plukke opp. Man er ikke kjent med typen forurensning eller hvor utslippet er lokalisert. For å måle luftens alder benytter man en *nominell tidskonstant* som er alderen på luften i avtrekket (2-1).

$$\tau_n^a = \frac{V_r}{Q} = \frac{1}{n} \quad 2-1$$

$V_r$  = romvolum [ $m^3$ ]

$Q$  = tilluftsmengde [ $m^3/h$ ]

$N$  = luftskifte [ $h^{-1}$ ]

Luftskifteeffektiviteten er forholdet mellom minimum luftskifte og virkelig gjennomsnittlig luftskifte i hele rommet (2-2). Effektiviteten avhenger av strømningsbildet i rommet og ligger mellom 0 og 1.

$$\varepsilon^a = \frac{\tau_n^a}{2 \cdot \langle \bar{\tau} \rangle} \quad 2-2$$

$\langle \bar{\tau} \rangle$  = Gjennomsnittlig alder på hele romluften

Dersom man ønsker å finne luftskifteeffektiviteten i et spesielt punkt i rommet, benytter man følgende formel (likning 2-3);

$$\varepsilon_p^a = \frac{\tau_n^a}{\bar{\tau}_p} \quad 2-3$$

$\bar{\tau}_p$  = Alder på lufta i et punkt i rommet

### 2.2.2. Ventilasjonseffektivitet

Ventilasjonseffektiviteten er altså anleggets evne til å fjerne forurensninger og benyttes når man kjenner til forurensningskilden og den er målbar. Effektiviteten er gitt som forholdet mellom konsentrasjonen av forurensninger i avtrekk og gjennomsnittlig konsentrasjon i rommet (likning 2-4).

$$\varepsilon^c = \frac{C_e}{\bar{C}} \quad 2-4$$

$C_e$  = Konsentrasjonen av forurensning i avtrekksluften

$\bar{C}$  = Gjennomsnittlig forurensningskonsentrasjon i hele rommet

Dersom man ønsker å måle effektiviteten i et spesielt punkt, erstatter man gjennomsnittskonsentrasjonen med punktkonsentrasjonen (likning 2-5).

$$\varepsilon_p^c = \frac{C_e}{C_p} \quad 2-5$$

$C_p$  = Konsentrasjon i punkt i rommet

Som nevnt tidligere (kapittel 2.1) er faren stor for at den varme tilluften legger seg i en pute oppe ved taket, på grunn av oppdriftskrefter. Dersom avtrekket sitter ved tak, vil gjennomsnittlig konsentrasjon av forurensninger i rommet bli større enn konsentrasjonen i avtrekket og man får en lav ventilasjonseffektivitet. Men dersom man oppnår omrøring og avtrekket sitter ved gulvet, vil konsentrasjonen i avtrekket være omtrent lik gjennomsnittet i rommet, og ventilasjonseffektiviteten nærmer seg 1. Det er dette man ønsker å oppnå med varmluftsoppvarming.

Måling av ventilasjonseffektivitet utføres med såkalte *sporgassmålinger* hvor man benytter en allerede eksisterende forurensning, som CO<sub>2</sub> eller man tilsetter en gass, som freon eller nitrogendioksid i rommet. Forurensningene i rommet overvåkes over tid.

## 3. Komfort, energibruk og økonomi

---

Varmeluftsoppvarming har vært ansett som en løsning som gir dårlig termisk og atmosfærisk inneklima. Spørsmålet er hva det er med varmluftsoppvarming som skal gi denne bivirkningen og om denne vil bedres når romoppvarmingsbehovet senkes til passivhusnivå.

Det er gjort en kostnadsanalyse av varmluftsoppvarming (avsnitt 3.2), hvor ulike faktorer som har betydning er diskutert, uten at man presenterer konkrete tall.

### 3.1. Komfort

#### 3.1.1. Konveksjonsvarme

Når luft varmes opp skjer det vha. konveksjon og luftas entalpi øker. Konveksjonsvarme benyttes bl.a. i luft-luft varmepumper, elektriske panelovner og vifteovner. Konveksjon skjer også ved radiatorer, vedovner og gulvarme, men da avgis også store deler av varmen som strålevarme. Elektriske panelovner har lenge vært svært populært i Norge og har fått kritikk for sin uheldige virkning på inneklimaet (Bakke, 4/2007). Når lufta kommer i kontakt med de varme overflatene i ovnen, kan forurensninger og støv i lufta forbrennes og svies for deretter å spaltes til ultrafine partikler, såkalt pyrolyse. Disse partiklene kan virke irriterende på astmatikere og allergikere.

Overlege i Arbeidstilsynet, Jan Vilhelm Bakke, har publisert en artikkel om effekten av ulike oppvarmingsmetoder på inneklima og helse (Bakke, 4/2007). Studier viser at en senkning av innetemperaturen fra 23 til 21 °C vil forbedre luftkvaliteten like mye som en dobling av luftmengden vil gjøre. Dette vil si å senke luftas entalpi. Den operative temperaturen, det vil si temperaturen mennesker opplever i rommet, er avhengig av to ulike parametre; lufttemperaturen og middelstrålingstemperaturen. Operativ temperatur er et gjennomsnitt av disse og det er denne som optimalt skal være mellom 20 og 23 °C (NS-EN 15251, 2007). Middelstråletemperaturen blir påvirket av strålevarme fra alle flater i rommet. Gulvvarme og enkelte radiatorer avgir store deler av varmen som strålevarme. Så dersom man senker lufttemperaturen, må man også øke middelstråletemperaturen for å oppnå ønsket operativ temperatur.

I 1999 i Storbritannia ble det gjennomført en undersøkelse av sammenhengen mellom allergi hos barn og varmluftsoppvarming (Jones, et al., 1999). Det var totalt 200 barn mellom 4 og 16 år med i undersøkelsen, halvparten var atopiske og halvparten ikke-atopiske. Det viste seg at 8 av 9 av barn som levde i hus med varmluftsoppvarming, hadde astma og/eller allergi. Likevel konkluderer ikke rapporten med at varmluftsoppvarming er årsaken. Argumentene er at antall forsøkspersoner er for få og at andre årsaker ikke er kartlagt. Men dersom varmluftsoppvarming var årsaken, må man også være oppmerksom på at husene i undersøkelsen ikke er energieffektive moderne hus. De hadde et høyere energibehov enn man har i moderne bygg i dag og de behøvde trolig en høy tilluftstemperatur på varmluften. Det kan også ha oppstått pyrolyse ved varmeelementet i anlegget som ble spredt i romluften. I

tillegg er det ikke opplyst om det noen ganger benyttes omluft i stedet for ren friskluft for å spare energi ved høyt oppvarmingsbehov. Dette vil ha betydning for luftkvaliteten,

Om utfordringene er til stede i moderne anlegg, er usikkert. J. Bakke påpeker at det ikke finnes tilstrekkelig forskning på konkrete sammenhenger mellom konveksjonsvarme og astma/allergi, men at det finnes forskning som kobler sammen luftas entalpinivå og opplevelsen av «tørighet».

### 3.1.2. Gulvvarme

Senere i rapporten skal et passivhus med elektrisk gulvvarme på bad/WC og i inngang fungere som forsøkshus for innstallering av varmluftsoppvarming (kapittel 4). Gulvvarmen vil være i drift under målingene etter ønske fra beboer. Denne løsningen vil være realistisk for boliger i Norge siden gulvvarme regnes som komfortvarme i dag og mange vil velge gulvvarme i badrom på tross av høye installasjonskostnader. Vannbåren gulvvarme har en større treghet i reguleringen enn f.eks. vannbåren radiator eller luftvarme og man kan lettere oppleve overoppheting ved bruk i passivhus. Derfor benyttes gulvvarme stort sett bare på badrom i passivhus.

### 3.1.3. Dekking av spisslast

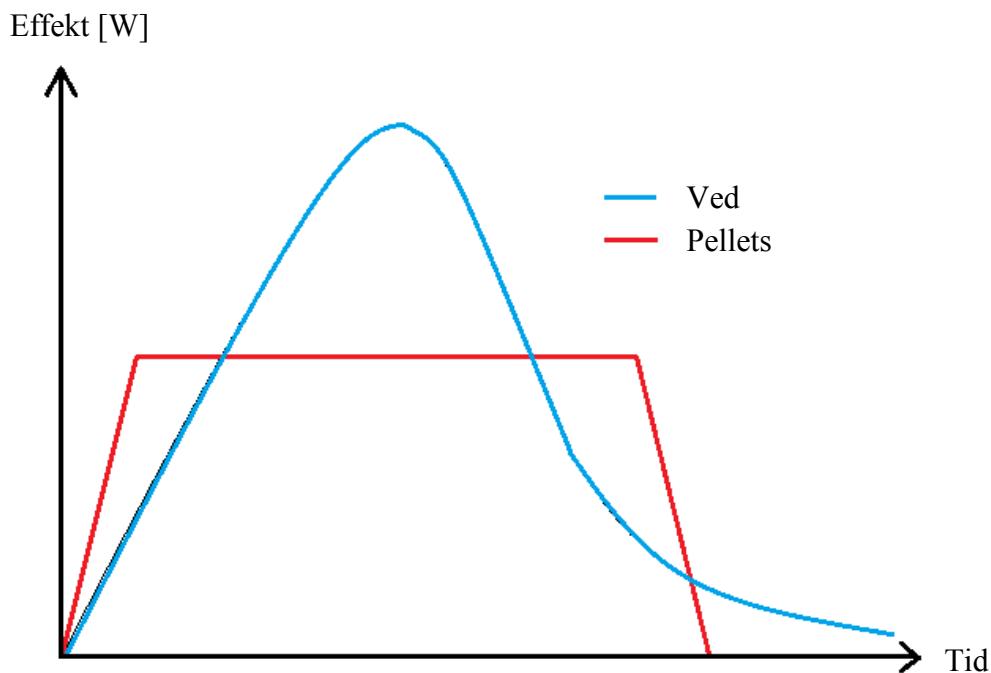
På grunn av at dimensjonerende utetemperatur vanligvis inntreffer i en veldig kort periode er det naturlig å se på muligheten til å installere en vedovn som dekker spisslasten de få dagene i året det er behov for ytterligere oppvarming enn det varmluften kan levere. Man kan oppnå en lavere installert effekt på varmebatteriet i aggregatet. Vedovner avgir også en kombinasjon av konvektiv varme og strålevarme som kan være med på å øke komforten. Vedfyring bidrar i tillegg til å senke passivhusets CO<sub>2</sub>-utslipp da det regnes som et null-utslipps brensel.

Utfordringen med vedfyring er at ovner ofte er overdimensjonerte for passivhusets behov, de vanligste vedovnene for boliger er ofte i størrelsen 6-8 kW. Den lange forbrenningssyklusen og uforutsigbare varmeeffekten er også et problem og kan føre til overoppheting. Det er anbefalt å koble vedfyring mot et vannbårent lagringssystem som deretter distribuerer varmen i huset under kontrollerte forhold. (Georges, et al., 2012).

I en rapport om implementering av vedovn i passivhus understrekes det at nyere vedovner er bedre tilpasset bruk i passivhus. Disse har lav maksimal effekt og har en lengre forbrenningsperiode. Det er også forskjell på ved- og pelletsfyring. Pelletsfyring har rask oppstartstid, kan brenne med tilnærmet konstant effekt og kan i tillegg reguleres opp mot innnetemperaturen, se illustrasjon i Figur 3-1. Pelletsovner har også mulighet til å operere med 30 % av maksimumseffekt, vedovner kommer ikke lavere enn 50 % av maksimal effekt (Georges, et al., 2012).

Det er ikke bare ovens maksimumseffekt som er problematisk. Det har vist seg å være en utfordring å få varmen til å spre seg i hele boligen med isolerte innervegger og lukkede dører. Det anbefales derfor å ha flest mulige innvendige dører åpne for naturlig konveksjon mellom

rom. En bygningskropp med høy termisk masse vil i tillegg klare å regulere temperaturfordelingen bedre enn ved lav termisk masse (Georges, et al., 2012).



Figur 3-1: Effektforsløp - Ved og Pellets<sup>1</sup>

#### 3.1.4. Innvendige dører

Som nevnt over er en forutsetning for god spredning av varme i hele huset ved bruk av ovn, at innvendige dører står mest mulig åpne (Georges, et al., 2012) (Feist, et al., 2005). Dette gjelder også for boliger som har én enkelt radiator for romoppvarming.

Som beskrevet i teoridelen av rapporten (kapittel 2) er optimal plassering av tilluftsventil og avtrekksventil henholdsvis i taket og ved gulvet for overtemperert tilluft. I virkeligheten vil strømning gjennom spalte under dør fungere som «avtrekksventil». Dersom dører står åpne vil risikoen for kortslutningsventilasjon øke og den varme luften kan strømme direkte fra ventil/tak via døråpningen og til et avtrekk i neste rom. Denne risikoen må veies opp mot fortjenesten av å ha åpne dører. Planløsning i boligen er svært sentral for denne diskusjonen, i tillegg til varmetap i kanalen og betydningen for fordeling av varme. I simuleringene (kapittel 5) velges det å simulere alle innvendige dører som konstant åpne (side 70)

<sup>1</sup> Det er ikke lagt vekt på virkelige størrelsesforhold i figuren.

### 3.2. Økonomi og energibehov

Varmedistribusjonssystemer beregnet på utnyttelse av fornybar energi er vanligvis vannbåren varmedistribusjon, som ofte har høy investeringskostnad. Med passivhusets lave effektbehov og korte fyringssesong vil investeringskostnaden bli stor i forhold til utnyttelsen av anlegget. Siden vann har bedre varmetransporterende egenskaper enn luft, vil det likevel kreve mindre energi å varme opp et stort rom med vannbåren gulvvarme enn med luft og dette er en del av utfordringen med varmluftsoppvarming.

I forsøkshuset senere i rapporten er det av praktiske årsaker benyttet et elektrisk varmebatteri (kapittel 4.1.1). I virkeligheten ønsker man å erstatte det elektriske varmebatteriet med et vannbårent varmebatteri, som igjen er koblet til en varmepumpe. Dette er tanken bak en modulbasert ventilasjons-, oppvarmings- og tappevannsløsning. Modulløsningen kan f.eks. inneholde en varmepumpe, en varmtvannstank og et ventilasjonsaggregat med vannbårent ettervarmebatteri.

Vannbåren gulvvarme og radiator-systemer krever en mengde rør, er plasskrevende, kan være en dyr installasjon og det er alltid en fare for kostbare vannlekkasjer. Installasjonskostnader er ofte høyere for vannbåren gulvvarme på grunn av at flere arbeidsoperasjoner er involvert. Kompleksiteten i vannbårne anlegg er større og dette vil naturligvis påvirke kostnadene.

Varmluftsoppvarming utnytter det faktum at ventilasjonsaggregatet og balansert ventilasjon allerede er påkrevd i passivhus. Aggregatet behøver stort sett bare et vannbårent varmebatteri med høyere effekt og en god styringsmekanisme, i tillegg til de eksisterende komponentene. Det er ikke tatt hensyn til tilleggskostnaden for f.eks. en vedovn for dekking av spisslast, men dette er en løsning som har vist seg å kunne være hensiktsmessig på de kaldeste dagene i året. Investering i vedovn må veies opp mot kostnadsbesparelsene for investering i et varmebatteri med lavere maksimal effekt.

Leverandøren FLEXIT mener at kostnadsdifferansen for et varmebatteri med høyere effekt enn det som er vanlig i dag blir veldig liten. I tillegg kan tilhørende styring integreres i ventilasjonsstyringen i en tidlig fase for å spare inn kostnader. Modulløsningen er en løsning som skal leveres mest mulig prefabrikkert fra FLEXIT til husbyggerfirma. Det er antatt at dette vil minske kostnadene ved å investere i en slik modulløsning fordi prefabrikat med felles styring i utgangspunktet skal ha lavere kostnader enn enkeltkomponentene summert. FLEXIT regner også med å spare inn kostnader på å levere varmtvannstanken direkte fra produksjon til husbyggerfirma, i stedet for den vanlige kjeden; produsent – rørgrossist – rørdetaljist – husbyggerfirma – kunde. På grunn av flere ledd i leveranser også på andre produkter, er det likevel vanskelig å anslå prisnivået i markedet. Dette er noe som FLEXIT skal undersøke grundigere for å kunne anslå salgspris på modulløsningen (FLEXIT AS, 2012).

Det antas det at det benyttes et sentralt varmebatteri i en modulløsning. Men nordmenn ønsker ofte en lavere temperatur på soverommet enn i resten av boligen og dette er vanskelig å oppnå med et sentralisert varmebatteri. Løsningen er flere lokale ettervarmebatterier for regulering på romnivå, men det kan øke investeringskostnadene betraktelig.

## 4. Målinger i passivhus

---

Varmluftoppvarming som løsning er installert i et bebodd rekkehus i Miljøbyen Granåsen i Trondheim. Rekkehuset er bygget etter passivhusstandard. Det er utført måling av temperaturer i boligen over en lengre periode i februar og mars 2013.

Forsøkshuset med varmluftoppvarming er heretter kalt bolig 1. Det er også valgt ut to andre rekkehus i Miljøbyen, heretter bolig 2 og 3, som fungerer som referansehus og som skal driftes som normalt når målingene pågår. Bolig 2 har identisk planløsning med bolig 1, men er speilet om langsiden. Bolig 3 avviker mest fra bolig 1, boligen er litt mindre, har inngang på nederste plan og er speilet om kortsiden. Antall beboere varierer mellom boligene, bolig 1 har 2 voksne og 2 barn, bolig 2 har 2 voksne og 1 barn, og bolig 3 har 2 voksne og 5 barn. Ingen av boligene er enderekkehus, se plantegninger i vedlegg A.4 til A.6.

Se Tabell 4-1 for fakta om bolig 1 og Tabell 4-2 for utdrag fra energikonsept for rekkehusene utført av SINTEF AS. I tabellen ser man at noen av verdiene er forbedret fra standarden for å oppnå virkelig passivhusstandard i Trondheim.

*Tabell 4-1 Fakta – Bolig 1*

BRA	125 m <sup>2</sup>
Volum	295 m <sup>3</sup>
Etasjer	3 (Kjeller, 1. etasje, 2. etasje)
Ferdigstilt år	2012
Byggestandard	Passivhus (NS:3700)
Antall beboere	4 (2 barn)
Varmekilde	Fjernvarme (radiator og tappevann)

Det vil ikke fokuseres på utregninger av totalt energibehov gjennom et helt år for simuleringer i denne rapporten, selv om dette absolutt er av interesse. På grunn av manglende klimadata for Trondheim i IDA ICE og bestemt styringsstrategi for vinterhalvåret, fokuseres det kun på simuleringer under dimensjonerende vinterforhold. Det er likevel kjørt en helårssimulering av modellen i Oslo-klima. I simuleringen ser man at totalt energibehov for romoppvarming (ventilasjon og gulvvarme) blir lik 13 kWh/m<sup>2</sup>år for modellen av rekkehuset når varmluftoppvarming benyttes. Dette er en ideell verdi og vil variere fra bolig til bolig og den avhenger i stor grad av brukervaner, som man vil se senere i oppgaven (side 21 og 45).

Tabell 4-2: Utdrag fra energikonsept for Miljøbyen Granåsen (Heimdal Bolig AS, 2013)

Parametre	Passivhuskrav NS:3700	Miljøbyen Granåsen
U-verdi yttervegg	0,15 W/m <sup>2</sup> K	0,12 W/m <sup>2</sup> K
U-verdi tak	0,13 W/m <sup>2</sup> K	0,09 W/m <sup>2</sup> K
U-verdi gulv	0,15 W/m <sup>2</sup> K	0,12 W/m <sup>2</sup> K
U-verdi vindu	0,80 W/m <sup>2</sup> K	0,80 W/m <sup>2</sup> K
U-verdi dør	0,80 W/m <sup>2</sup> K	0,80 W/m <sup>2</sup> K
Normalisert kuldebroverdi	0,03 W/m <sup>2</sup> K	0,02 W/m <sup>2</sup> K
Årsgjennomsnittlig temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner	80 %	83 %
SFP-faktor ventilasjonsanlegg	1.5 kW/(m <sup>3</sup> /s)	1.5 kW/(m <sup>3</sup> /s)
Lekkasjetall ved 50 Pa, $n_{50}$	0,60 h <sup>-1</sup>	0,60 h <sup>-1</sup>
Ventilasjonsluftmengde	1.2 m <sup>3</sup> /h m <sup>2</sup> gulvareal	1.2 m <sup>3</sup> /h m <sup>2</sup> gulvareal
Belysning	11.4 kWh/m <sup>2</sup> år	11.4 kWh/m <sup>2</sup> år
Utstyr	17.5 kWh/m <sup>2</sup> år	17.5 kWh/m <sup>2</sup> år
Varmt forbruksvann	30 kWh/m <sup>2</sup> år	30 kWh/m <sup>2</sup> år

## 4.1. Planlegging

### 4.1.1. Luftbehandling

Alle 3 boliger har installert et UNI 4 aggregat for boligventilasjon (FLEXIT AS, 2013). Aggregatet har en maksimal luftmengde på 600 m<sup>3</sup>/h og har et innebygget elektrisk varmebatteri på 1.3 kW. Den mekaniske ventilasjonen skjer i et tradisjonelt kaskade-system hvor spalter under dører bidrar til gjennomstrømning mellom rom.

Den roterende varmeveksleren en temperaturvirkningsgrad på 85% ved 300 m<sup>3</sup>/h luftmengde i henhold til aggregatets datablad. Ved 600 m<sup>3</sup>/h er virkningsgraden 80%. I henhold til kravspesifikasjon hentet fra energikonsept (Tabell 4-2) er temperaturvirkningsgrad for gjenvinner satt til å være 83% og det er denne verdien som er benyttet videre i rapporten.

Følgende endringer er kun gjort for bolig 1. Før forsøksstart ble det installert et 3 kW eksternt varmebatteri etter aggregatet, i en forlenging av tilluftskanal (vedlegg A.8). Det ble montert én temperaturføler i stue og én i kanalen etter 3 kW-batteri.

### 4.1.2. Regulering og timeplan

Ved installasjon ble det satt opp en timeplan for regulering av tilluftstemperaturen (Tabell 4-3). Beboerne står opp kl. 06:00 og ønsker stans av nattsinkingen til samme tid. Driftstiden til eksternt batteri er satt til 07.00-19.00. Det vil ved oppstart ha høyeste mulige effektivitet, begrenset av tilluftstemperaturens grenseverdi, helt til avviket mellom stue- og settpunkttemperatur minker. Denne reguleringen er en strategi som er planlagt for fyringssesongen og når målingene utføres. Utenom fyringssesongen vil ikke tilluften alltid tilfredsstillende et settpunkt på 15°C og vinduslufting kan tas i bruk for regulering. Varmegjenvinner og varmebatteri vil da reguleres ned.



Tabell 4-3: Timeplan for regulering av tilluftstemperatur

Tid	Tilluftstemperatur etter:		Aktiv enhet	
	1.3 kW batteri	3 kW batteri		
00:00 – 06:00	15 °C		Aggregat	
06:00 – 07:00	18 °C		Aggregat	
07:00 – 19:00	18 °C	≤ 40 °C	Aggregat	3 kW batteri
19:00 – 21:00	18 °C		Aggregat	
21:00 – 23:59	15 °C		Aggregat	

### 4.1.3. Settpunkt for temperaturer

Når det eksterne varmebatteriet er i drift vil aggregatet forvarme uteluften til 18°C og det eksterne batteriet dekke resten av oppvarmingsbehovet. Høyeste og laveste tilluftstemperatur etter eksternt batteri ble opprinnelig satt til henholdsvis 35°C og 15°C. Settpunktet på 35°C ble økt underveis i prosjektet på grunn av utilstrekkelig oppvarming og den nye verdien ble 40°C. Eksternt batteri har innebygget brann- og overhetningstermostat og stans av anlegget skjer ved 45°C. Settpunkt for romtemperatur er 23°C, siden dette er temperaturen som ble registrert i stuen på to forskjellige dager under installering. Siden romføler er plassert høyt i rommet vil gjennomsnittstemperaturen i rommet og boligen antakeligvis være noe lavere.

### 4.1.4. Måleutstyr og plassering

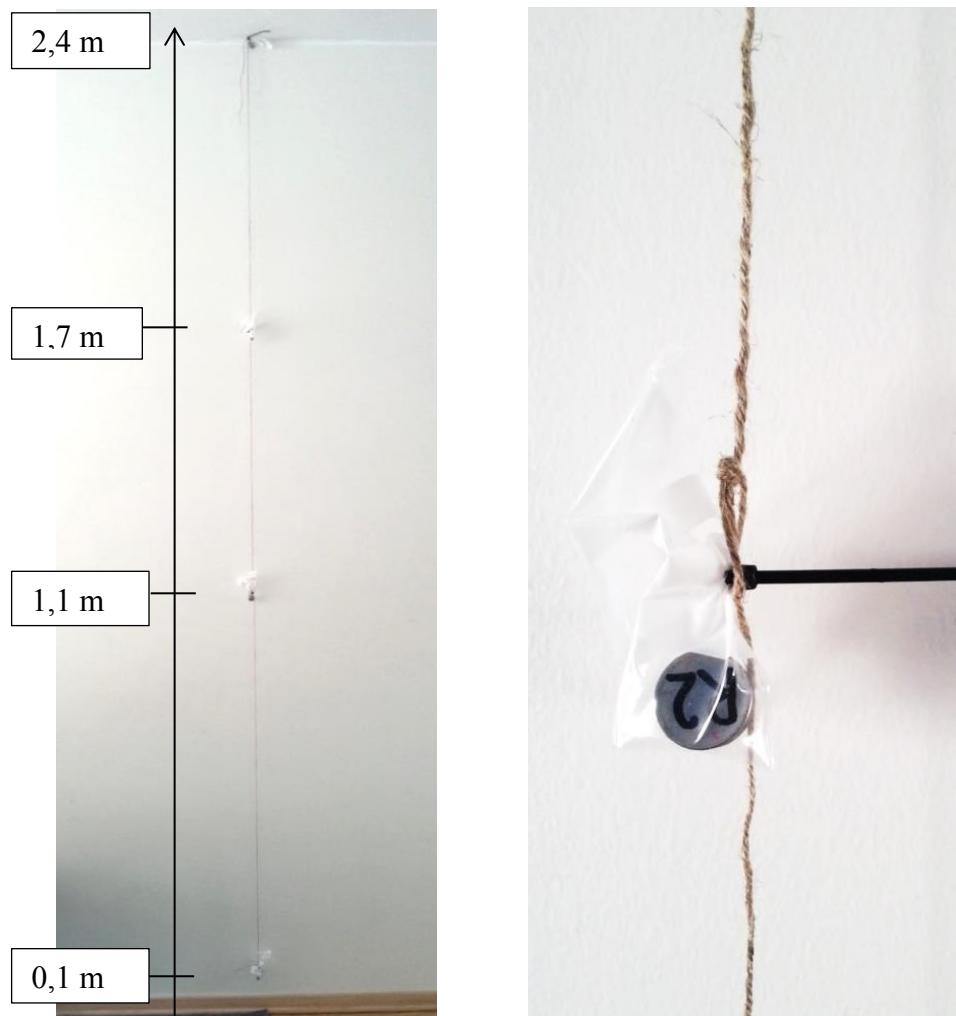
For å måle lufttemperatur i rommene er det brukt knappeloggere av typen iButton DS 1922L-F5# (maximintegrated.com, 2013). Disse ble programmert til å lagre temperaturer med registreringsintervall på 10 minutter. Måleren ligger i en perforert plastlomme og ved måling i ulike høyder i et rom festes posene til en tråd som henger fra tak til gulv. Se Figur 4-1 for illustrasjon av oppsett. En iButton er plassert på nordre side av huset for å måle utetemperatur under forsøket. Plassering av knappeloggere i plantegning for bolig 1 kan ses i vedlegg A og oversikt over totalt antall knappeloggere i hver av boligen 1, 2 og 3 ses i Tabell 4-4.

Bolig 1 har flere målepunkter enn 2 og 3. Hver remse i bolig 1 har 6 punkter i forskjellig høydene 0.1, 1.1, 1.7, 2.0, 2.2 og 2.4 meter over gulv. I bolig 2 og 3 er punktene 0.1, 1.1, 1.7 og 2.4 meter over gulv (Figur 4-1).

I bolig 1 er det i tillegg til iButton brukt temperatur- og fuktighetsmålere av typen TinyTag Plus 2 TGP-4500 (geminidataloggers.com, 2013). Disse plasseres i aggregat, i kanal rett etter varmebatteri og ved siden av romføler i stue. Inne i selve aggregatet er det 3 loggere: uteluft, avtrekk og avkast, se vedlegg A.7 for illustrasjon.

Alle TinyTag-målerne har registreringsintervaller på 2 minutter, bortsett fra måleren i kanal etter varmebatteri som har intervall på 1 minutt og dermed må skiftes ut 2 ganger under forsøket.

For luftmengdemålinger er det brukt lufthastighetsmåling av Velocicalc Plus TSI 8388 (tsi.com, 2013) og en måletrakt for måling i ventil.



*Figur 4-1: Oppsett for temperaturmåling i rom – Eksempel fra bolig 3*

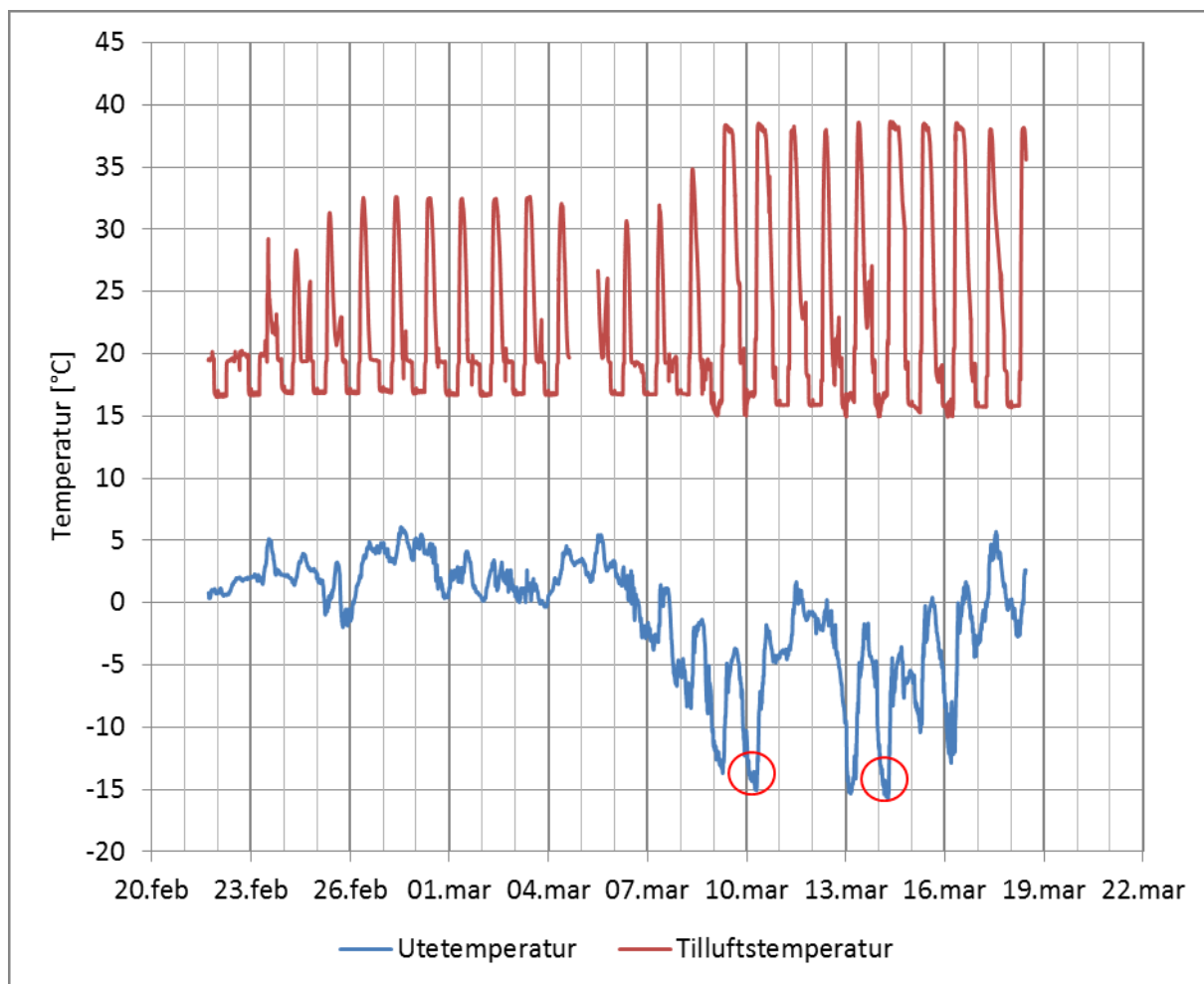
Tabell 4-4: Plassering av iButton i bolig 1, 2 og 3

Plassering	Bolig 1	Bolig 2	Bolig 3
<i>Temperaturgradient</i>			
Stue	X	X	X
Kjellerstue	X	X	
Soverom N-Ø	X	X	X
Trapp	X	X	X
Tilluft stue	X	X	X
Tilluft kjellerstue	X		
Tilluft soverom N-Ø	X		
Avtrekk kjøkken	X		
Avtrekk WC	X		
Avtrekk bad	X		
Avtrekk teknisk rom	X		
Radiator stue	X	X	X
Radiator kjellerstue	X		

#### 4.1.5. Måleperiode

Måleperioden starter 24. februar 2013, kl. 00.00 og avsluttes 18.03 kl. 10.45. Måleren i kanal etter varmebatteri har to utskiftninger; 5. mars kl. 11.30 og 12. mars kl. 15.00. I Figur 4-2 kan man se utetemperaturen sammenlignet med tilluftstemperaturen for hele måleperioden. Utetemperaturen måles som sagt med en knappeligger av typen iButton og er plassert på nordre side av boligen, i skyggen av et rekkverk. Slutten av måleperioden er den kaldeste perioden, mellom 9. og 16. mars.

Det er i tillegg registrert temperatur på luftinntak inne i aggregat. På Meteorologisk institutts nettside eKlima (Meteorologisk institutt, 2013) er observasjoner av temperatur og luftfuktighet hentet ut med timesoppløsning og sammenlignet med egne temperaturmålinger. Oversikt over dager med de laveste temperaturene finnes i Tabell 4-5. Målingene fra eKlima hentes fra målestasjon «Voll» nr. 68860 (vedlegg A. 10). Temperaturene fra iButton samsvarer godt med data fra eKlima, uten større avvik, og kan benyttes videre i oppgaven. Alle de kaldeste døgnene har et temperaturforløp med kalde netter og varmere dager og med litt over 10 °C maksimal temperaturredifferanse i løpet av døgnet. Det er valgt å fokusere på 10. og 14. mars videre i oppgaven, da begge dagene er innledet med én eller flere omtrent like kjølige dager (Figur 4-2). Den 10. mars er en søndag og 14. mars en torsdag, man får også muligheten til å se om det er vesentlige forskjeller i bruk av boligen på ukedag og helg.



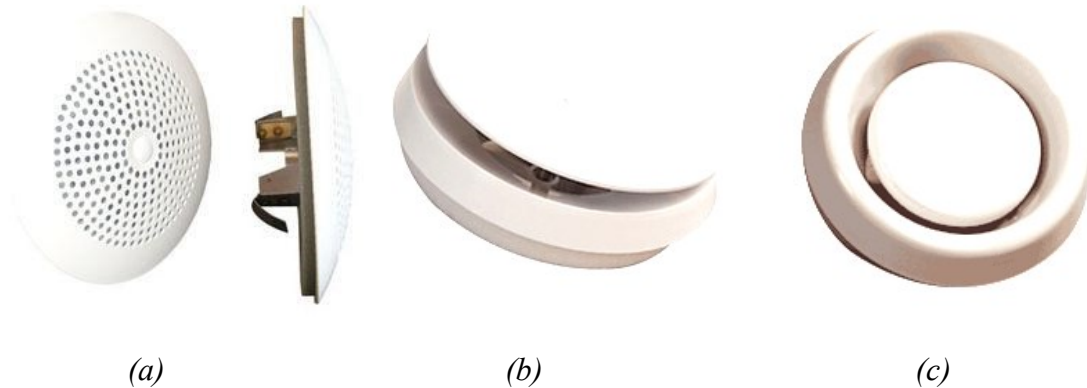
Figur 4-2: Utetemperatur vs. tilluftstemperatur

Tabell 4-5: Laveste utetemperatur i forsøksperioden

Dato	Måler	Klokkeslett	Temperatur [°C]
<b>10.03</b>	iButton	07:07	-15,1
	Aggregat	07:03	-11,5
	eKlima.no	08:00	<b>-16,5</b>
<b>13.03</b>	iButton	03:37	-15,3
	Aggregat	04:03	-10,9
	eKlima.no	06:00	<b>-15,9</b>
<b>14.03</b>	iButton	06:47	<b>-15,7</b>
	Aggregat	07:03	-11,2
	eKlima.no	07:00	-14,3

#### 4.1.6. Ventiler i boligene

Det er benyttet to radiale tilluftsventiler i stue/kjøkken og en diffuser på soverom, kjellerstue og inngang. Avtrekksventilen er en standard rund ventil. Se Figur 4-3 for illustrasjon.



Figur 4-3: (a) Diffuser, (b) Radiell og (c) Avtrekksventil (Systemair, 2013) (FLEXIT, 2013)

Diffuseren minimerer trekk ved undertemperert tilluft, og den vil i tillegg gi god spredning ved overtemperert luft. Den radielle ventilen tilfører luft langs taket og utnytter klebeeffekten for spredning inn i rommet, både ved undertemperert og overtemperert luft. Se avsnitt 2.1 for gjennomgang av varmluftstilførsel og ventiler.

#### 4.1.7. Korrigering underveis

Da første dataserie fra termometer i kanal etter varmebatteri ble analysert, ble det oppdaget en stagnering av tilluftstemperaturen på omtrent 32 °C en lengre periode på morgenen, selv om grensen var satt til 35 °C. Beboer meldte også om at det var kjølig i huset en stund på morgenen. Dermed ble maksimal grense for tilluftstemperatur ble justert opp til 40 °C den 7. mars, omtrent halvveis i forsøket. Loggerplasseringen i kanal ble endret den 8. mars, fra liggende til hengende og man kan se at maksimal temperatur etterpå ligger opp mot 39 °C. Etter at plasseringen av tillufts-logger er endret fra liggende til hengende, måler den en lavere temperatur på natten. Dette kan komme av varmtransport via kanalvegg fra omgivelsene, og denne blir registrert i mindre grad når loggeren henger midt i kanalen. Omgivelsene/romtemperaturen vil være høyere enn 15 °C.

#### 4.1.8. Brukervaner

Nesten alle beboere opplyser at vinduslufting skjer veldig sjelden i fyringssesongen, men at det utenom denne luftes ofte og gjerne permanent på soverom. Beboere i bolig 2 opplyser om at de ofte har åpne vinduer i det største soverommet både vinter og sommer (side 40), og at de på vinteren lufter på barnerommet på kvelden. Det opplyses også om at dører i husene stort sett er lukket på natten. Beboere i bolig 1 nevner at noen dører kan stå åpne på dagtid grunnet husdyr. Bolig 3 har soveromsdører og dør til teknisk rom/vaskerom åpne på dagtid. Bolig 2 har ofte baderomsdøren åpen og dør til yttergang er ofte lukket på natten. Se side 13 og 70 for diskusjon om åpne/lukkede dører.

## 4.2. Resultater fra måleserie

Resultatene gjennomgås rom for rom i delkapitlene under. Først gjennomgås selve forsøkshuset, bolig 1, deretter sammenlignes dette med bolig 2 og 3.

### 4.2.1. Måling av luftmengde

Under hele forsøket er innstilling for luftmengde satt til trinn 2, som er henholdsvis 53 % tilluft og 49 % avtrekk (av maksimal luftmengde), en innstilling som beboer selv har justert. Luftmengde i hovedkanal etter 3 kW varmebatteri er målt i henhold til metode for måling i rund kanal (Sørensen, 1996). Denne ble målt til å være ca. 253 m<sup>3</sup>/h, altså 0,07 m<sup>3</sup>/s. Ved måling av luftmengde fra ventiler ble det målt omtrent  $\dot{V}_{til} = 0,068$  m<sup>3</sup>/s totalt i tilluftsmengde og  $\dot{V}_{fra} = 0,058$  m<sup>3</sup>/s totalt i avtrekksmengde (Tabell 4-6), og det er disse verdiene som er benyttet i videre utregninger og simuleringer (kapittel 5). Kjøkkenheten var ikke i drift under måling. Anlegget ser ut til å være ubalansert.

Tabell 4-6: Målt luftmengde: avtrekks- og tilluftsventiler

Rom	m3/h	m3/s
Kjøkken	57	0,016
Stue	60	0,017
Inngang	21	0,006
Soverom stort	27	0,008
Soverom venstre	18	0,005
Soverom høyre	18	0,005
Kjellerventil venstre	20	0,006
Kjellerventil høyre	24	0,007
Total tilluft	245	0,068
Bad	54	0,015
WC	26	0,007
Teknisk rom	39	0,011
Kjøkken/stue	26	0,007
Bod	27	0,008
Trapp 2.etg	35	0,010
Total avtrekk	207	0,058
Differanse	38	0,011

Målt tilluftsmengde i hovedkanal er altså  $253 \text{ m}^3/\text{h} = 42 \%$  av  $600 \text{ m}^3/\text{h}$ , noe lavere enn settpunktet på  $53 \%$ . Total tilluftsmengde fra ventiler er også lavere enn målt i hovedkanal. Som nevnt har beboer selv stilt inn tilluftsmengden en høyere prosentandel enn avtrekksmengden. Men avvikene kan komme av måleusikkerhet og/eller tap i systemet. Det kan også være at anlegget ikke er innregulert korrekt.

Et overtrykk i 1. etasje (Tabell 4-7) kan bidra til at luften lettere transporteres til 2. etasje og kjeller og jevner ut eventuelle temperaturforskjeller. Effekten av dette er uvisst. Luftmengdene vil balanseres for simulering i kapittel 5.

*Tabell 4-7: Total luftmengde i hver etasje – måling fra ventiler*

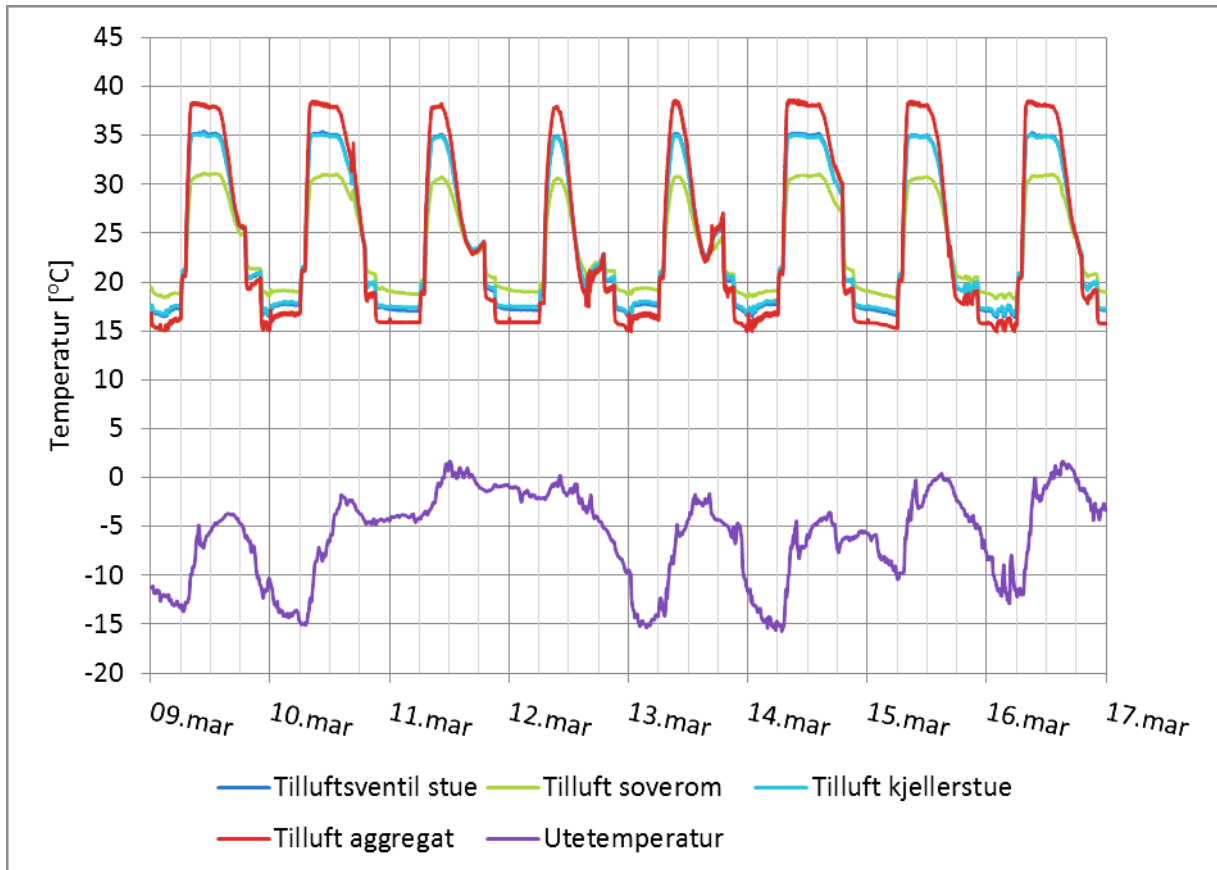
	Tilluft [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	Avtrekk [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
Kjeller	44	66
1. etg	138	52
2. etg	63	89

## 4.2.2. Varmluftoppvarming av bolig 1

Se vedlegg A for større figurer enn de som benyttes i avsnittene under.

### 4.2.2 I. Diagram – Tilluftstemperaturer i kuldeperiode

I Figur 4-4 er tilluftstemperaturen ut fra ettervarmebatteri og ut fra tilluftsventiler i rom sammenlignet med målt utetemperatur for den kaldeste perioden, mellom 9. og 16. mars.



Figur 4-4: Tilluftstemperaturer vs. utetemperatur

Tilluftstemperaturen ut av ventilen i stue er 2-3 °C lavere enn ut av aggregatet ved maksimal tilluftstemperatur, sannsynligvis forårsaket av varmetap gjennom kanalvegg. Man ser også at tilluften tar opp varme fra huset under nattsinkingen før den når ut til tilluftsventilene og øker da 1-2 °C. Kurven for tilluft på soverom viser at tilluften på soverommet, som er lengst unna aggregatet av de tre rommene, får den største varmeoverføringen med omgivelsene. På dagtid synker temperaturen omtrent 7 °C før ventilutløpet. På natten stiger temperaturen ca. 3 °C frem til utløpet.

Som planlagt skal tilluftstemperaturen være opp mot 40 °C, også på morgener med en høyere utetemperatur, men på disse dagene holder kurvene seg på maksimal temperatur i en kortere periode.

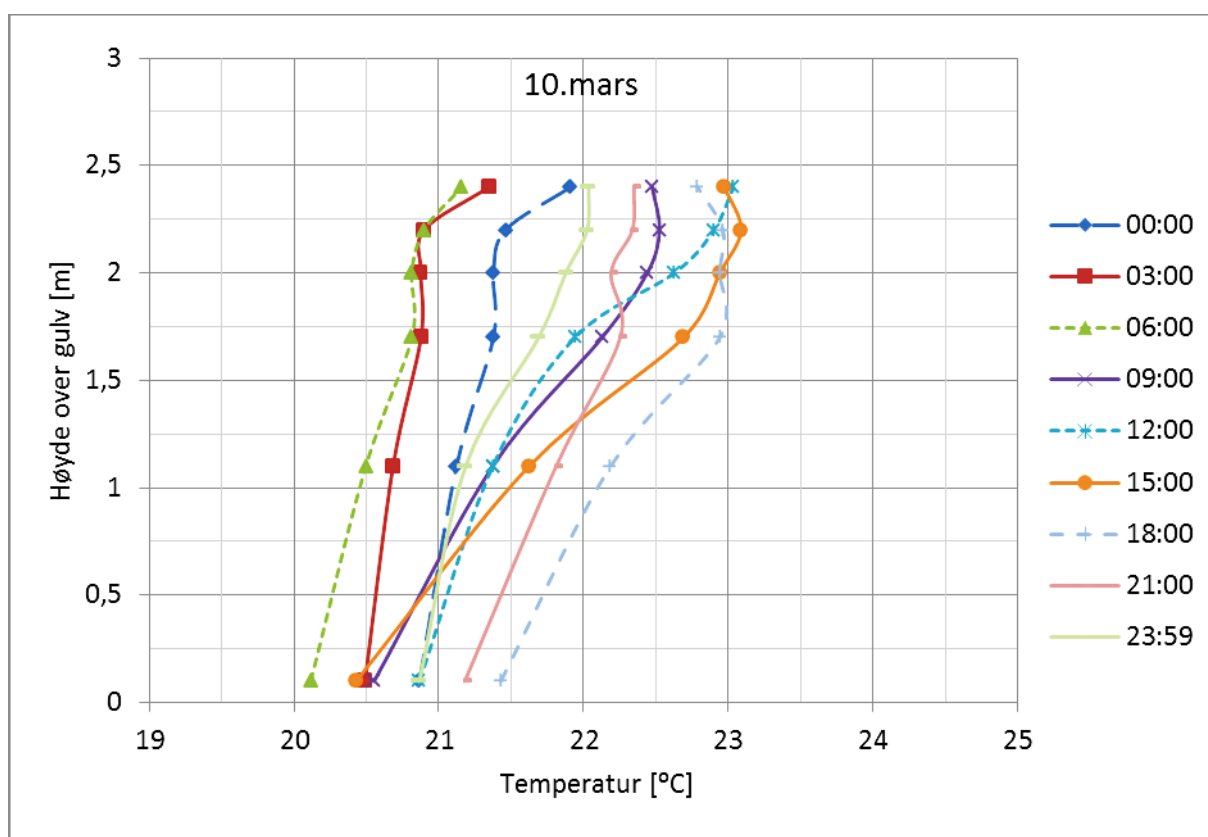


#### 4.2.2 II. Diagram: Temperaturfordeling i stue

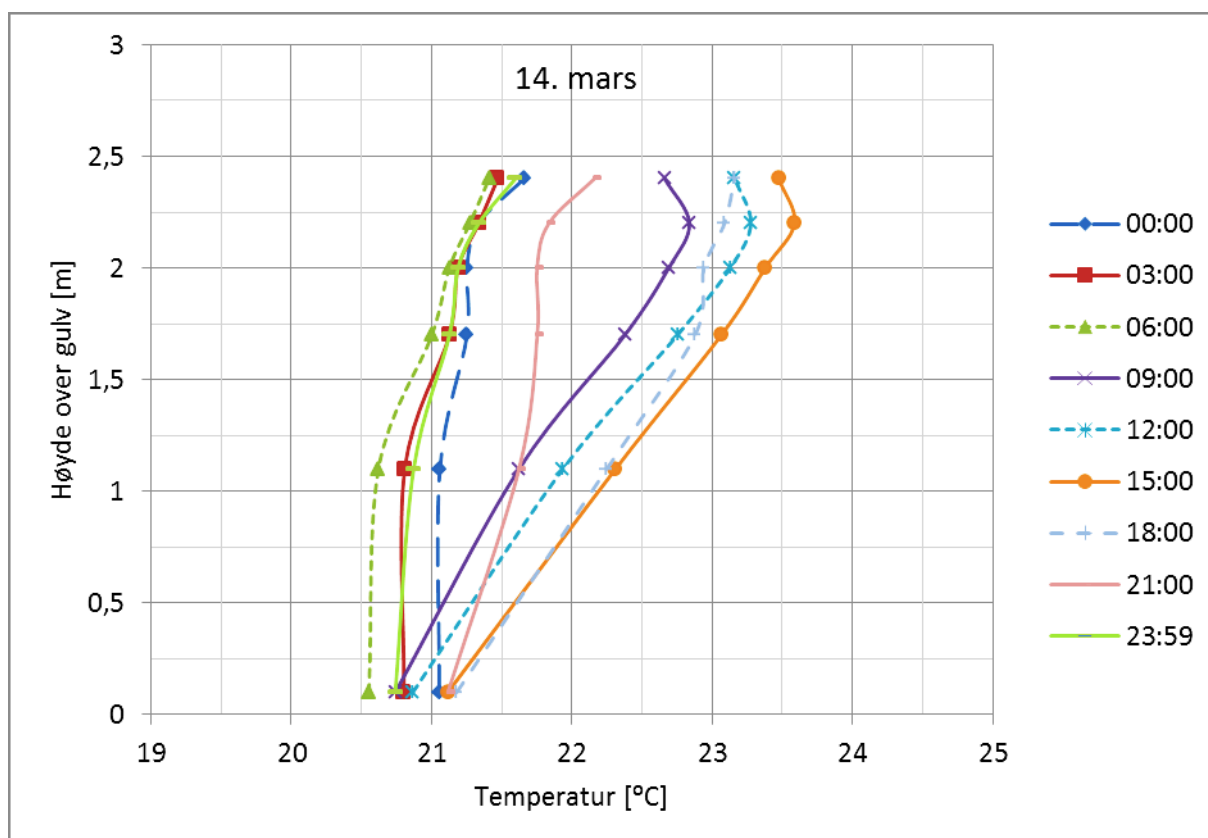
For å lettere illustrere den vertikale temperaturfordelingen og endringen av denne i løpet av dagen, er det tegnet kurver av høyde avhengig av temperatur for ulike tidspunkt i løpet av en dag (Figur 4-5 og Figur 4-6). Interessante vertikale differanser er [1,7-0,1] meter og [1,1-0,1] meter, heretter kalles disse henholdsvis «stående» og «sittende» temperaturdifferanse.

Den 10. mars kl. 15 er stående temperaturdifferanse lik 2,3 °C. Samtidig er sittende differanse lik 1,2 °C. Dette er innenfor komfortkravet på maksimalt 3 °C sittende temperaturdifferanse (Sørensen, 1996). Den 14. mars inntreffer største differanse også kl. 15:00 (Figur 4-6). Her er stående temperaturdifferanse ca. 2 °C og sittende differanse ca. 1,1 °C, også denne innenfor komfortkravet.

For begge døgn ser man at det senere på dagen oppstår en temperaturforskjell ved taket på ca. 0,25 °C. I løpet av natten har takets termiske masse mest sannsynlig rukket å bli kjølt ned pga. nattsinkingen av tilluftstemperaturen. Når tilluftstemperaturen øker ser en at den høyeste temperaturloggeren måler en litt lavere temperatur enn den nest høyeste loggeren, og det antas at dette kommer av nedkjølingen av taket. Først etter kl. 18:00 viser måler ved tak en høyere temperatur enn nest høyeste måler.



Figur 4-5: Temperaturfordeling i stue 10. mars - Høyde(Temperatur)

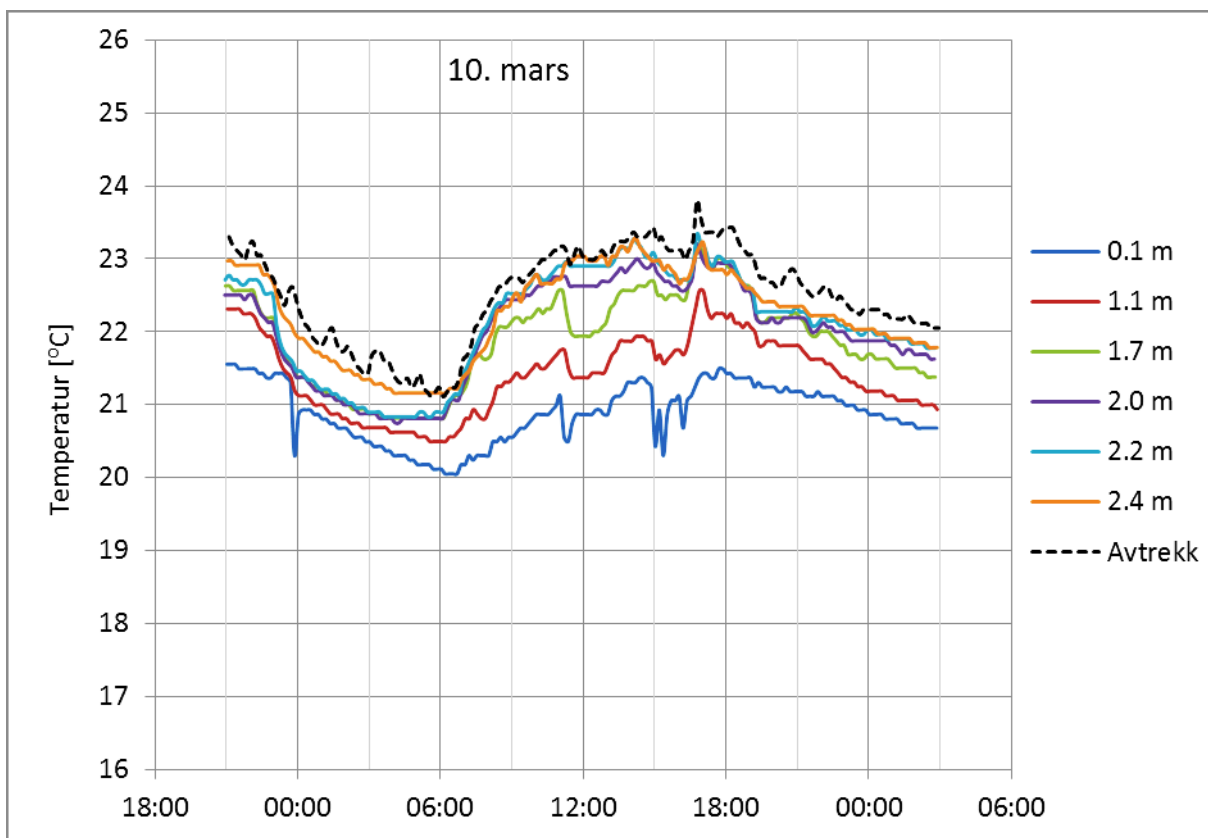


Figur 4-6: Temperaturfordeling i stue 14. mars - Høyde(Temperatur)

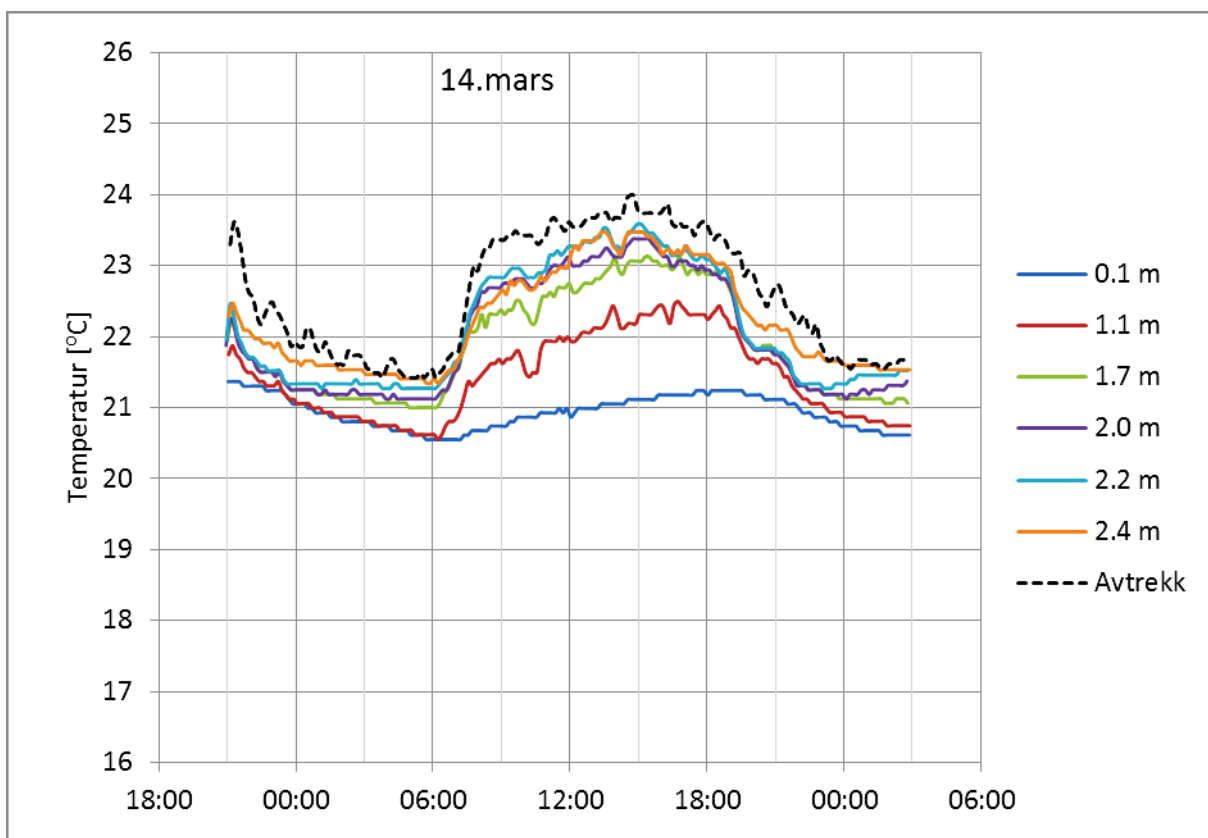
I Figur 4-8 og Figur 4-7 kan en se temperaturen avhengig av tid i ulike målepunkter over hele døgnet. Gjennomsnittlig stående temperaturredifferanse på dagtid er ca. 1 °C og på natten ca. 0,75 °C. Man ser tydelig en rask økning i temperatur kl. 6 i alle nivå, men i mindre grad ved gulv. I toppsjiktet stiger temperaturen hurtig i et par timer og deretter gradvis mot et toppunkt rundt kl. 15:00. Ved gulvet er temperaturøkningen mer gradvis med et toppunkt omtrent kl. 18 begge dager. Grafene har enkelte «brå» endringer på maksimum 1 °C underveis men dette kan komme av lufting eller åpning av ytterdør.

Romtemperaturen holder seg mellom 20 og 23,5 °C og oppfyller komfortkravet ved 10 % PPD (NS-EN 15251, 2007). Settpunkt for stuetemperatur er 23 °C i en høyde på ca. 2,2 meter, noe som overskrides med ca. 0,6 °C begge dager og ikke fullt så mye ved 1,7 meter. Gjennomsnittlig temperaturnivå og temperaturredifferanse tyder på at komforten i stue burde være god.

Det sitter en avtrekksventil i taket på kjøkkenet, omtrent 1,5 meter fra tilluftsventilen. Det er dermed fare for at denne bidrar til kortslutning av ventilasjonen ved varmluftstilførsel. Man kan se i Figur 4-7 og Figur 4-8 at avtrekkstemperaturen i kjøkkenventilen er noe høyere enn temperaturen ved målepunkt 2,4 meter over gulv, men aldri høyere enn 0,5 °C.



Figur 4-7: Temperaturfordeling i stue 10. mars – Temperatur(Tid)



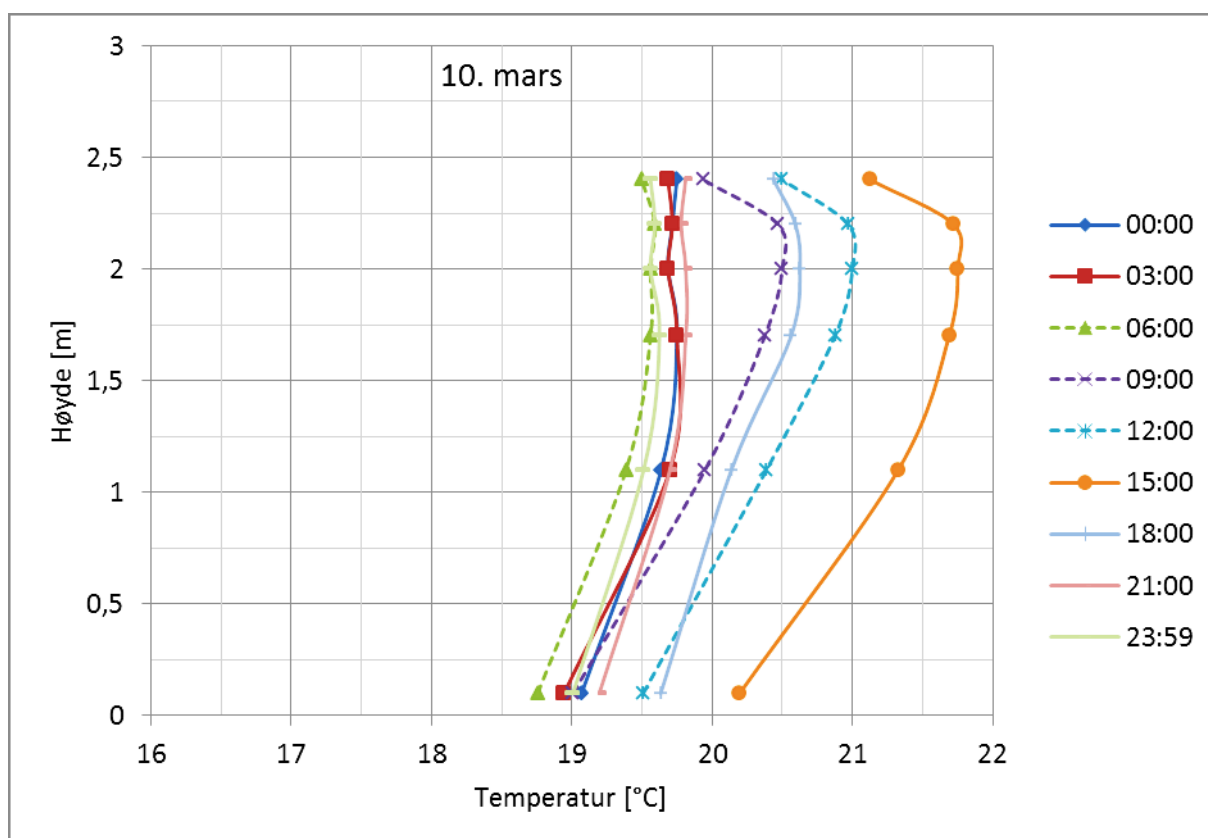
Figur 4-8: Temperaturfordeling i stue 14. mars – Temperatur(Tid)

### 4.2.2 III. Diagrammer: Temperaturfordeling i soverom

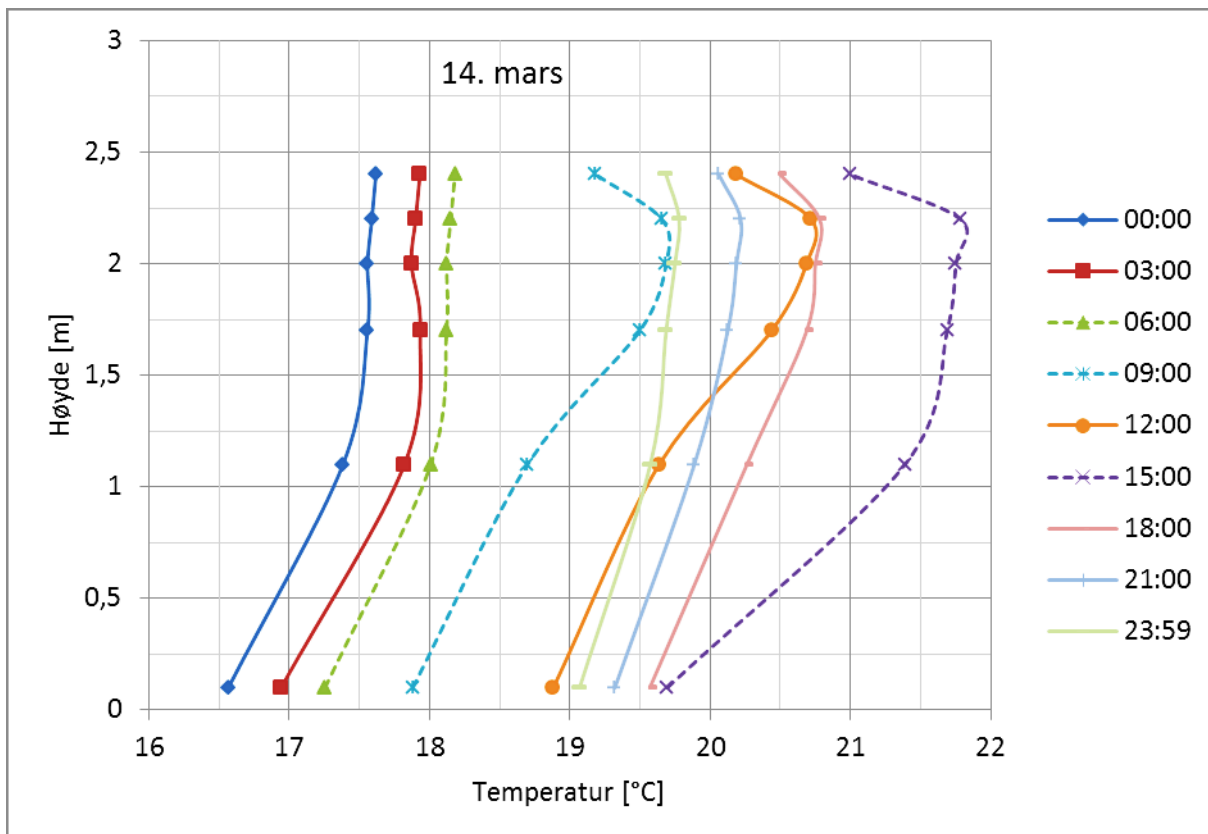
Det er større forskjeller i soveromstemperaturen for 10. og 14. mars. Den lave inngangstemperaturen i rommet den 14. mars skyldes en lengre utlufting den 13. mars som ikke ble utjevnet innen nattsenkingen ble slått på natt til 14. mars (Figur 4-11). Også på soverommet ser man effekten av nedkjølingen av bygningskroppen på natten (Figur 4-9 og Figur 4-10).

I Figur 4-12 og Figur 4-13 vises temperaturfordelingen i ulike høyder av rommet fordelt ut over døgnet. Gjennomsnittlig stående temperaturdifferanse er ca. 0,75 °C hele døgnet.

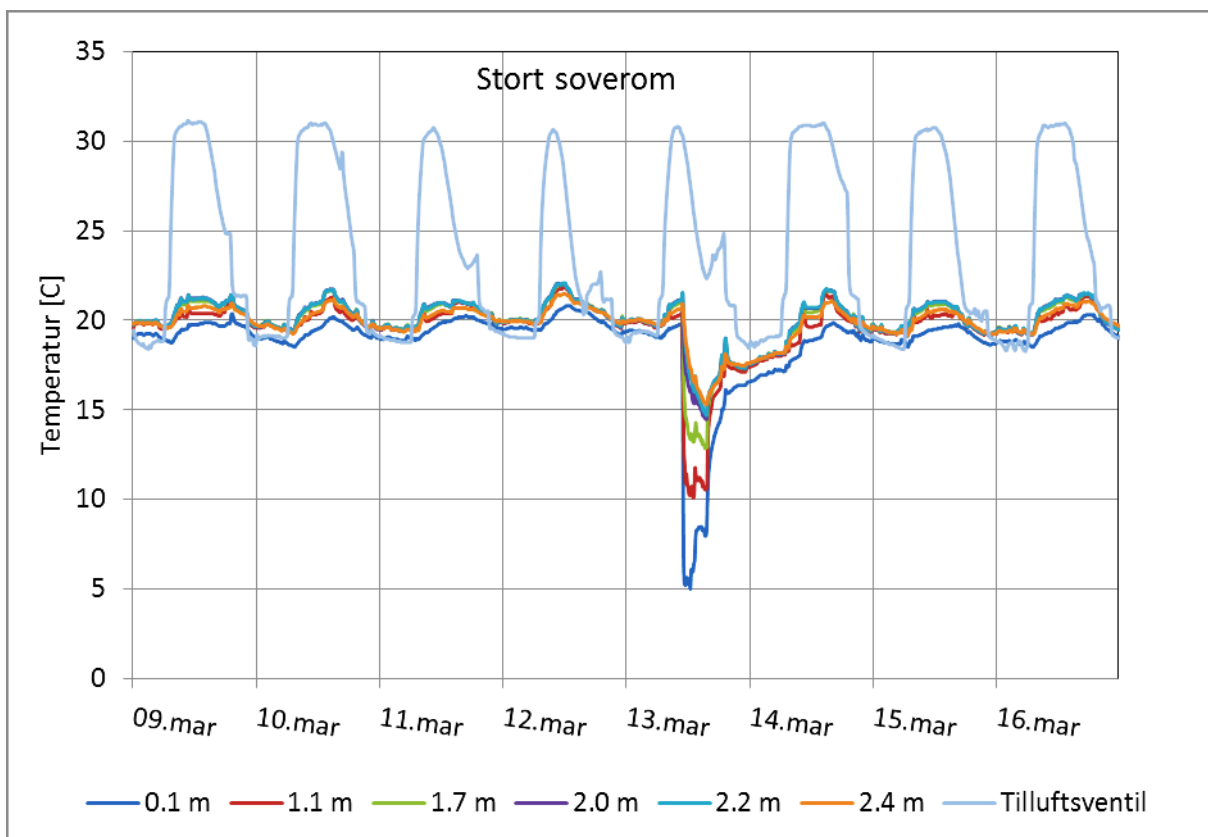
Høyden på sengen er nærmest målepunktet på 1.1 meter. I denne høyden får man en minimumsverdi på 17,2 °C den 14. mars og 19,4 °C den 10. mars. Soverommet er generelt ikke brukt som oppholdsrom utover dagen og trenger ikke nødvendigvis å oppfylle krav om 20 °C i resterende tid av dagen. Man oppnår tilstrekkelig nedkjøling på natten og beboer har ikke merket seg at romtemperaturen er for høy på natten i måleperioden.



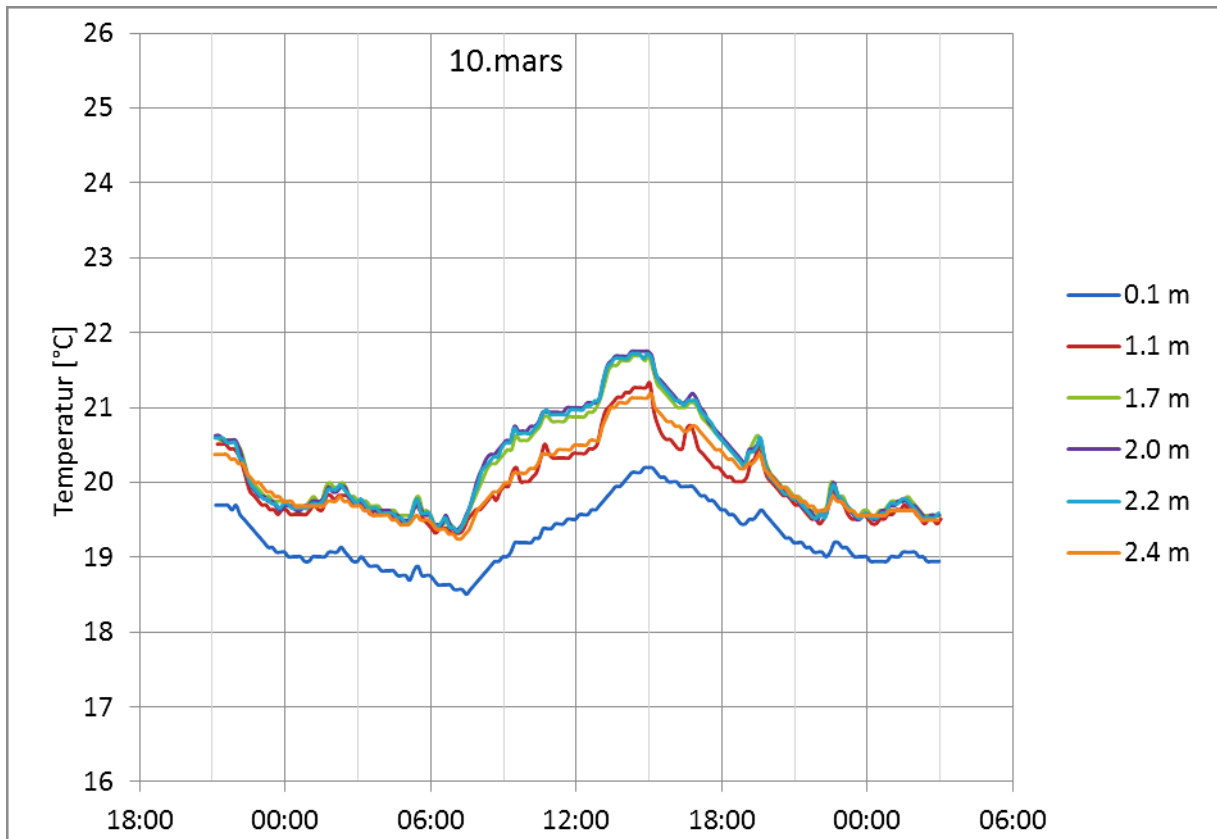
Figur 4-9: Temperaturfordeling i stort soverom 10. mars - Høyde(Temperatur)



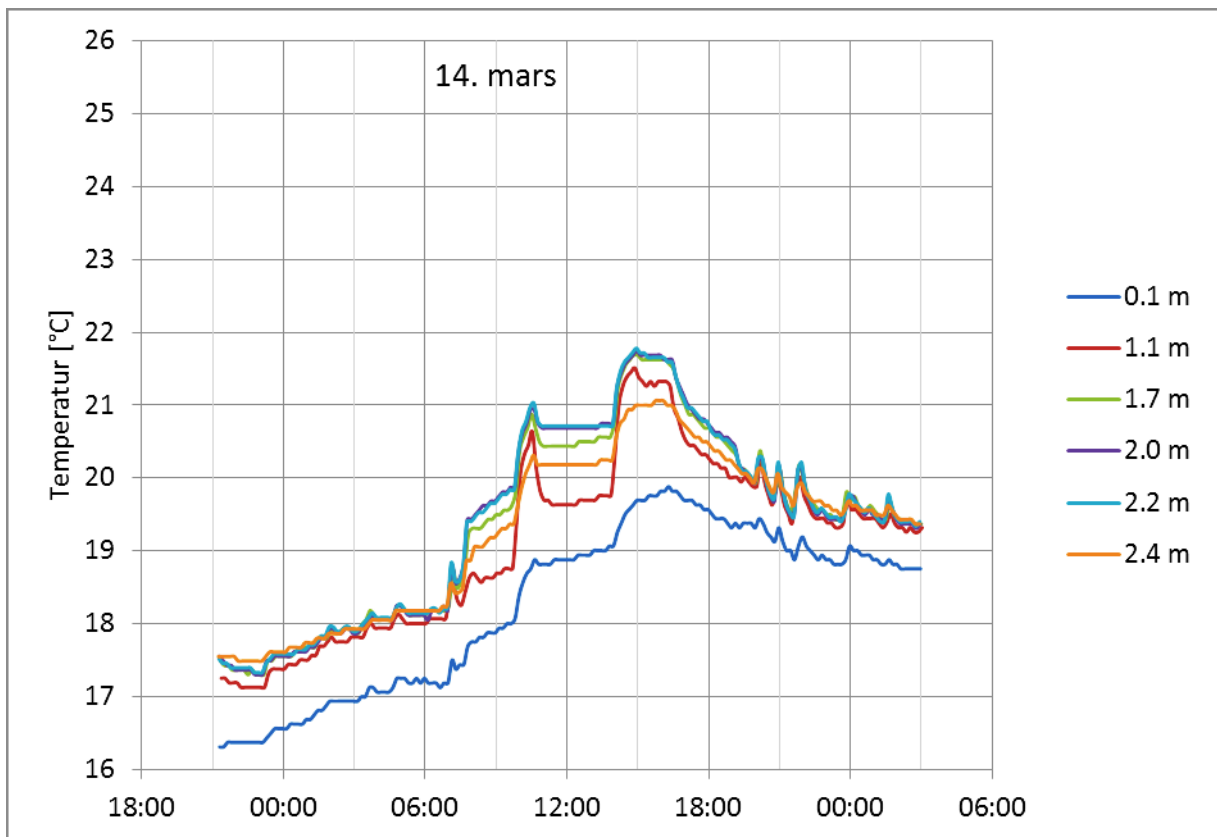
Figur 4-10: Temperaturfordeling i stort soverom 14. mars - Høyde(Temperatur)



Figur 4-11: Temperaturfordeling i soverom 9-16. mars



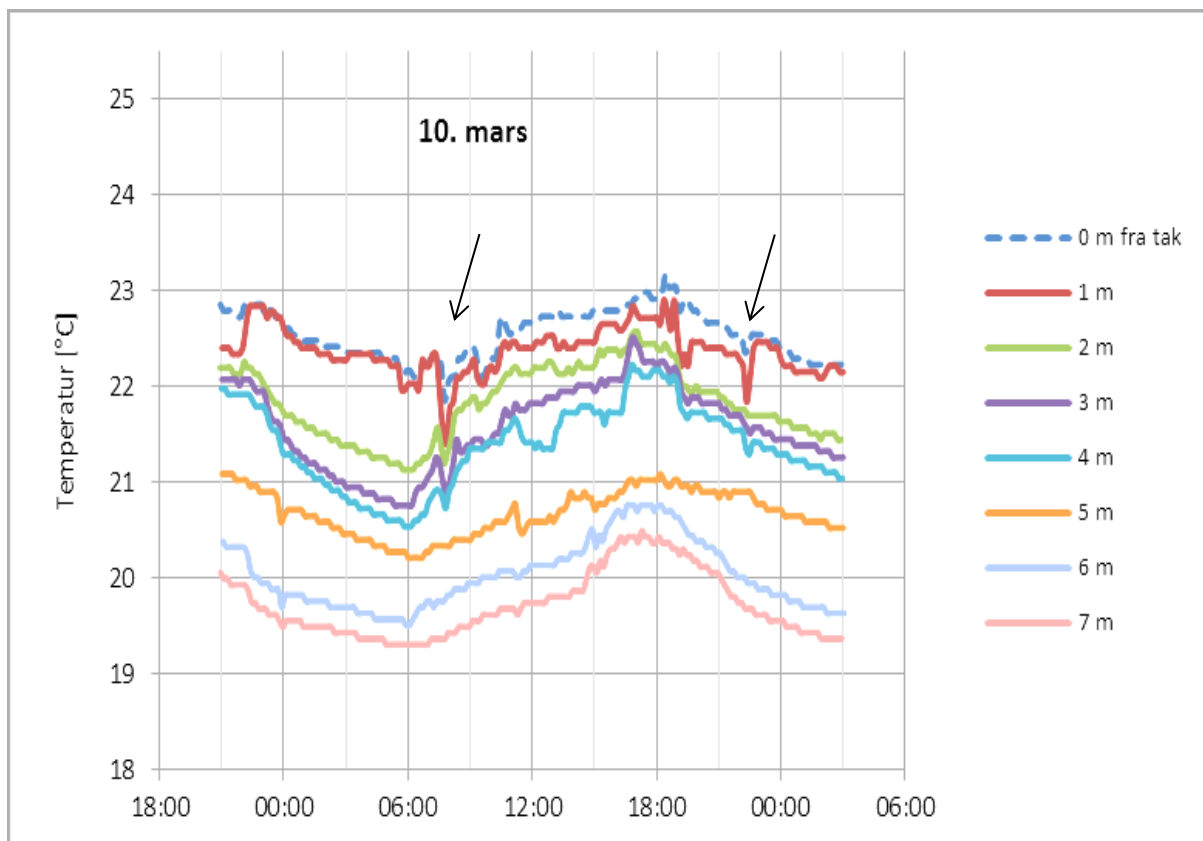
Figur 4-12: Temperaturfordeling i stort soverom 10. mars – Temperatur(Tid)



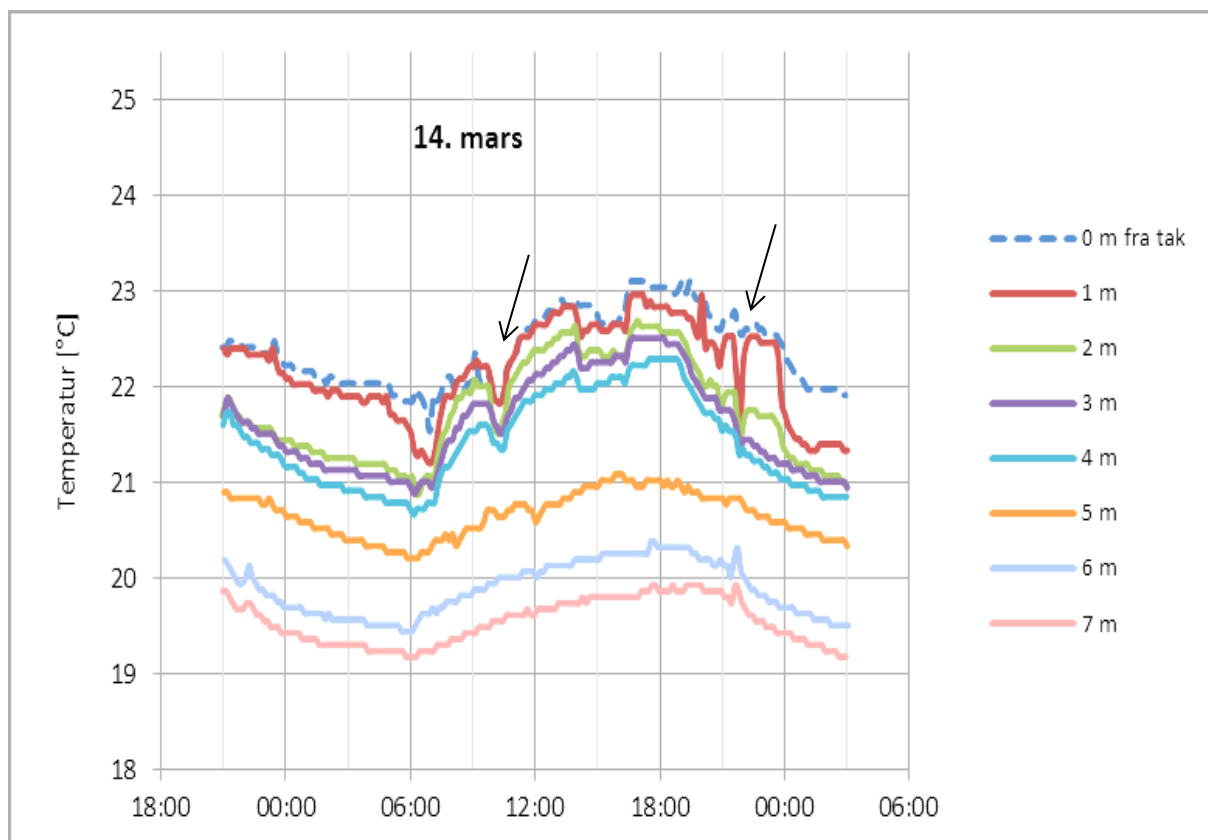
Figur 4-13: Temperaturfordeling i stort soverom 14. mars – Temperatur(Tid)

#### 4.2.2 IV. Diagram: Temperaturfordeling i trapperom

I Figur 4-14 og Figur 4-15 er temperaturfordelingen i hele trapperommet skissert. Hvert målepunkt har 1 meters avstand fra hverandre og måles i avstand fra tak i 2. etasje. Begge dager er maksimal temperaturdifferanse mellom gulv og tak i hele trapperommet lik ca. 3 °C, og er omtrent den samme over hele døgnet. Plutselige fall i temperatur kan for eksempel komme av åpning av dør i kjeller, se piler. Disse fallene er opptil 1 °C i størrelse.



Figur 4-14: Temperaturfordeling i trapperom 10. mars - Temperatur(Tid)



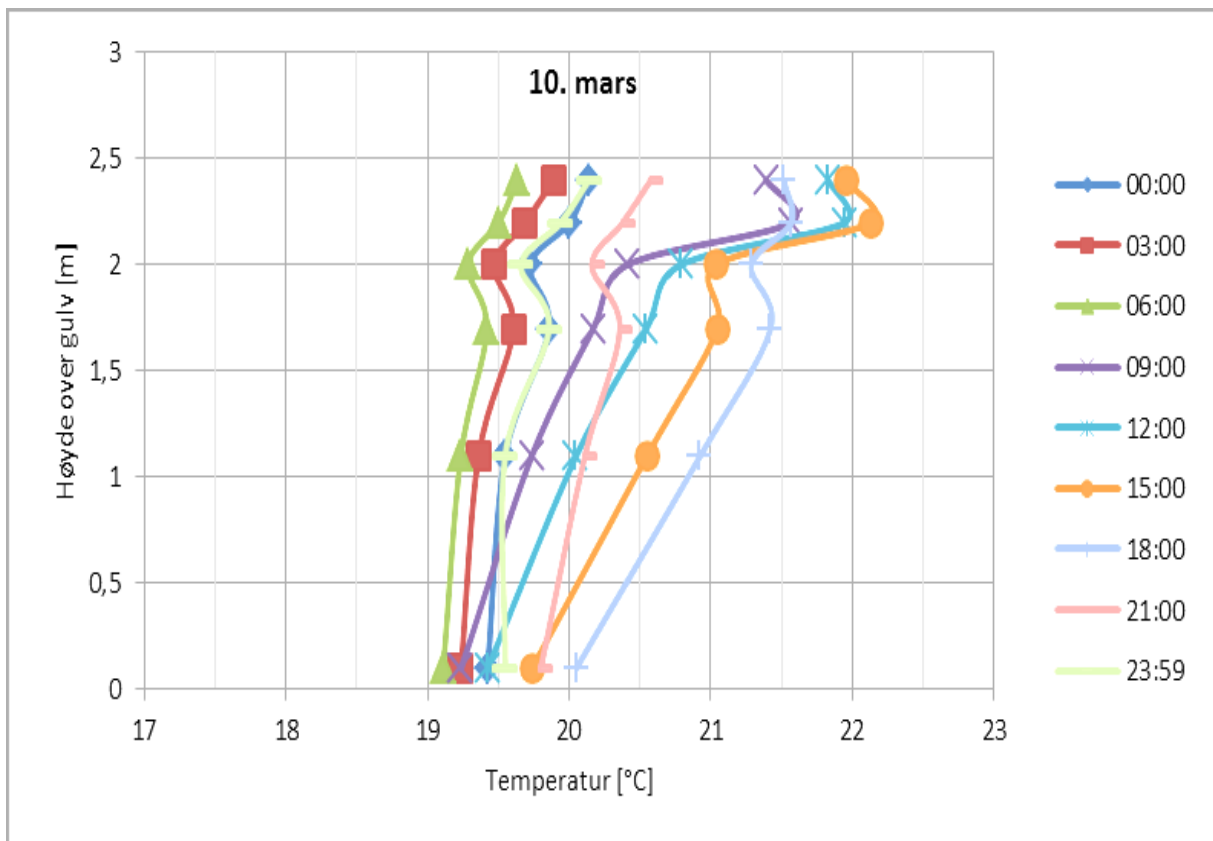
Figur 4-15: Temperaturfordeling i trapperom 14. mars - Temperatur(Tid)

#### 4.2.2 V. Diagram: Temperaturfordeling i kjellerstue

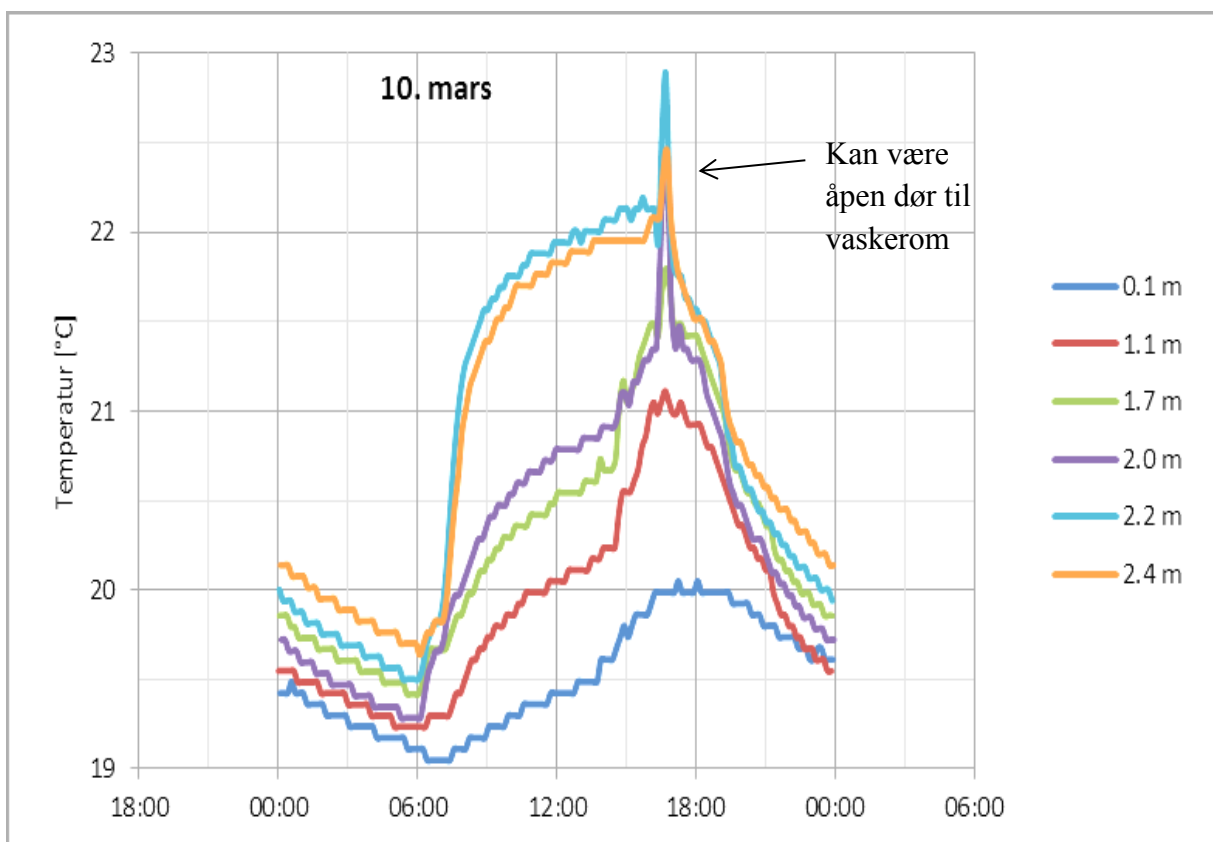
For kjellerstuen har varmluften som tilføres fra kl. 6 samme effekt på kurven som i stue og på soverom (Figur 4-16 og Figur 4-17). Man ser et tydelig skille mellom kl. 6 og 9 hvor Temp.(2.4 m) er litt lavere enn Temp.(2.2 m) kl. 9. Differansen er liten, maksimalt 0,3 °C, men er tydelig til stede. Se vedlegg A.28 til A.31 for oversikt over temperaturer 14. mars.

Man får også samme effekten av en hurtig temperaturøkning på tilluften som i de andre rommene med tilluftsventiler; de øverste målepunktene stiger raskt i temperaturnivå, de lavere stiger gradvis. Ulike hopp i temperatur kan skyldes f.eks. åpen dør inn til teknisk rom/vaskerom hvor varmetilskuddet kan være høyt. Et tilsvarende hopp i temperatur ved avtrekk i teknisk rom bekrefter dette (Vedlegg A.12)





Figur 4-16: Temperaturfordeling i kjellerstue 10. mars - Høyde(temperatur)



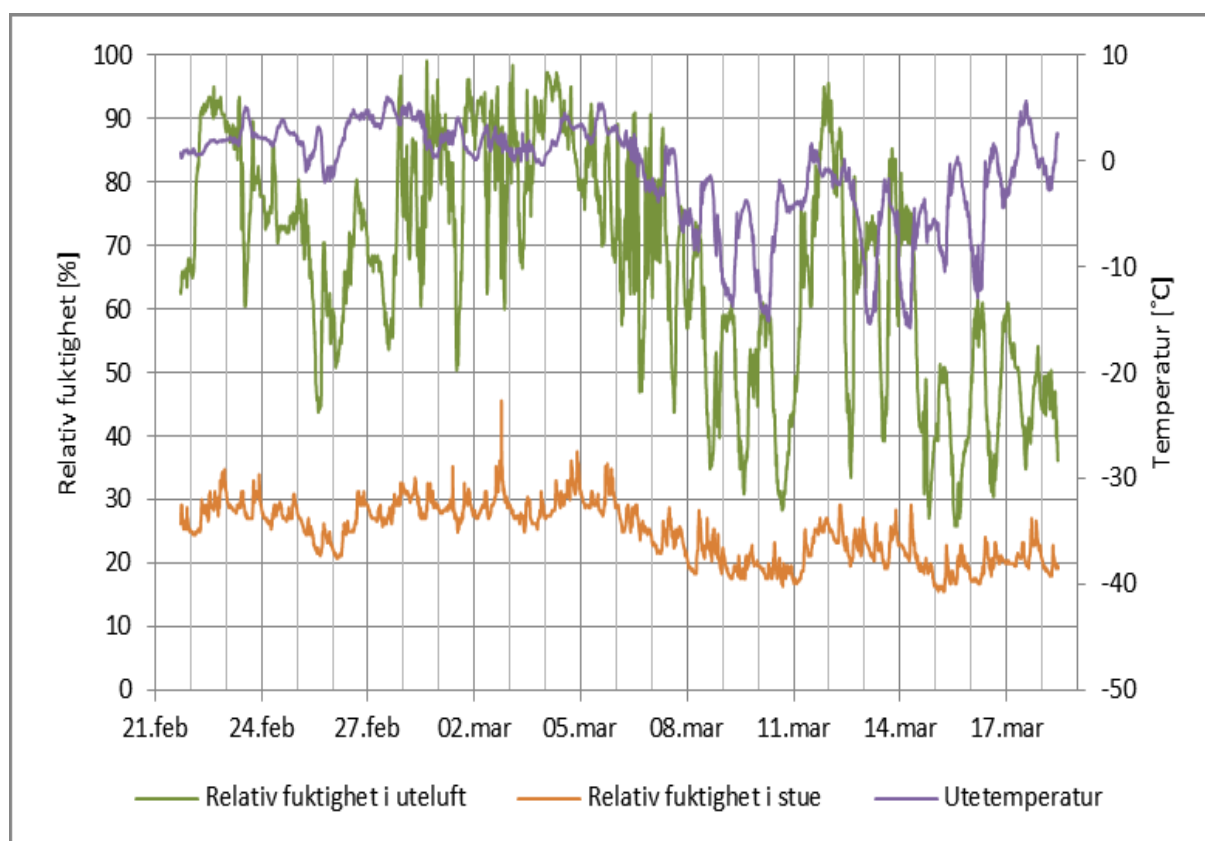
Figur 4-17: Temperaturfordeling i kjellerstue 10. mars - Temperatur(Tid)

#### 4.2.2 VI. Diagram: Relativ fukt

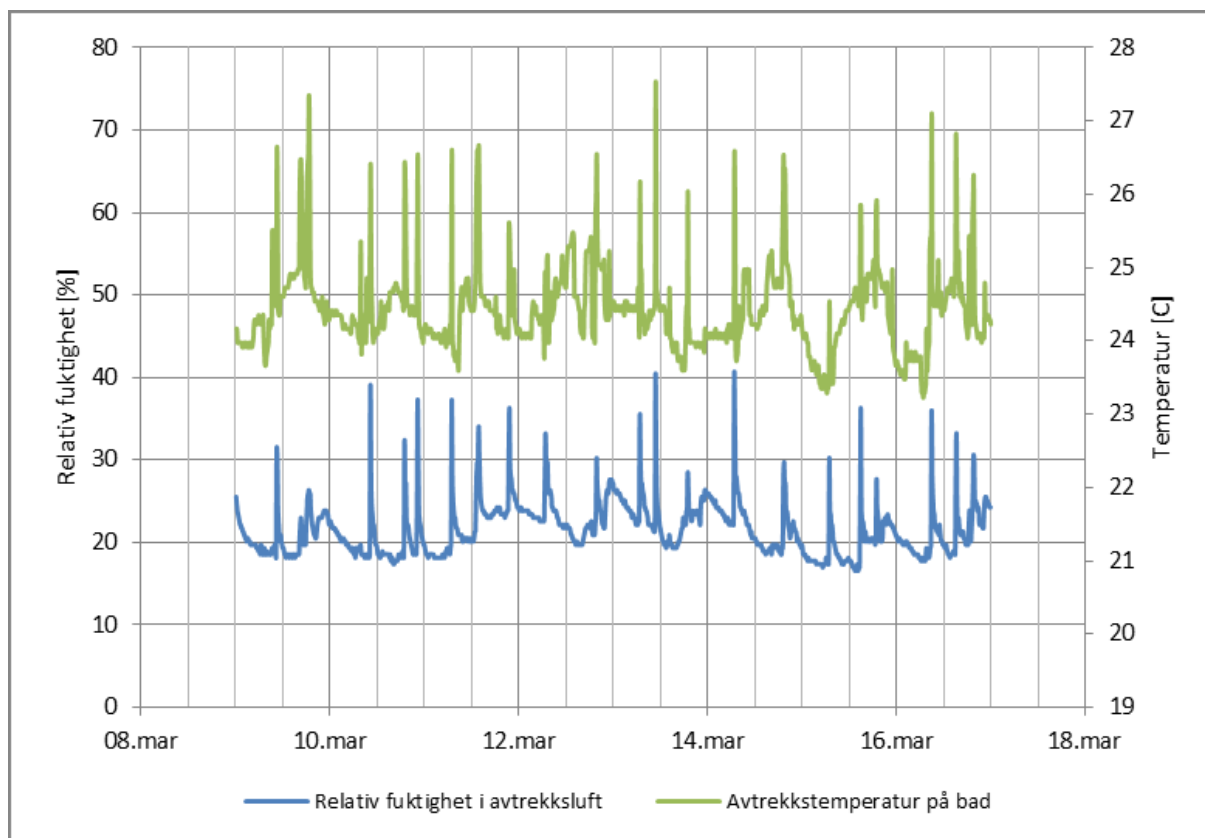
Relativ fuktighet i oppholdsrom skal helst ligge mellom 25 % (ved befuktning) og 60 % (ved avfukting). Det brukes ikke avfukting eller befuktning i boligene. Luftfuktighet mellom 15-20 % kan forårsake tørrhet i øyne og irriterte luftveier (NS-EN 15251, 2007).

Den relative fuktigheten i uteluften er lavest for siste del av måleperioden, som også er den kaldeste (Figur 4-18). Den relative fuktigheten i stuen blir målt til å være minimum 16 % i den denne perioden. Dette kan oppleves som for tørt, men det er ikke registrert klager fra beboerne. Se sammenligning med verdier for uteluftfuktighet fra eklime.no i vedlegg A. 10 og A. 11.

Fuktighetsnivået i avtrekksluften følger temperaturøkningen på badet (Figur 4-19). Man ser en tydelig økning relativ fuktighet for avtrekksluften når temperaturen stiger i avtrekket på bad. Dette skjer mest sannsynlig ved bruk av dusj.



Figur 4-18: Relativ fuktighet i uteluft og stue vs. utetemperatur



Figur 4-19: Relativ fuktighet i hovedavtrekk og avtrekkstemperatur på bad

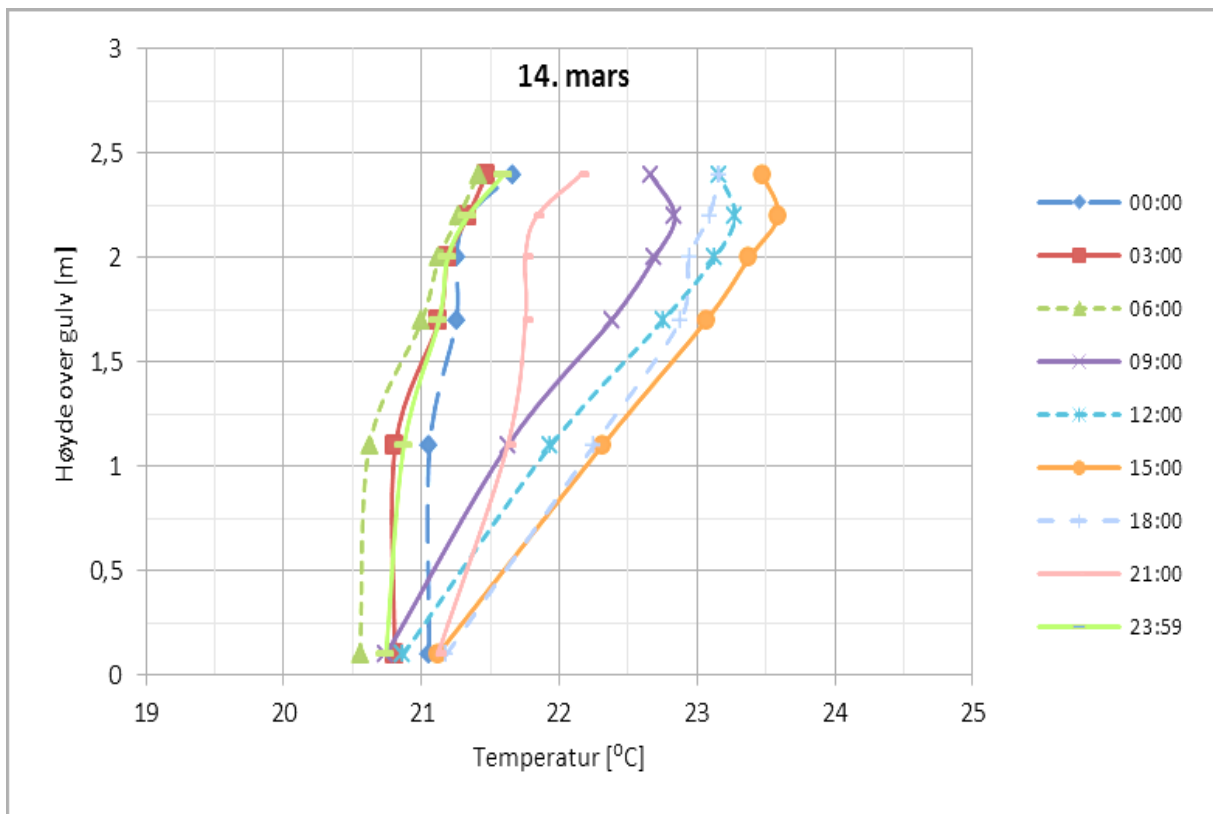
#### 4.2.3. Temperaturfordeling i referansehus; bolig 2 og 3

Det er gjort tilsvarende temperaturmålinger som i forsøkshuset i to referansehus, bolig 2 og 3. Det er brukt 4 målepunkt per vegg i referansehusene, mot 6 punkter i bolig 1. Høyden på punktene er 0.1, 1.1, 1.7 og 2.4 meter over gulv. Både bolig 1 og bolig 2 har aktive radiatorer under forsøket og disse er plassert på vegg i stuen. I vedlegg A. 13 illustreres bruk av radiatorer som den målte overflatetemperaturen på radiatorene mellom 9. og 14. mars. Se vedlegg A. 32 osv. for større figurer enn de som ses i avsnittene under.

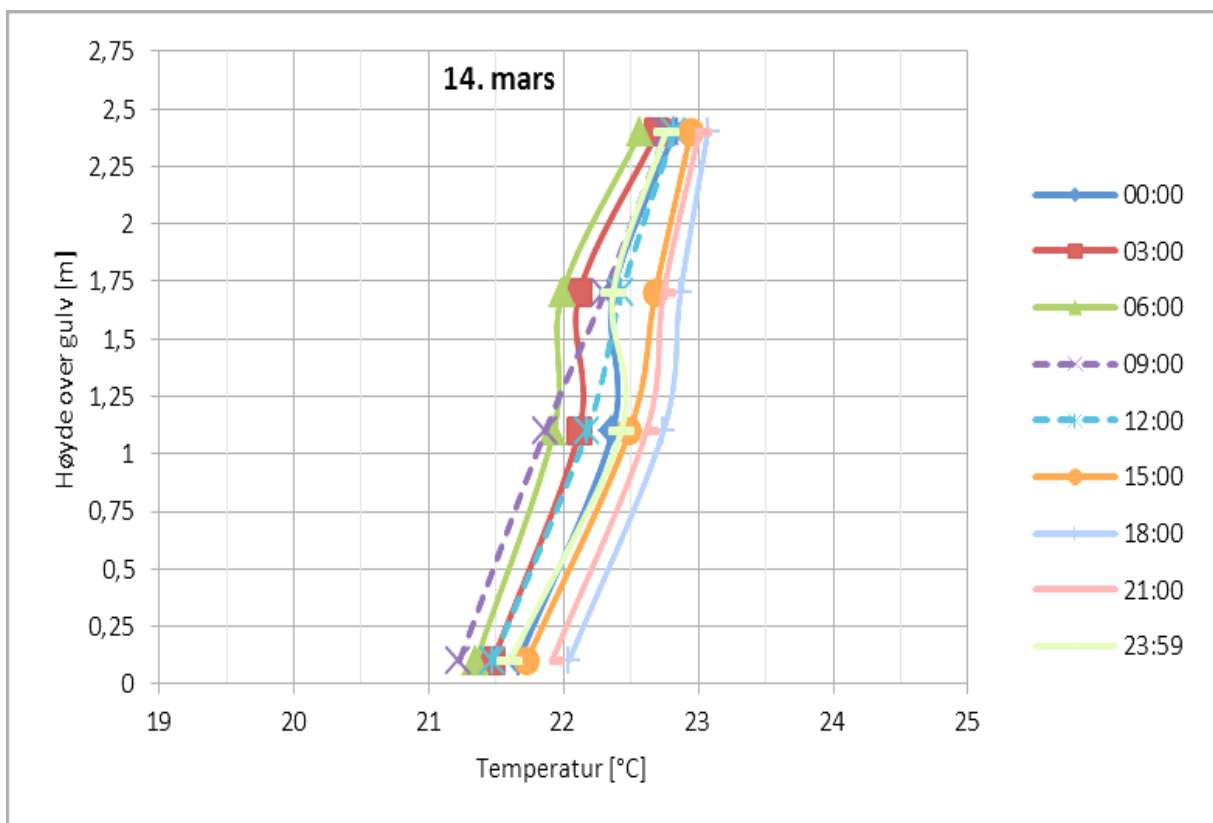
##### 4.2.3 I. Diagram: Temperaturfordeling i stue

Temperaturfordelingen for referansehusene har stort sett har mindre spredning langs temperaturaksen enn for bolig 1 (Figur 4-20, Figur 4-21 og Figur 4-22), både for 10. og 14. mars. Dette med unntak av kl. 15:00 i bolig 3 hvor romtemperaturen er generelt veldig høy. Kurvene for 10. mars er svært like kurvene for 14. mars (Vedlegg A.32 osv.)

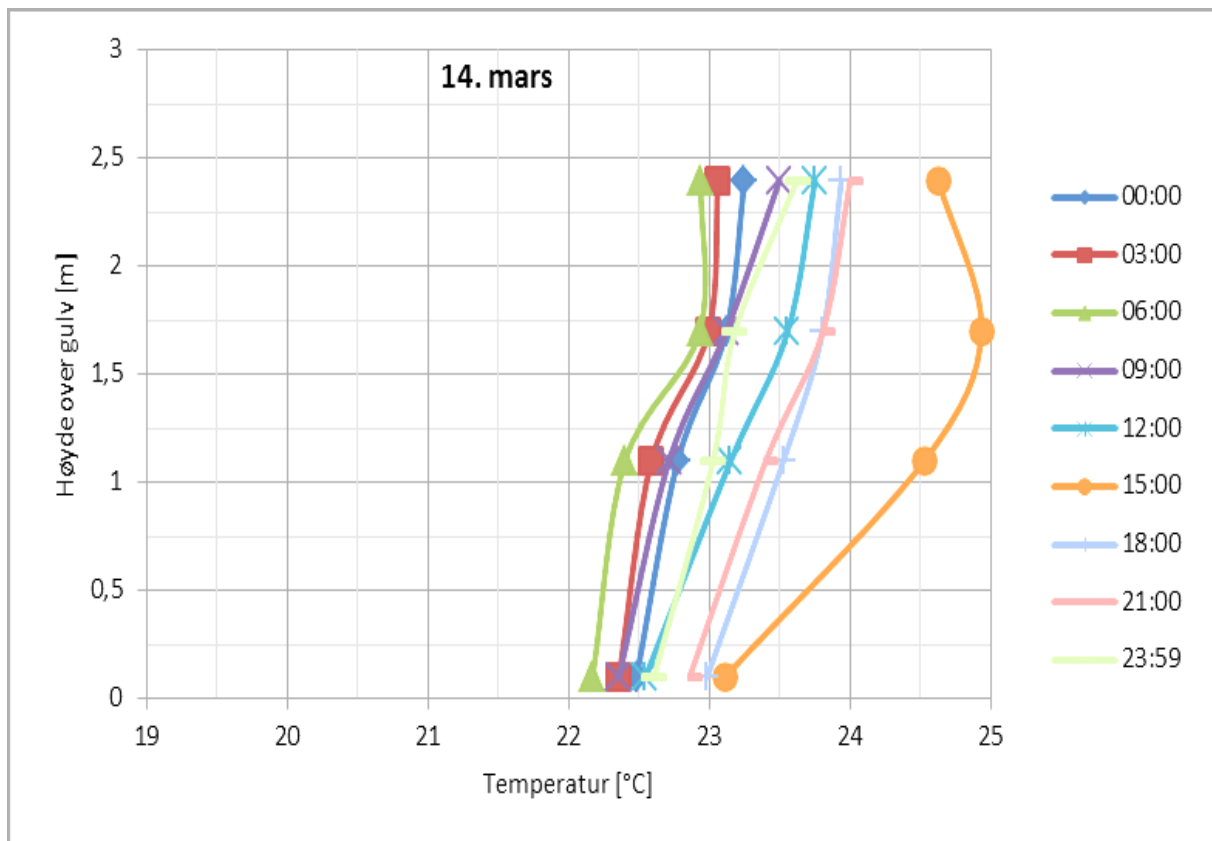
En oppsummering av maksimale «stående» og «sittende» temperaturdifferanser kan ses i vedlegg A. 15. Det er imidlertid viktig å huske på at de fleste av disse maksimumsverdiene er kortvarige og den generelle temperaturfordelingen i vedlegg gir et mer helhetlig bilde for hver enkelt bolig.



Figur 4-20: Temperaturfordeling i stue 14. mars - Bolig 1



Figur 4-21: Temperaturfordeling i stue 14. mars – Bolig 2



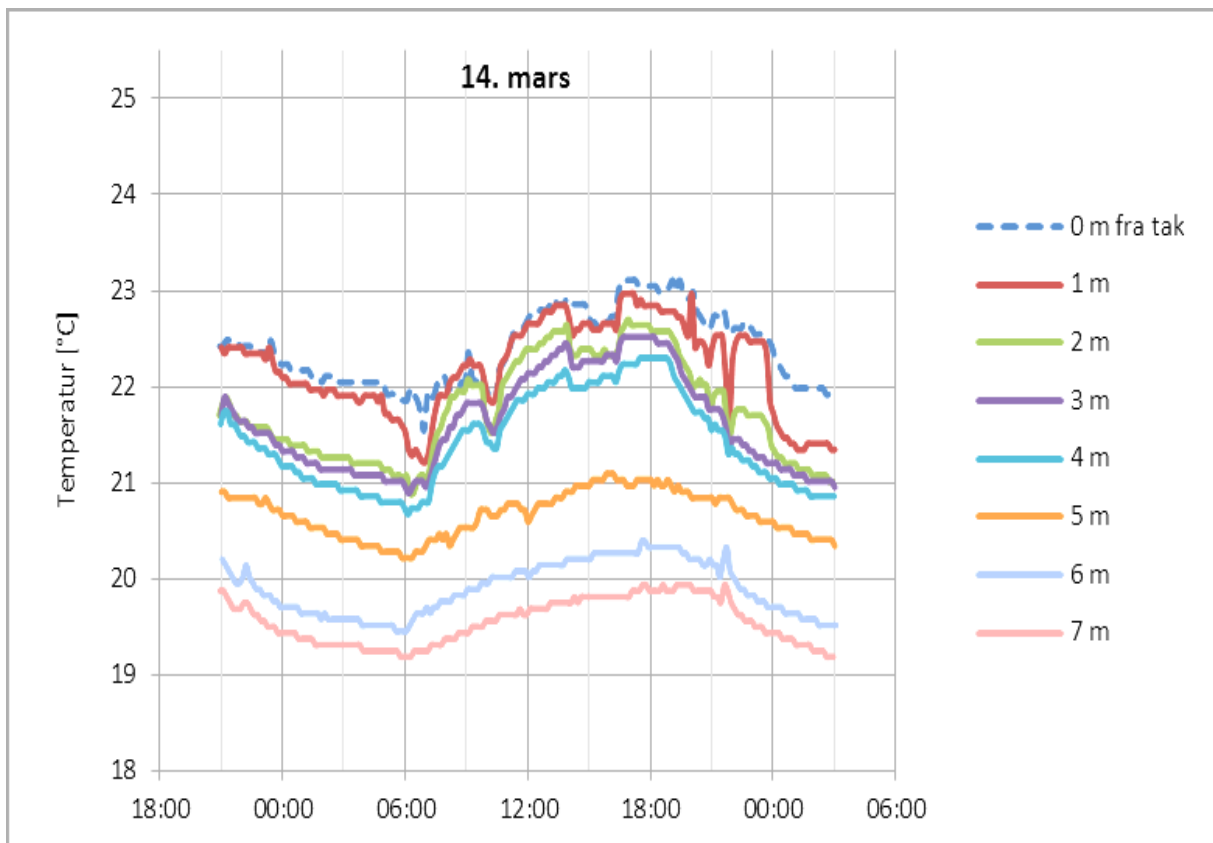
Figur 4-22: Temperaturfordeling i stue 14. mars - Bolig 3

#### 4.2.3 II. Diagram: Temperaturfordeling i trapperom

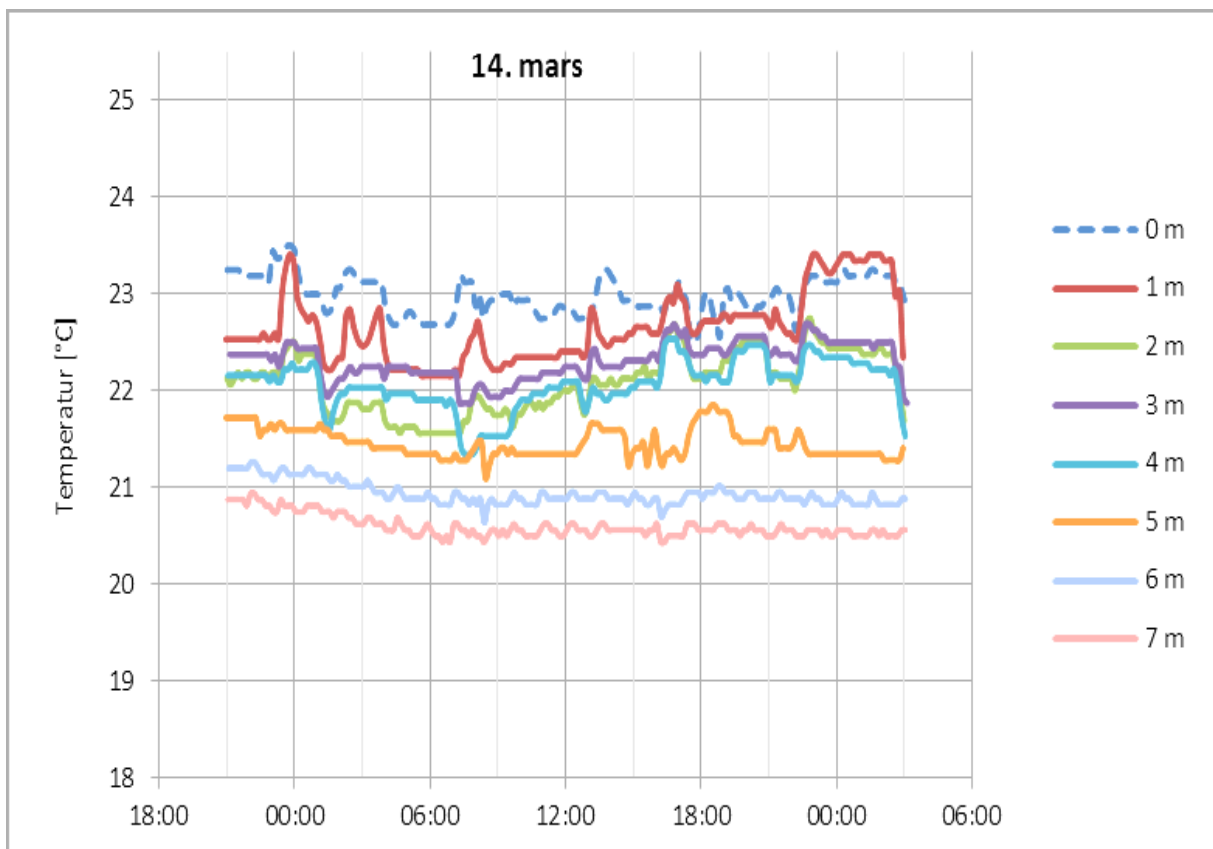
Det er også valgt å sammenligne temperaturfordelingen i trapperommet for alle boligene (Figur 4-23, Figur 4-24 og Figur 4-25). For diagram over temperaturfordeling både 10. og 14. mars, se vedlegg A.

Bolig 1 og 2 har ikke på radiator i kjeller under forsøksperioden og kun bolig 1 benytter kjellerstuen som oppholdsrom. Bolig 1 har likevel de laveste temperaturene i bunnen av trappen, ca. 19.2 °C. Sensor i stue kan være begrensende faktor. Dette så man at også var tilfellet i målinger fra kjeller. Bolig 2 har ikke de store svingningene i temperaturfordelingen mellom natt og dag, i motsetning til bolig 1 som har nattsinking. Bolig 2 har trappetemperaturer over 20.5 °C hele dagen og bolig 3 har temperaturer over 21.3 °C hele dagen.

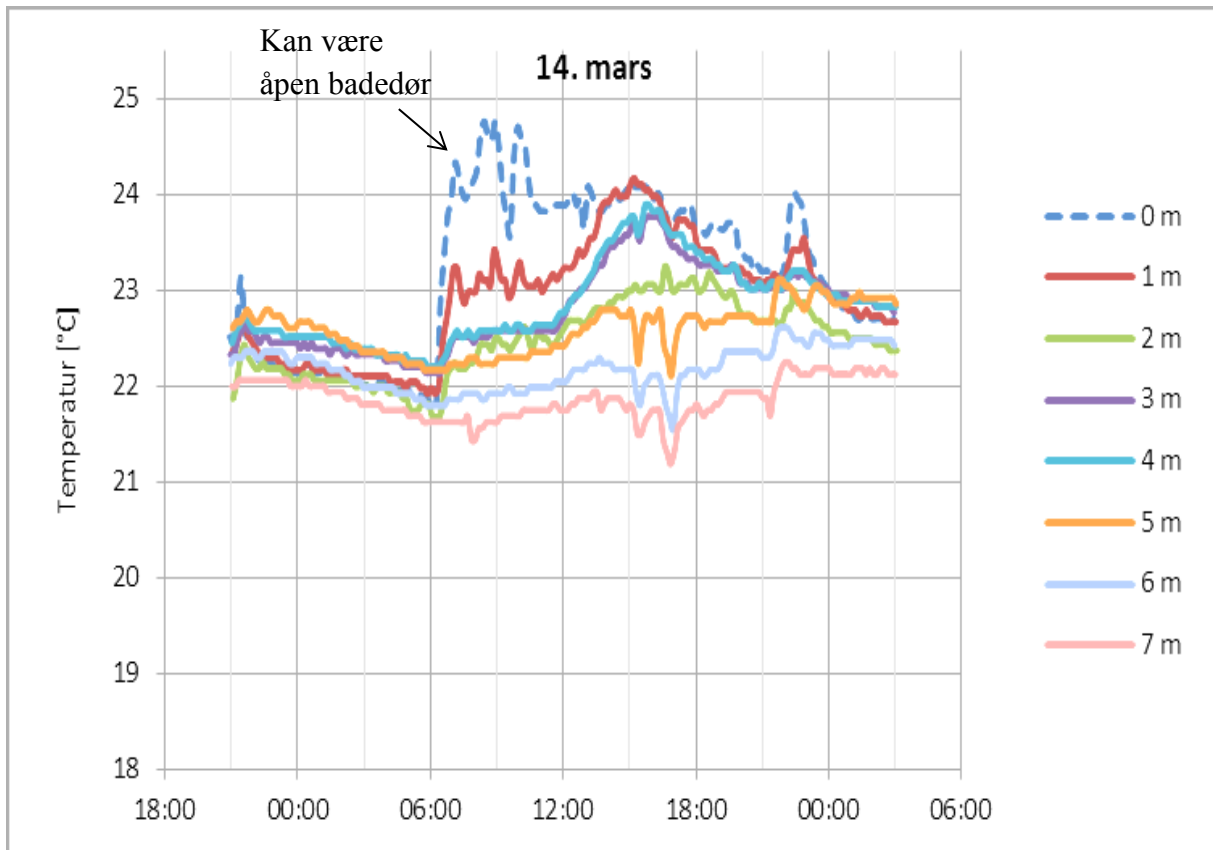
Det er generelt større temperaturforskjell mellom tak og gulv i trapperommet for bolig 1 enn for bolig 2 gjennom hele måleperioden, se vedlegg A. 52 og A. 53. Differansen holder seg likevel «jevn» på gjennomsnittlig 3 °C, mens den for bolig 2 varierer i større grad med utetemperaturen. Ved kjøligste utetemperatur veksler bolig 1 og 2 om å ha den største differansen. Temperaturene i de øverste punktene har de største svingningene og sjiktingen er mer tydelig i bolig 1 enn i 2 og 3.



Figur 4-23: Temperaturfordeling i trapp 14. mars - Bolig 1



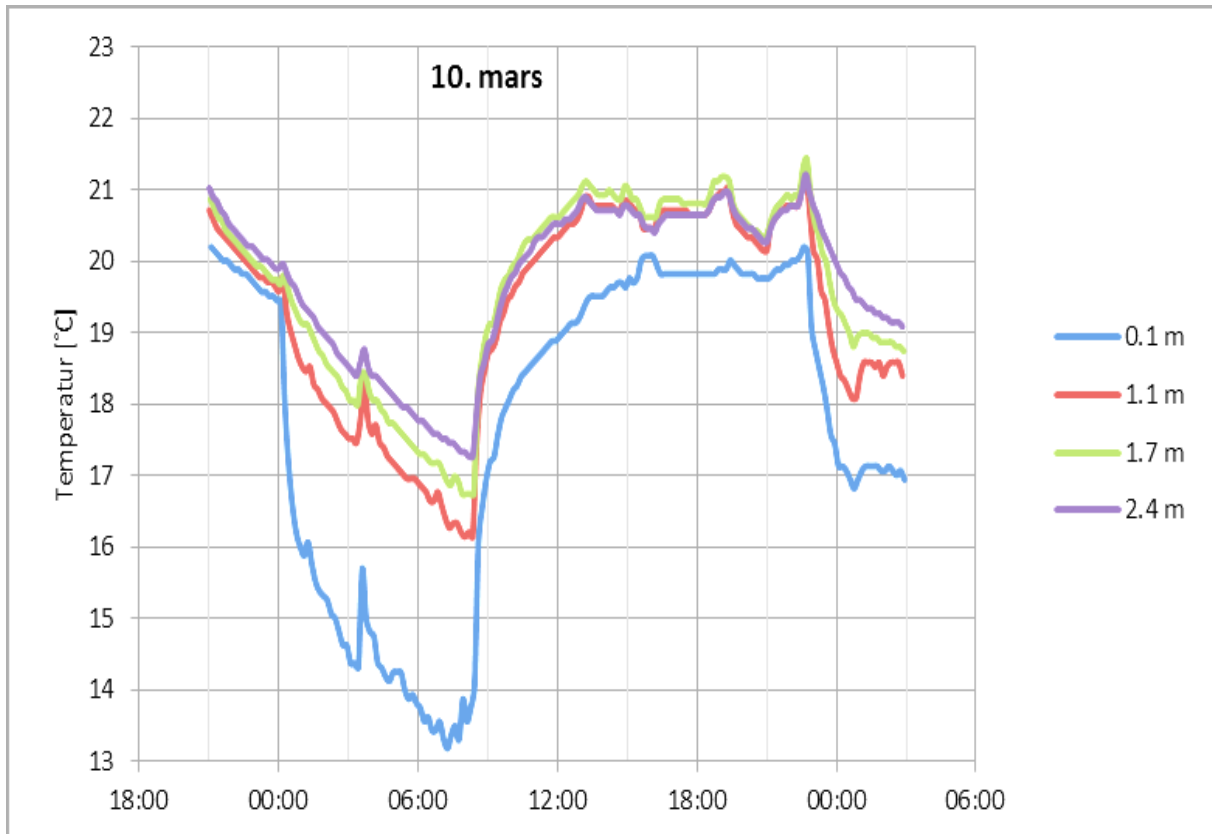
Figur 4-24: Temperaturfordeling i trapp 14. mars - Bolig 2



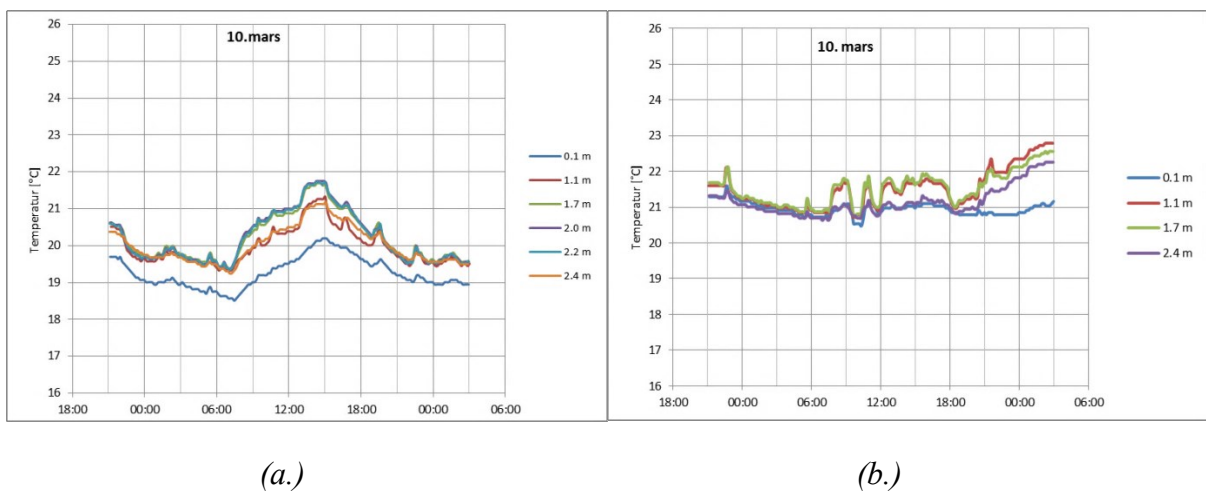
Figur 4-25: Temperaturfordeling i trapp 14. mars - Bolig 3

### 4.2.3 III. Diagram: Temperaturfordeling i soverom

Beboere i bolig 2 opplyste om hyppig bruk av vinduslufting på soverom, også i fyringssesongen (side 21). Dette kommer også frem fra figuren for temperaturfordeling på soverom, temperatur ved 0,1 meter er veldig lav begge dager og minimum 13,2 °C på morgenen 10. mars (Figur 4-26). Vær oppmerksom på at x-aksen er forskjøvet ned for bolig 2 i forhold til bolig 1 og 3. Større figurer for temperaturfordeling på soverom for boligene er lagt i vedlegg A. 25 og A. 50.



Figur 4-26: Bolig 2, temperaturfordeling soverom 10. mars



Figur 4-27: Bolig 1(a.) og 3(b.) - Temperaturfordeling i soverom 10. mars



#### 4.2.4. Effekt og energibehov

For å danne et bilde av nødvendig installert effekt er det gjort utregninger av denne basert på målte temperaturer i bolig 1. Dette fordi effekten ikke ble loggført direkte under forsøket. Ved oppvarmingen av luften regner man kun på følbare varme og utelater latent varme. Ligningen for luftens termiske effekt blir altså lik formel (4-1) (Nilsson, 2003).

$$\dot{Q}_s = \rho_a \dot{V}_a c_{p,a} \Delta T_a \quad 4-1$$

$$\dot{Q}_s = \text{Følbare termisk effekt, W}$$

$$\rho_a = \text{Lufttetthet} \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{V}_a = \text{Luftmengde, m}^3/\text{s}$$

$$c_{p,a} = \text{Spesifikk varmekapasitet for luft} \approx 1005 \text{ J/kgK}$$

$$\Delta T_a = \text{Temperaturdifferanse, K}$$

Det er antatt konstant varmekapasitet og tetthet for lufta. Inne i selve aggregatet, og like etterpå, er det plassert fire temperatur- og fuktighetsloggere av typen TinyTag (side 17). I følge kjøreplanen skal aggregatet (gjenvinner og 1.3 kW batteri) forvarme luften til 18 °C mellom kl. 06:00-21:00 (Tabell 4-3). Det eksterne varmebatteriet vil varme opp luften ytterligere mellom kl. 07:00-19.00 etter romtemperaturen i stuen.  $T_{\text{til},1}$  er tilluftstemperaturen mellom gjenvinner og 1.3 kW batteri og  $T_{\text{til},2}$  er tilluftstemperatur etter 3 kW batteri.

Varmegjenvinneren har en årsgjennomsnittlig temperaturvirkningsgrad på  $\eta_t = 83 \%$  i henhold til aggregatets datablad, men denne bør korrigeres etter målte temperaturer.

En sammenheng for overført varme i gjenvinner er lik (4-2).

$$\dot{Q}_{hx} = \dot{V}_{\text{til}} \rho_a c_{p,a} (T_{\text{til},1} - T_{\text{uteluft}}) = \dot{V}_{\text{fra}} \rho_a c_{p,a} (T_{\text{avtrekk}} - T_{\text{avkast}}) \quad 4-2$$

Dermed blir temperatur ut av gjenvinner lik formel (4-3):

$$T_{\text{til},1} = \frac{\dot{V}_{\text{til}}}{\dot{V}_{\text{fra}}} (T_{\text{avtrekk}} - T_{\text{avkast}}) + T_{\text{uteluft}} \quad 4-3$$

Mellom kl. 21-06 skal  $T_{\text{til},1}$  være maksimalt 15 °C og mellom kl. 06-21 skal den være maksimalt 18 °C, og en kan da beregne oppvarmingsbehovet i 1.3 kW batteriet, når  $T_{\text{til},1}$  ikke er tilstrekkelig høy, med ligning (4-4).

$$\dot{Q}_{1,3kW} = \rho_a \dot{V}_{\text{til}} c_{p,a} ([18^\circ\text{C eller } 15^\circ\text{C}] - T_{\text{til},1}) \quad 4-4$$

For å regne ut luftas oppvarmingseffekt i det eksterne varmebatteriet på 3 kW, benyttes ligning (4-5).  $T_{\text{til},2}$  er en målt verdi.

$$\dot{Q}_{3kW} = \rho_a \dot{V}_{\text{til}} c_{p,a} (T_{\text{til},2} - 18^\circ\text{C}) \quad 4-5$$

Virkelig temperaturvirkningsgrad regnes ut med ligning (4-6) (Sørensen, 1996).

$$\eta_t = \frac{\text{Realisert temperaturdifferanse}}{\text{Maksimalt oppnåelige temperaturdifferanse}} \quad 4-6$$

I dette tilfellet har man kun oversikt over temperaturdifferansen på avtrekksiden av gjenvinner. Uttrykk for temperaturvirkningsgrad blir dermed;

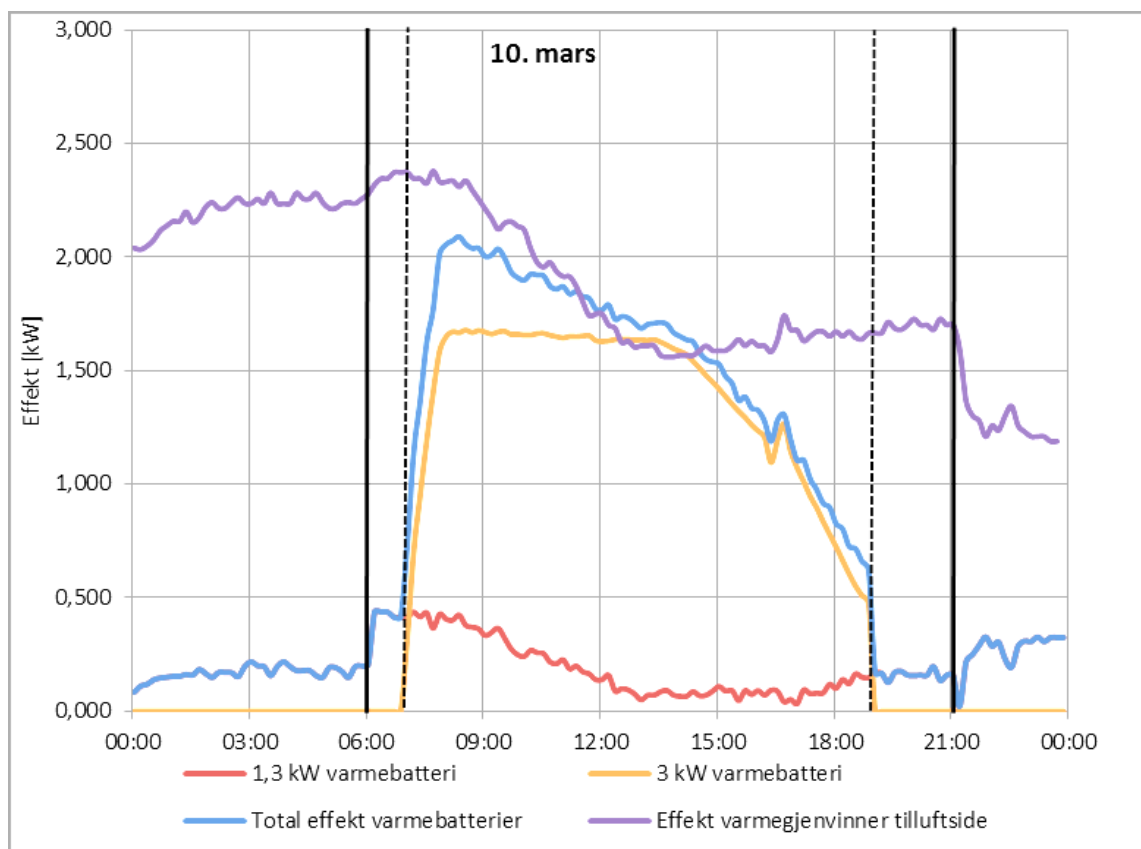
$$\eta_t = \frac{T(\text{avtrekk}) - T(\text{avkast})}{T(\text{avtrekk}) - T(\text{ute})}$$

Tilført varme til tilluft i varmegjenvinneren er gitt av ligning (4-7).

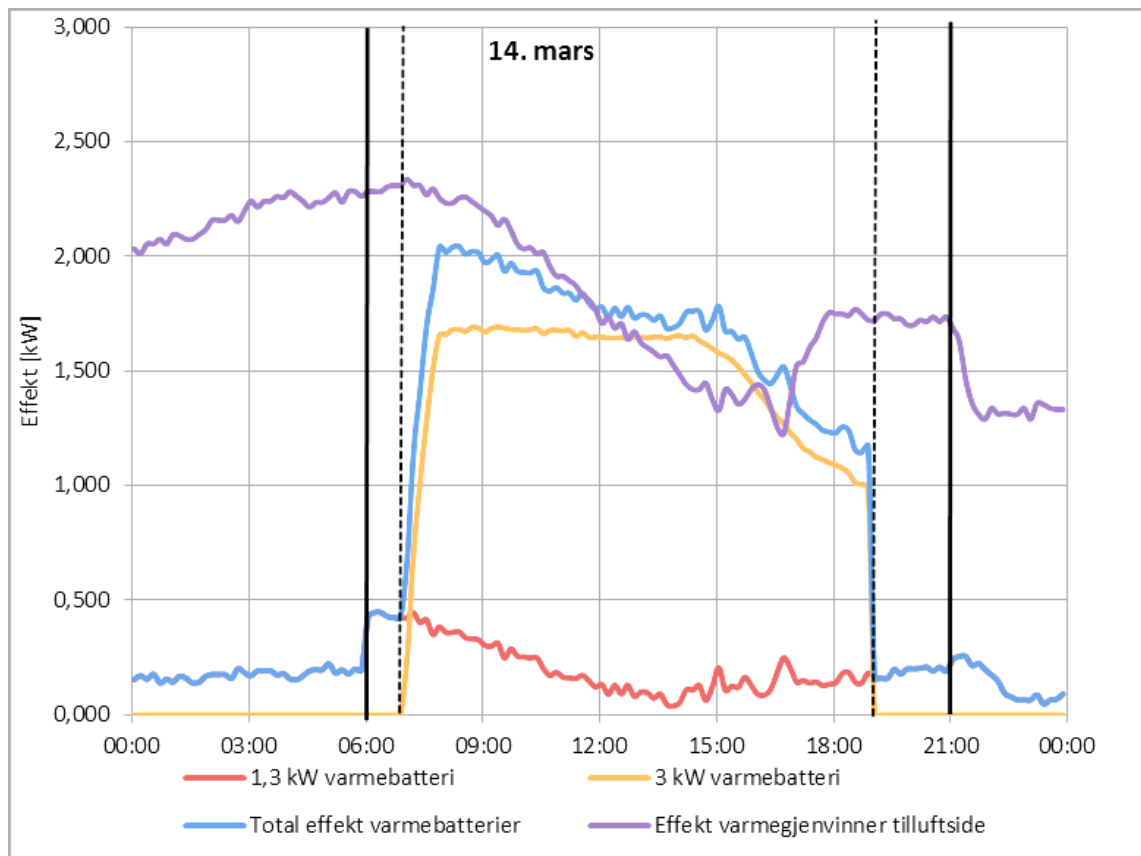
$$\dot{Q}_{hx,til} = \eta_t \rho_a c_{p,a} \dot{V}_{til} (T_{avtrekk} - T_{uteluft}) \quad 4-7$$

Resultatet fra utregningene ses i Figur 4-28 og Figur 4-29. Effektbehovet er størst like etter kl. 7 og minker gradvis utover dagen. Maksimalt totalt effektbehov fra varmebatteriene er omtrent 2.1 kW, begrenset av tilluftstemperaturen  $T_{til,2}$  og tilhørende settpunkt på 40 °C.

Kl. 6 øker effekten fra 1,3 kW varmebatteriet gradvis i omtrent en halv time, før tilluftstemperaturen har oppnådd 18 °C og effekten stagnerer på ca. 0,7 kW. Oppstart for 3 kW batteri kl. 7 gir en rask økning i effekt da tilluftstemperaturen er justert opp fra 18 °C til 40 °C. Omtrent kl. 8 begge dager stopper effektøkningen og kurven «3 kW» holder seg på ca. 1,7 kW, samtidig som kurven «1,3 kW», og dermed også «total effekt», gradvis synker. Stansen er forårsaket av temperaturbegrensningen på tilluften.



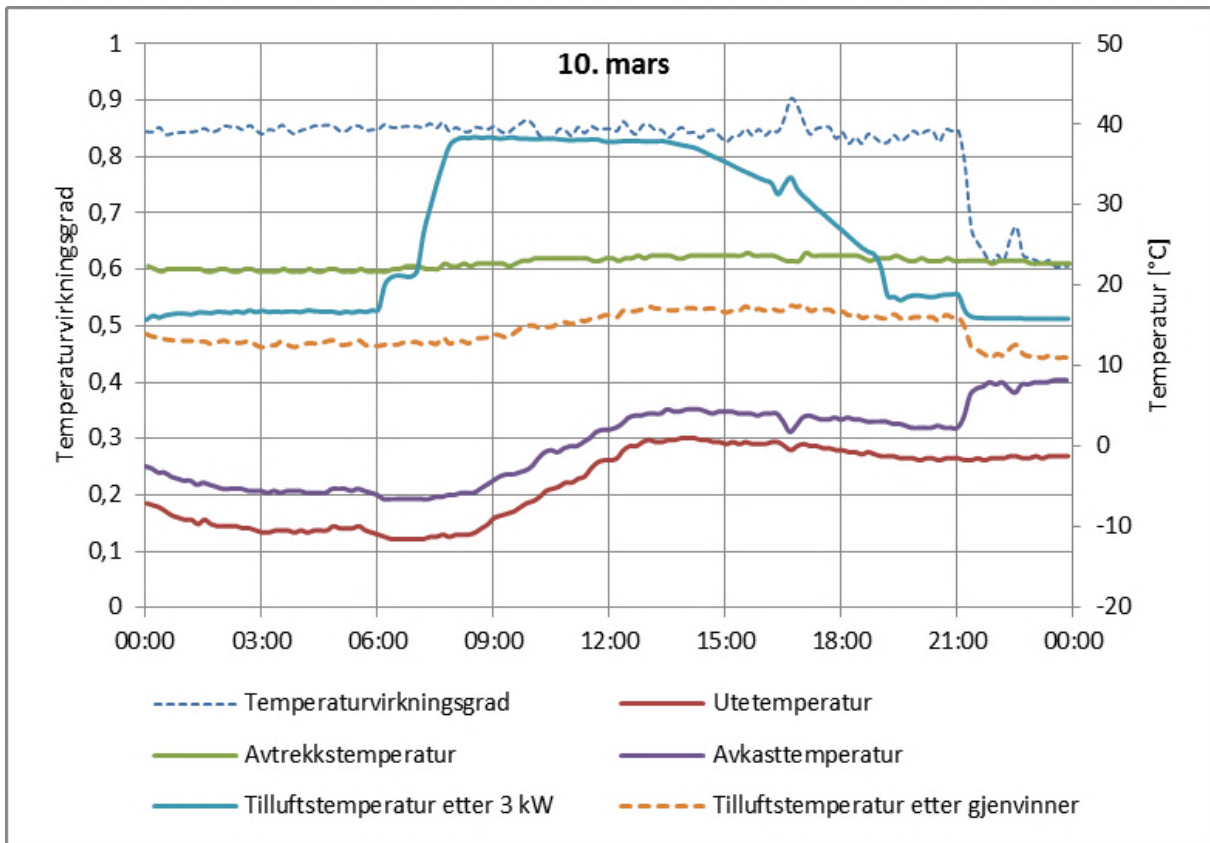
Figur 4-28: Effektbehov 10. mars



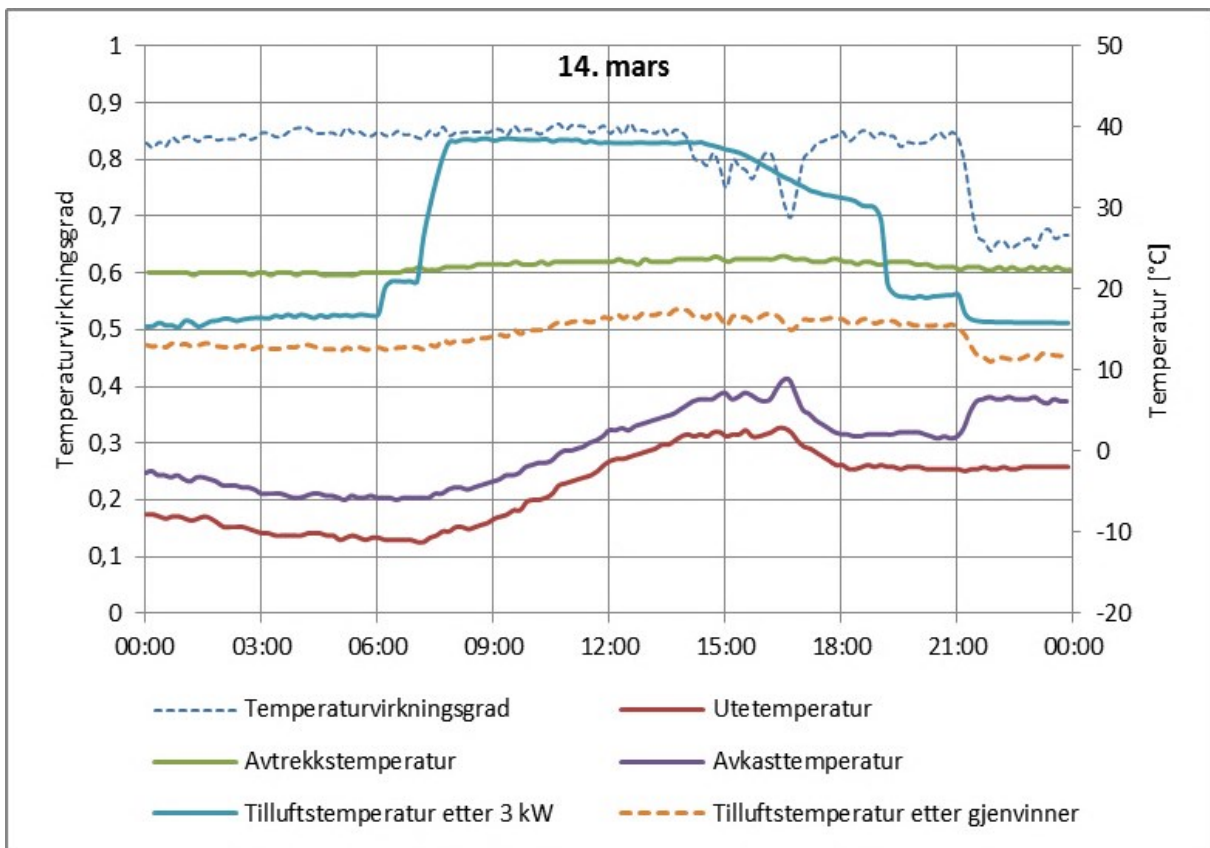
Figur 4-29: Effektbehov 14. mars

I Figur 4-30 og Figur 4-31 vises utregnet temperaturvirkningsgrad og ulike temperaturer før og etter aggregat. Omtrent kl. 13-14 synker varmeeffekten fra batteriet. Antakeligvis er stuetemperaturen opprettholdt og internlaster sørger for resterende oppvarmingsbehov. Kl. 19 stoppes 3 kW varmebatteri og settpunkt for tilluft justeres ned til 18 °C. Det interne 1,3 kW varmebatteriet får et hopp i effektavgivelse for å kompensere for stansing av 3 kW batteri, men synker raskt til omtrent 0,3 kW, som er tilstrekkelig for å holde 18 °C.

Tilluftstemperaturens settpunkt senkes fra 18 til 15 °C kl. 21:00. Dermed reguleres gjenvinner ned og tilluftstemperaturen etter gjenvinner synker. Men utregnet tilluftstemperatur etter 1,3 kW batteri blir lavere enn 15 °C, og da øker utregnet effektbehovet fra dette batteriet. Det antas at det i virkeligheten vil være gjenvinner som oppfyller dette varmebehovet slik at ytterligere oppvarming fra varmebatteri ikke er nødvendig på natten. Dette skal sekvensstyring av gjenvinner og batteri sørge for.



Figur 4-30: Temperaturvirkningsgrad og lufttemperaturer i aggregat 10. mars



Figur 4-31: Temperaturvirkningsgrad og lufttemperaturer i aggregat 14. mars

## 4.3. Analyse av resultater og feilkilder

### 4.3.1. Feilkilder

Målerne som er brukt i forsøket er iButton DS 1922L-F5# og TinyTag Plus 2 TGP-4500. iButton har en usikkerhet på  $0,5^{\circ}\text{C}$  ved temperaturer mellom  $-10$  og  $+65^{\circ}\text{C}$  og en usikkerhet på  $+0,65$  og  $-0,5^{\circ}\text{C}$  mellom  $-15$  og  $10^{\circ}\text{C}$ . TinyTag har en usikkerhet på  $0,65^{\circ}\text{C}$  ved temperaturer mellom  $-10$  og  $+70^{\circ}\text{C}$ . Usikkerheten for fuktighetsmålinger er  $3\%$  ved temperaturer mellom  $-40$  og  $60^{\circ}\text{C}$ .

Det kan se ut som at bolig 3 har generelt høyere romtemperaturer enn bolig 1 og 2 (side 37-39). Den har en høyere personlast og også en høyere temperatur på radiator i stue, både 10. og 14. mars, enn bolig 2 (Vedlegg A.13). Dette kan være med på å forklare det høye temperaturnivået. Det er viktig å merke seg at i bolig 3 er trapperommet åpent ned til kjelleretasjen hvor det også er et inngangsparti, et soverom, bod og teknisk rom. Det er mulig at det derfor genereres mer varme i denne kjelleren enn i 1 og 2. Forskjellene i personlast og planløsning mellom bolig 1 og 3 kan gjøre det vanskelig å trekke ut sammenhenger fra målerdata. Bolig 2 er antakeligvis en mer sammenlignbar referansebolig. Det er likevel valgt å ta med data fra bolig 3 i analysen.

Temperaturmålingene før og etter gjenvinner er utført med kun ett målepunkt, noe som kan bidra til en mer unøyaktig måling. Loggere ble i tillegg plassert liggende i aggregat og hengende i kanal. Dette vil ikke gi et nøyaktig snitt av temperaturen.

I utregning av virkelig temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner er det benyttet konstante verdier for luftens tetthet og varmekapasitet, selv om disse endres med temperaturendringer.

Det er ikke tatt hensyn til eksfiltrasjon/infiltrasjon gjennom bygningskropp og massestrøm gjennom renblåsningssone i gjenvinner med tanke på luftmengder som er benyttet i utregninger. I virkeligheten vil en større ubalanse i luftmengde kunne føre til lavere temperaturvirkningsgrad (Petersen, et al., 2009).

Bruk av kjøkkenhette er ikke tatt med i betraktningen, hverken for temperaturnivå eller effektberegning. Det er usikkert i hvor stor grad dette vil ha betydning for analysen av resultatene, men det antas at denne er i bruk i en kortere periode av dagen.

Det var en viss likhet i brukermønster for alle 3 boliger. I alle boligene var det én voksen og minimum ett barn hjemme på dagtid på hverdager. Dersom dette ikke hadde vært tilfelle og boligene hadde fått lavere internlast på dagtid, ville man kunne få en utfordring med utilstrekkelig oppvarming av huset på ettermiddagen etter en lengre periode med fravær.

Som tidligere vist gir utregningene av effektbehovet til oppvarmingen en økning i  $1.3\text{ kW}$  batteriet ved nattsinkingen samtidig som at varmegjenvinneren reguleres ned (side 42). Det antas at denne reguleringen foregår annerledes i praksis og at gjenvinner dekker nødvendig effektbehov før  $1.3\text{ kW}$  batteriet benyttes. Reguleringen av gjenvinner og varmebatteri skjer i sekvens, slik at varmebatteriet ikke bidrar unødvendig. Usikkerheten ved utregning av bl.a. temperatur  $T_{\text{til},1}$  etter gjenvinner kan føre til at utregnet verdi er lavere enn i virkeligheten, når

den mest sannsynlig er høyere eller lik 15 °C. Dermed vil man i realiteten se at gjenvinneren klarer å dekke hele behovet på natten og at varmebatteriet er avslått.

### 4.3.2. Analyse

I perioden med kaldeste utetemperaturer opplevde beboerne i bolig 1 at det i noen timer på morgenen var litt for kaldt i huset. Settpunktstemperaturen fra aggregatet ble satt til å være 15°C fram til kl. 6 på morgenen etter beboernes ønske. Det eksterne varmebatteriet ble ikke satt i drift før kl. 7. Når beboerne sto opp kl. 6 tok det altså litt for lang tid før ønsket romtemperatur ble oppnådd. Dette kan løses med å regulere timeplanen for aggregatet med f.eks. én time tidligere igangsetting av oppvarmingen.

På grunn av plasseringen av avtrekksventil i kjøkkentak, var det mistanke om kortslutningsventilasjon fra tilluftsventil, som er plassert like i nærheten. Man ser at temperaturen i avtrekket ikke er vesentlig høyere enn målingene av temperaturgradient i stue. Avtrekkstemperaturen er maksimalt lik 24 °C når tilluftstemperaturen er på sitt høyeste, 35°C (side 27). Dette kan tolkes som at det ikke er betydelig kortslutning og at man får god spredning av varmluften før den når avtrekket.

I utgangspunktet bør man ikke ha avtrekk i samme rom som det tilføres luft ved varmluftsoppvarming, men i stedet benytte strømning under dør-spalt for avtrekk i et annet rom. Dette er gjennomgått i kapittel 2 (side 5). I tillegg gir aktuell tilluftsventil mulighet for å justere retning på den radielle luftstrømmen bort fra avtrekkets plassering, en innstilling som var i bruk under måleperioden. Dette kan ha betydning for avtrekkstemperaturen. Temperaturmålingene tyder på at man ikke fikk en vesentlig kortslutningsventilasjon med avtrekk i tak men at tilluft og romluft blandes godt før avtrekk. Dette kan bety at det ved periodevis behov for å ha åpne dører, ikke vil bli en økt risiko for kortslutningsventilasjon dersom tilluften ikke føres direkte mot åpen dør. Det er likevel ikke en teori som har vært grundig studert i denne sammenhengen.

Maksimalt utregnet effektbehov fra varmebatteriene viser seg å være omtrent 2.1 kW og maksimalt installert effekt er 4.3 kW (side 42). Det totale effektforløpet øker kraftig fra kl. 7 når det eksterne varmebatteriet settes i drift, for deretter å gradvis synke frem til kl. 19 på kvelden, når 3 kW-varmebatteriet stenges av. I et nytt anlegg vil man ideelt sett kun installere ett enkelt varmebatteri som står for oppvarmingen av luften. Som man ser fra dataene er det ikke installert effekt som er begrensende faktor, men maksimal tilluftstemperatur. Spørsmålet er om denne er tilstrekkelig for dimensjonerende forhold og dette vil undersøkes senere i rapporten (kapittel 5.3.2).

For bolig 2 og 3 er temperaturgradienten stort sett mindre enn for bolig 1 på dagtid, med unntak av plutselige endringer i temperaturer (side 39). Disse er sannsynligvis forårsaket av f.eks. åpning av ytterdør eller dør mot badrom. Lufttemperaturen i enkeltrom kan dermed oppleves jevnere enn i bolig 1, selv om denne også holder seg innenfor komfortkravet på 3°C. Bolig 1 ser også ut til å ha en større temperaturgradient i trapperommet og maksimal differanse er gjennomsnittlig 3°C hele måleperioden. For bolig 2 som varmes opp av radiator varierer differansen i større grad med utetemperaturen (vedlegg A.52).

I bolig 1 kan det se ut som at temperaturloggere ved tak registrerer en nedkjøling av taket grunnet nattsinkingen (Figur 4-6). Mellom kl. 9-15 oppstår det en liten temperaturredifferanse mellom sjikt i høyde 2.2 meter og 2.4 meter, hvor temperaturen ved 2.4 meter er lavere enn ved 2.2 meter. Denne differansen på mellom 0,25-0,75 °C kan få en innvirkning på strømningsbildet i rommet, dersom luften nærmest taket blir tilstrekkelig nedkjølt og det skjer en utskiftning i det øverste luftlaget. Det er mulig at denne effekten kan bidra til en jevnere omrøring i rommet ved et kritisk tidspunkt; når tilluften er på sitt varmeste tidlig på morgenen. Denne hypotesen er derimot ikke studert nærmere.

I bolig 1 ser man hvor stor innvirkning varmetap i kanal har å si på endelig tilluftstemperatur. Tilluften til stue og kjellerstue minker 2-3 °C på dagen og øker 1-2 °C på natten. Temperaturen på luften til soverommet minker 7 °C på dagtid (Figur 4-4). Soverommet benyttes ikke som oppholdsrom på dagtid og har dermed et lavt oppvarmingsbehov. Ventilasjonskanalen som går til soverommet passerer kjøkken/stue, WC, trappeoppgang og gang i 2. etasje før den når soverommet. Store deler av varmetapet i kanalstrekket vil overføres til resten av boligen og kan bidra til en utjevning av temperaturen i hele boligen. Det kan også føre til at rom langs kanalstrekket får uønsket oppvarming. Men ulempen er at tilluften på vei til soverommet på natten, tar opp varme fra omgivelsene og tilluftstemperaturen øker 3 °C. Varmetilførselen i kanalen til soverommet er ugunstig da det er soverommet som er grunnen til ønsket om nattsinking.

Målinger for tilluftstemperatur ut av ettervarmebatteri i bolig 1 er ikke som forventet. Som nevnt oppnår aldri temperaturmålingen maksimalt settpunkt, men holder seg konsekvent 2-3°C lavere. Dette kan ha flere årsaker. Temperaturmålerens usikkerhet er på omtrent 0,65 °C og dette vil ikke være hele årsaken. Men det er mulig at varmetapet fra det uisolerte kanalstrekket mellom måler og varmebatteri er stort nok til å forklare dette avviket. Avstanden fra batteri til måler ble valgt av praktiske årsaker og i ettertid ser en at denne burde kortes ned dersom mulig og at kanalstrekket burde isoleres for nøyaktige målinger og minimalt varmetap.

Man kan merke seg at utetemperaturen stiger relativt kraftig mellom kl. 6 og 12 på de kaldeste marsdøgnene, omtrent 10°C stigning. Fordi målingene utføres sent på vinteren, vil solen ha større effekt på dagtemperaturen i mars enn i januar. Senere i rapporten undersøkes forhold uten solinnskudd og med en jevn, lav utetemperatur gjennom hele døgnet (kapittel 5.3.2).

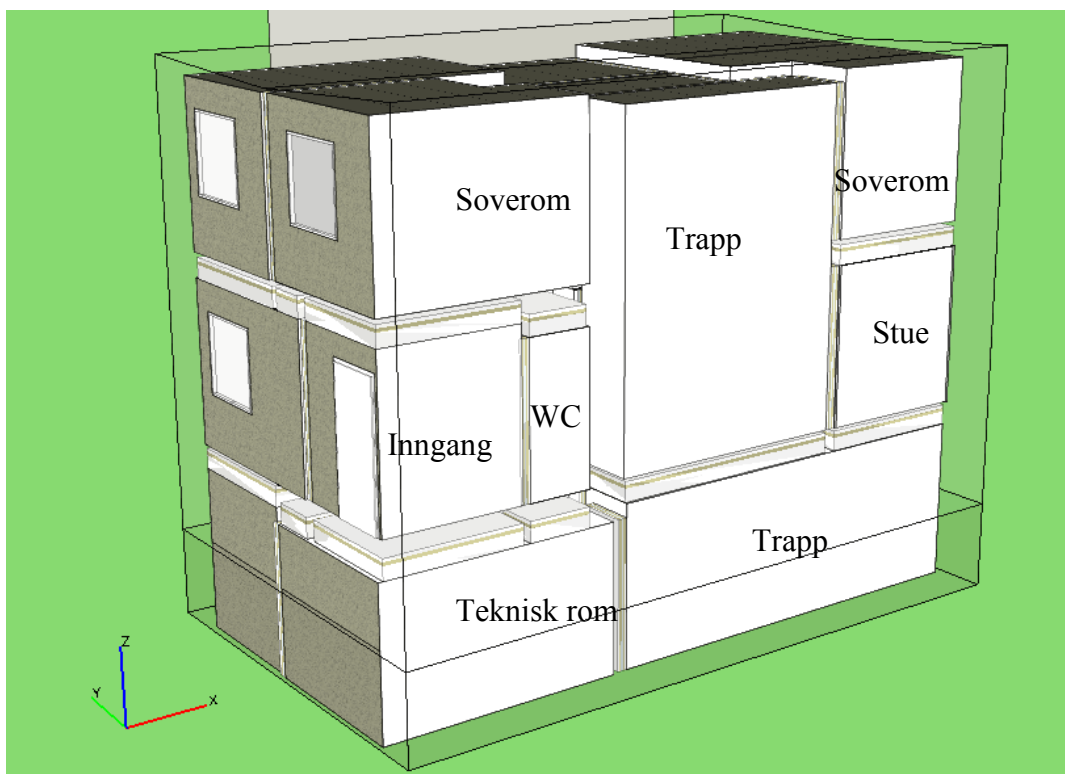
## 5. Simulering i IDA ICE 4.5

Det skal gjennomgås temperaturnivå og effektbehov i forsøkshuset fra kapittel 4 for simuleringer under lignende forhold som i forsøksperiode og for dimensjonerende utetemperaturer. Det vil, under dimensjonerende forhold, undersøkes konsekvenser av forsering av luftmengder, endret tilluftstemperatur, endret nattsenkingsstrategi, bruk av ovn som spisslast og endret reguleringstimeplan. I resultatene fokuseres det på gjennomsnittlig lufttemperatur, som er regulerende temperatur, og ikke operativ temperatur. Simuleringsverktøyet som benyttes er IDA ICE 4.5.

### 5.1. Om IDA ICE 4.5

IDA Indoor Climate and Energy er et simuleringsverktøy for energi- og inneklima som benyttes til å beregne bygningers ytelse. IDA ICE er utviklet av EQUA Simulations AB. Programmet er et "transparent" program med åpen kildekode men har samtidig et brukervennlig grensesnitt. IDA er kompatibel med diverse filtyper som kan brukes når en definerer bygningskroppen; bildefiler, DWG- og IFC-filer. IFC-filer bærer i tillegg informasjon om hvilke materialer bygget inneholder og dette kan også importeres til IDA.

IDA ble valgt som simuleringsverktøy for denne oppgaven på grunn av mulighet til detaljstyring av bl.a. aggregat og mulighet til overvåking av temperaturer i alle soner og nødvendige tilluftstemperaturer for å dekke varmebehov. I utgangspunktet skulle også IFC-kompatibiliteten utnyttes, men etter problemer ved import av IFC-fil ble det valgt å i stedet tegne bygningen i programmet SketchUp.



Figur 5-1: 3D-modell av rekkehus i IDA ICE



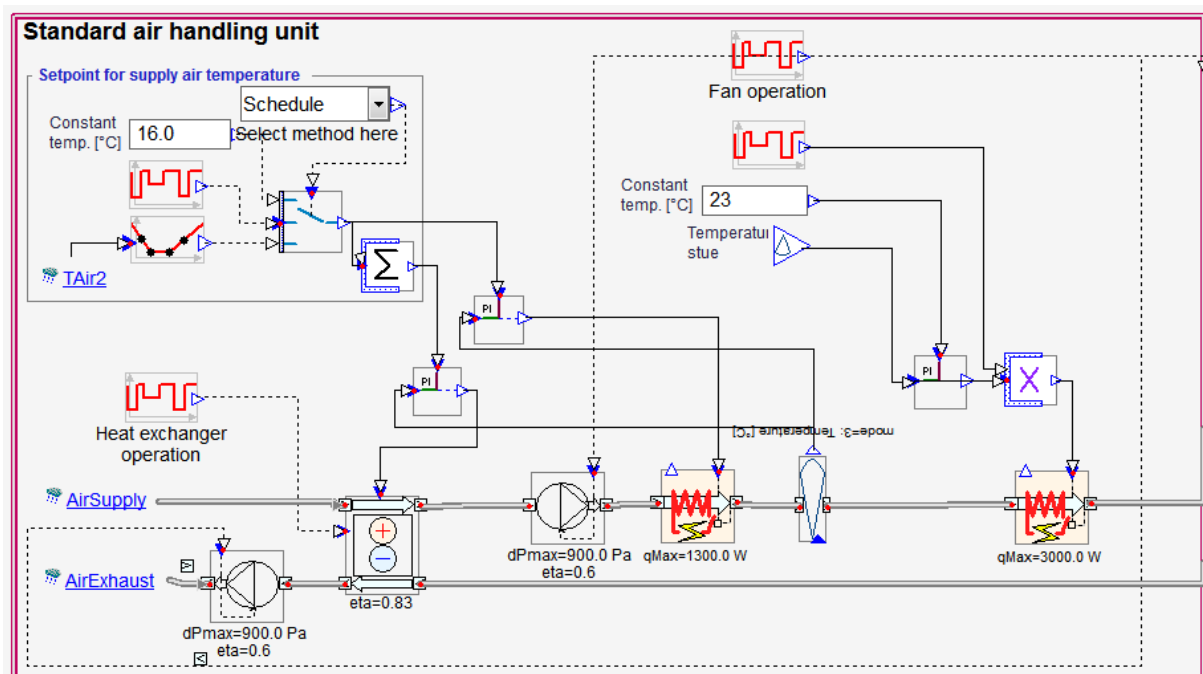
## 5.2. Input-verdier og forenklinger

### 5.2.1. Bygningskropp og energibruk

En forenklet modell av bygningskroppen er laget i SketchUp og importert til IDA. Plantegninger av hver etasje i PDF-format er brukt som tegningsunderlag for inntegning av soner (vedlegg A.4 til A.6). Siden boligen er et rekkehus er det valgt å kun legge inn soner i selve forsøksboligen og simulere at det er oppvarmede soner på langsiden (Figur 5-1). Innvendige dører er modellert som åpninger uten dør (avsnitt 3.1.4). Kravspesifikasjoner er hentet fra energikonsept (Tabell 4-2). Det er benyttet standard veggkonstruksjoner fra IDA-databasen men disse er modifisert for å oppnå riktig U-verdi.

### 5.2.2. Aggregat og styring

Det er lagt inn et standardaggregat fra IDAs database og det er gjort små modifiseringer for tilpasning til forsøkshus (Figur 5-2). Varmegjenvinner og varmebatteri styres av en PI-regulatorer som henter signal fra temperaturføler etter 1.3 kW-varmebatteri. Temperaturen her har et settpunkt på 18 °C på dagtid og 15 °C på natten, se avsnitt 4.1.2. En PI-regulator benyttes også til styring av det eksterne 3 kW-varmebatteriet. Regulatoren henter inn temperatur fra romføler i stue. IDA vil ikke klare å modellere temperatursjiktning i enkeltsoner og den gjennomsnittlige temperaturen i rommet er antakeligvis lavere enn 23 °C, som er settpunkt i forsøkshuset. Settpunktet for stuen settes derfor til 22 °C i IDA, se avsnitt 4.1.3. Minimal avkasttemperatur ut fra gjenvinner er satt til -6 °C da dette var laveste målte verdi under forsøket.



Figur 5-2: Aggregat i IDA

Det er benyttet målt tilluftsmengde fra forsøkshus i simuleringene og avtrekksmengden er balansert opp mot denne (kapittel 4.1.1). Total tillufts- og avtrekksmengde i IDA er altså 245 m<sup>3</sup>/h.

### 5.2.3. Internlaster og varmetap

Det er satt sammen fem ulike timeplaner for tilstedeværelse; dag, stort soverom (voksen), soverom (barn), tilstedeværelse for bad og driftstid for belysning, utstyr ol. (vedlegg B.1 til B.5). Varmetilskudd fra belysning, utstyr og personer er beregnet fra anbefalte verdier (NS 3700, 2010).

Varmetap for varmedistribusjonsanlegget kan i IDA velges fra en skala med alternativer «none», «good», «typical», «poor» og «very poor». Det er valgt innstillingen «good» for alle parametre (Tabell 5-1). Det er valgt at 50 % av hvert varmetap går tilbake til sonene og fordeles etter sonenes gulvareal. Varmetapet fra tilluftskanaler omfatter både konduksjonstap og lekkasjer og gjelder for en temperaturdifferanse på 7 °C mellom aggregat og soner. Ved andre temperaturdifferanser beregnes tapet ut fra innhentede verdier av tilluftstemperatur og temperatur i soner.

Tabell 5-1: Varmetap i distribusjonssystem

Tappevann	0.212	W/m <sup>2</sup> gulv
Tilluftskanaler	0.264	W/m <sup>2</sup> gulv

### 5.2.4. Gulvvarme

Det legges inn gulvvarme i inngang, bad og WC. Maksimal effekt settes lik 100 W/m<sup>2</sup>. Gulvvarmen styres etter ønsket overflatetemperatur på gulv, men den er i virkeligheten styrt etter settpunkt for valgt romtemperatur lokalt i sonen. Minimumsverdien for denne økes derfor til 24 °C på bad og WC, men holdes på 21 °C i inngangspartiet som i resten av leiligheten.

### 5.2.5. Trapperom

Trapperommet er delt inn i to soner; én sone med gulvhøyde lik kjellergulv og takhøyde lik kjellertak og én sone som strekker seg fra stuegulvets høyde til taket i 2. etasje. Trappetrinnene i øverste trappesone har åpning mellom trinnene og langs ytterkanten av trappen. For å sikre en realistisk luftgjennomstrømning er det satt inn en åpning på 1.5 m<sup>2</sup> mellom trappesonene. Det er også lagt inn en åpning uten dør mellom trappesonene og kjeller/2. etg. I virkeligheten er det en dør mellom kjeller og trapp som ofte er lukket, men det velges å simulere med denne som åpen (avsnitt 3.1.4). Trappesonen kunne vært simulert som én hel sone, men man måtte da ha tatt hensyn til at utregnet gulvareal blir noe mindre enn i virkeligheten og kan påvirke verdier som fordeles på gulvareal. Trappesonen i kjeller har et projisert gulvareal av virkelig areal lik 4.1 m<sup>2</sup>. Trappesonen i 1-2. etasje har prosjisert areal på 4 m<sup>2</sup>.

### 5.2.6. Implementering av vedovn

For simulering i IDA er det benyttet en elektrisk radiator plassert i stue for å simulere bruk av vedovn. Ovnens får en maksimal effekt på 6 kW og en driftstid på 06:00-21:00, lik driftstiden for det interne varmebatteriet i aggregatet. Ovnens kobles mot en temperaturføler i stue og settpunktet for ovnen settes litt lavere enn for eksternt varmebatteri, 21.9 °C mot 22 °C. Dermed konkurrerer ikke ovnen og ventilasjonen kontinuerlig om oppvarmingen, ovnen skal kun dekke det varmebehovet ventilasjonsluften ikke klarer å dekke. Siden ovnen står i stuen og stuetemperaturen regulerer tilluftstemperaturen og ovnen, er det en risiko for at det kan bli for kaldt i andre rom dersom varmen fra ovnen ikke fordeles tilstrekkelig i hele huset, selv om dører modelleres som konstant åpne (side 12).

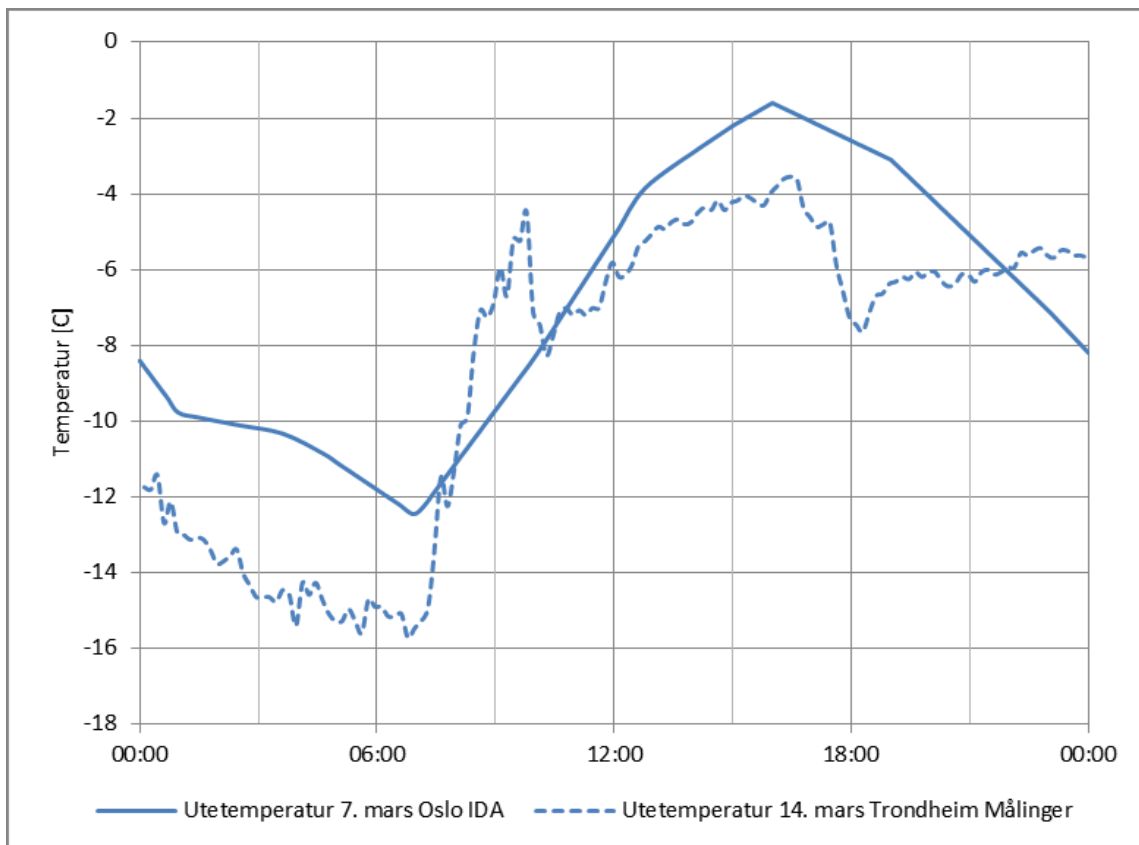
## 5.3. Resultater

### 5.3.1. Regulert som forsøkshus – Simulert for 7. mars i Oslo

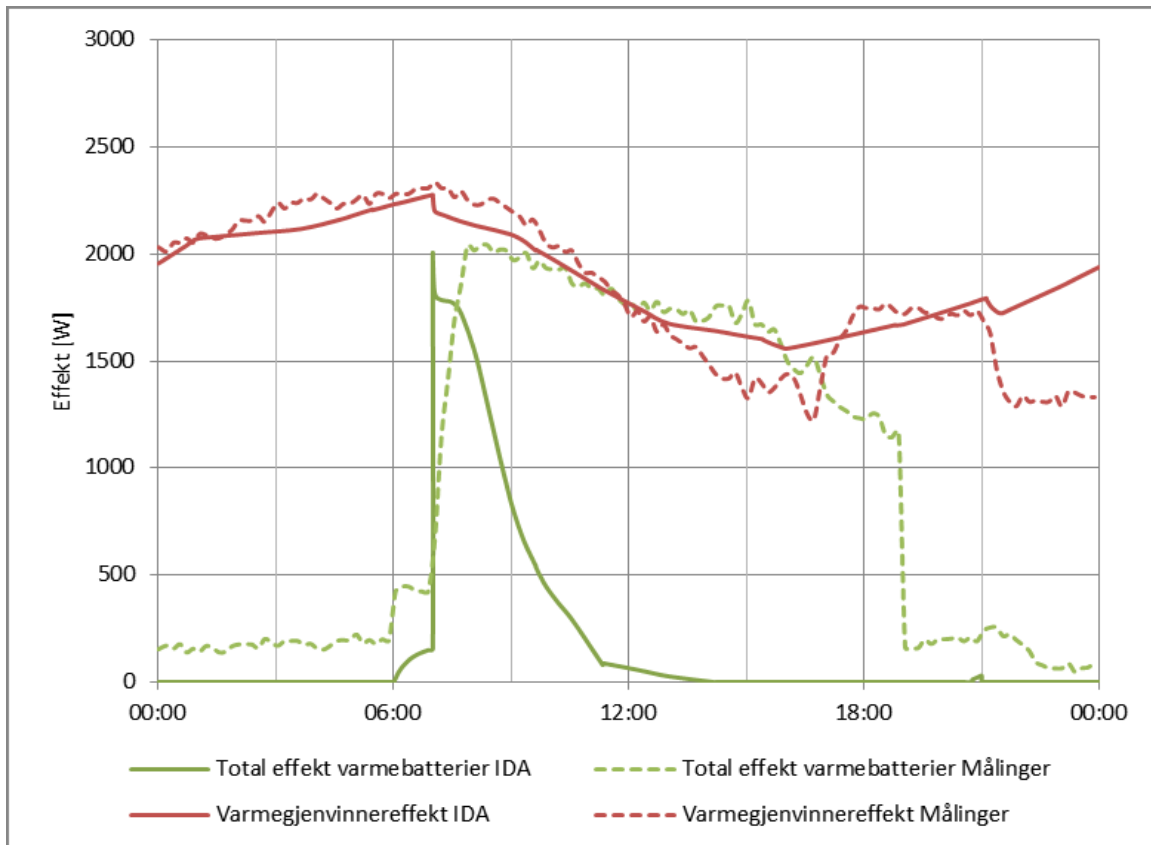
På grunn av manglende klimafil for Trondheim i IDA er simuleringsperiode satt til å være én dag i klimafilen for Oslo som har lignende utetemperatur som 10. og 14. mars i målingene (figur 5-3). Klimafilen som er brukt er Oslo (Fornebu) den 7. mars (vedlegg B.6). Som man ser av figuren under er dette en god tilnærming da begge dager har laveste temperatur like etter kl. 06:00, Oslo med -12.5 og Trondheim med -15.7 °C. Kurvene har også toppunkt rundt kl. 16, Oslo med -1.7 °C og Trondheim med -3.8 °C.

Effektforbruket i aggregatet ligger også omtrent på samme maksimumsnivå, ca. 2.1 kW (Figur 5-4). En ser at oppstarteffekten i IDA er momentan, i målingene er det en viss oppstartstid. For IDA-simuleringen er effektbehovet raskt synkende etter at maksimal effekt er oppnådd, mens det for målingene er en høy, men synkende totaleffekt helt frem til kl. 19:00. Dette kan bl.a. ha sammenheng med at temperaturen 14. mars er 2-4°C lavere på dagtid. Varmegjenvinneren yter omtrent likt bortsett fra at ytelsen øker på natten i IDA-filen, som forklart på side 41.

Årssimulering i Oslo-klima gir et totalt romoppvarmingsbehov lik 13 kWh/m<sup>2</sup>år ved bruk av ventilasjonsoppvarming alene.



Figur 5-3: Utetemperaturer i IDA og i målinger



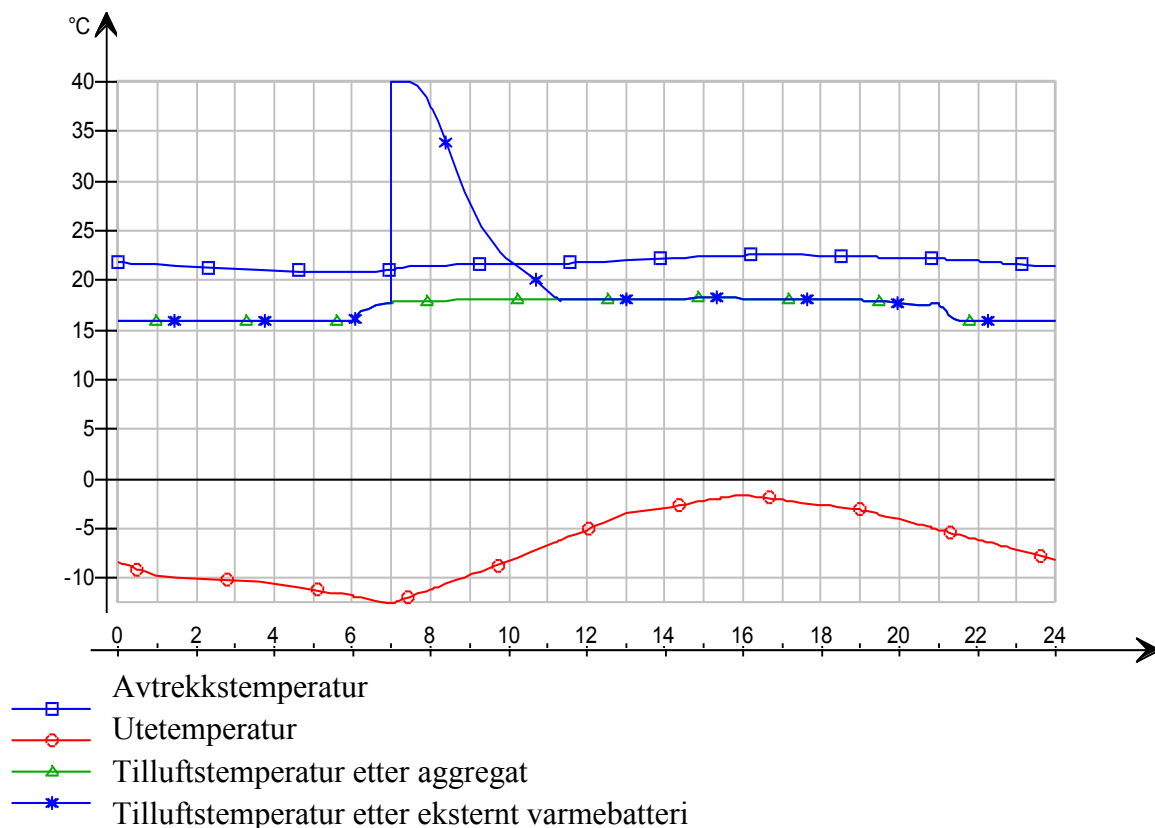
Figur 5-4: Effektbehov i aggregatet for IDA og målinger

Figur 5-5 viser hvordan tilluftstemperaturen ut fra varmebatteriene øker momentant til maksgrensen 40 °C og holder seg der i 1 time, vesentlig kortere enn i forsøkshuset (side 24). Det skjer et lite «hopp» i tilluftstemperaturen ca. kl. 17:00 før den synker til 15 °C. Solinnskuddet blir lavere på kvelden og sola går ned ca. kl. 18-19 denne datoen, og dette antas å være årsaken. En lignende økning kan også ses i forsøkshuset (side 24).

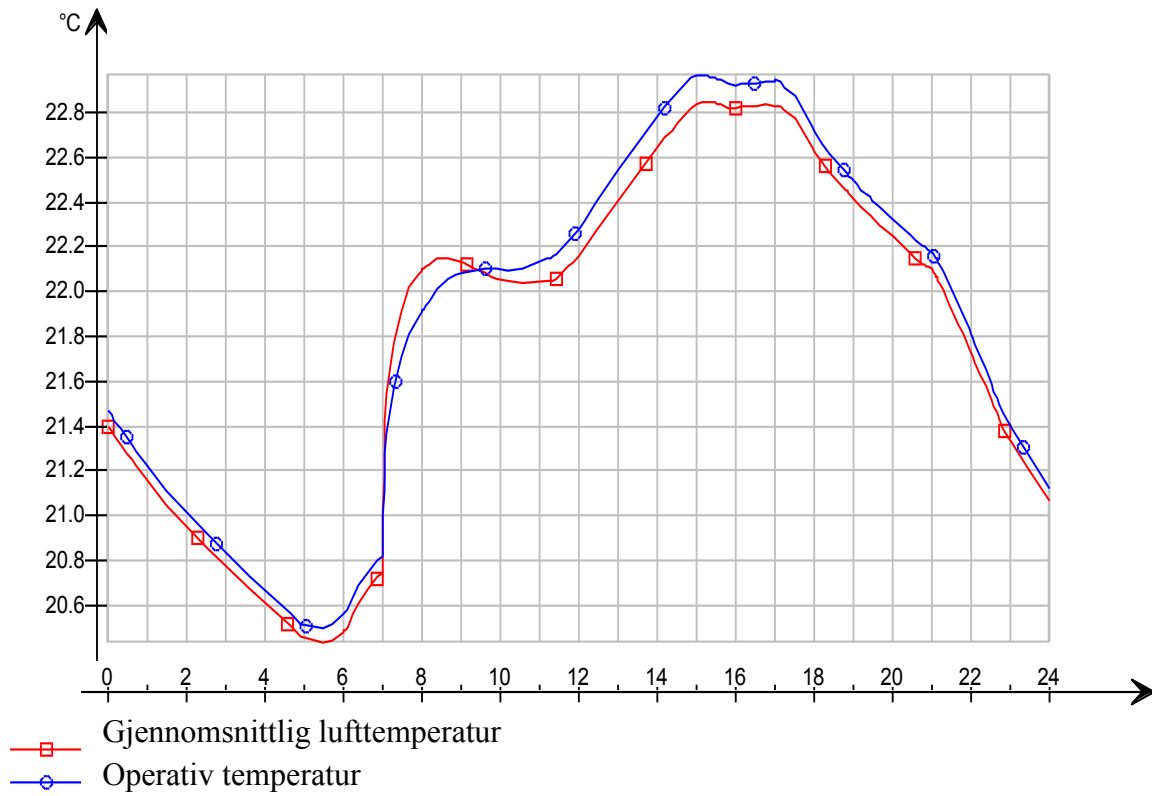
Settpunktet for stuetemperaturen tilfredsstilles etter bare 3 kvarter (Figur 5-6). Temperaturen opprettholdes fra kl. 09:30 til 21:30, og synker aldri under 20 °C i løpet av hele døgnet, som i forsøkshuset (side 27).

Enkelte soner har lave temperaturer store deler av dagen. Om dette er akseptabelt eller ikke avhenger av bruken av rommet. Soverommene har akseptable temperaturer på natten, men aldri under 20 °C (Figur 5-7). Dette gjelder også for kjellerstue (Figur 5-8).

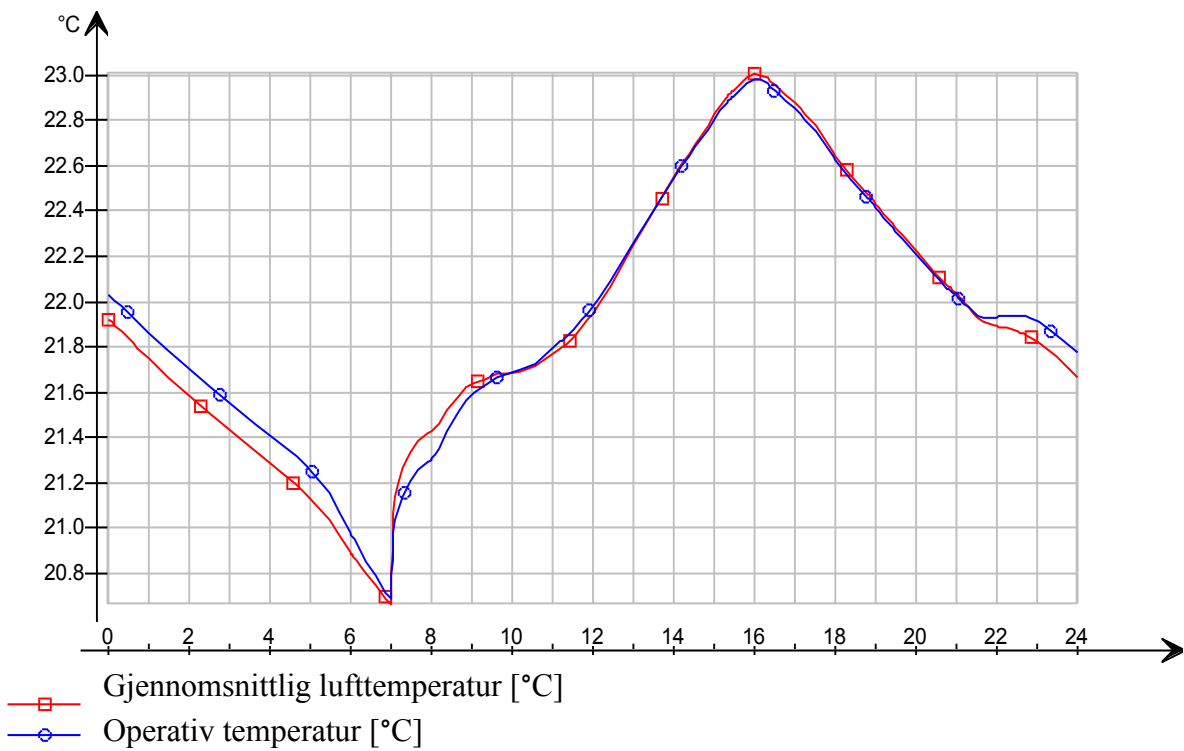
Det er valgt å gå videre med denne IDA modellen for simulering under andre forhold (kapittel 5.3.2).



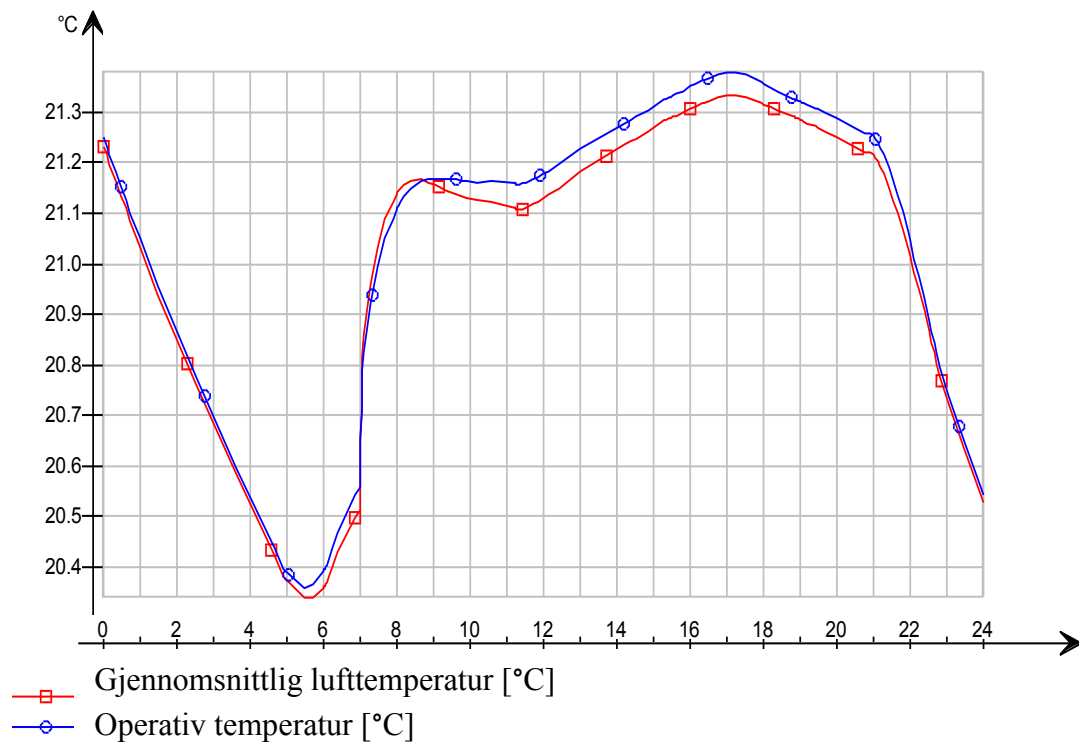
Figur 5-5: Tilluftstemperaturer i aggregatet 7. mars, regulert som forsøkshus



Figur 5-6: Temperatur i stue/kjøkken 7.mars, regulert som forsøkshus



Figur 5-7: Temperatur på soverom 7. mars, regulert som forsøkshus

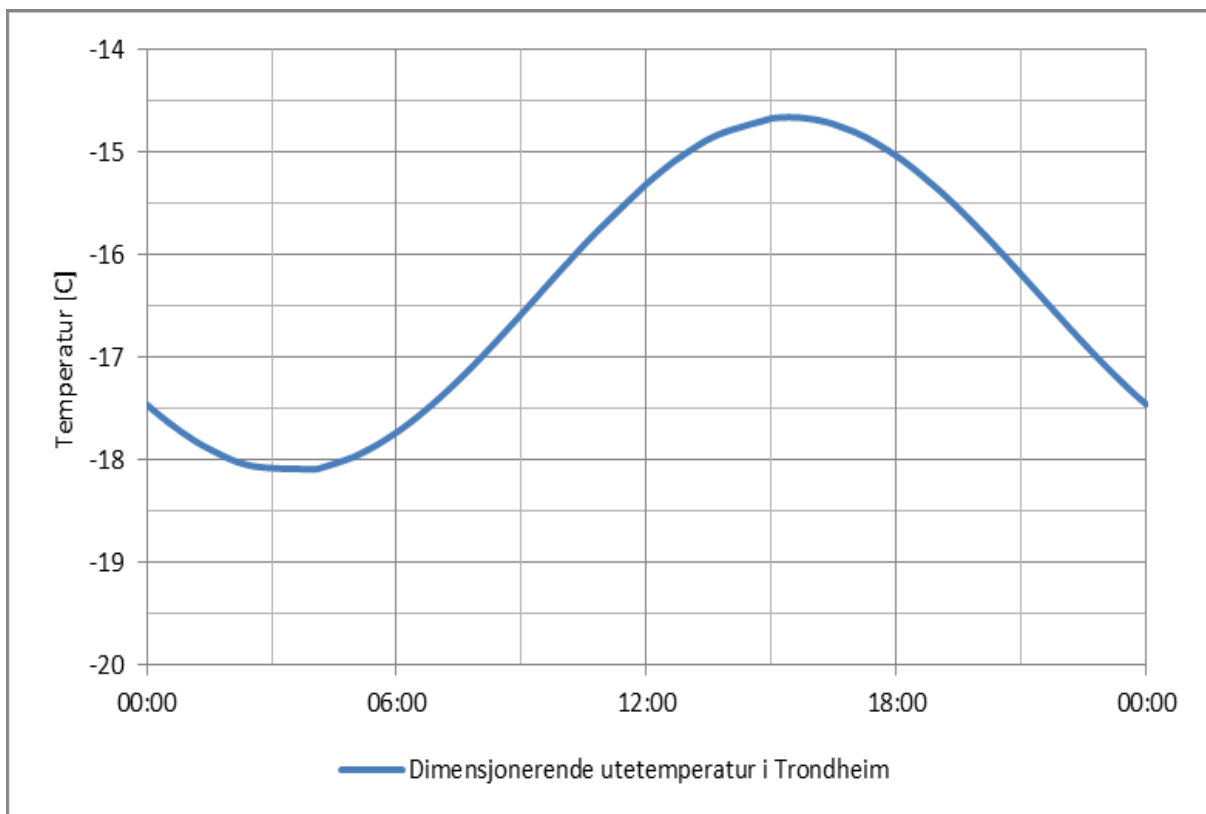


Figur 5-8: Temperatur i kjellerstue 7. mars, regulert som forsøkshus

### 5.3.2. Dimensjonerende utetemperatur - vinter

Det er valgt å gjøre vintersimulering av forsøksboligen, dvs. for dimensjonerende utetemperatur (DUT) og ingen solinnskudd (Figur 5-9).

Først simuleres modellen med en regulering lik forsøkshusets reguleringsstrategi, både for dimensjonerende døgn i Trondheim og i Kiruna for sammenligning. Deretter endres reguleringsstrategien med tanke på nattsenking, tilluftstemperatur og luftmengder for simulering i Trondheim. I tillegg undersøkes muligheten for bruk av ovn til dekking av spisslast.

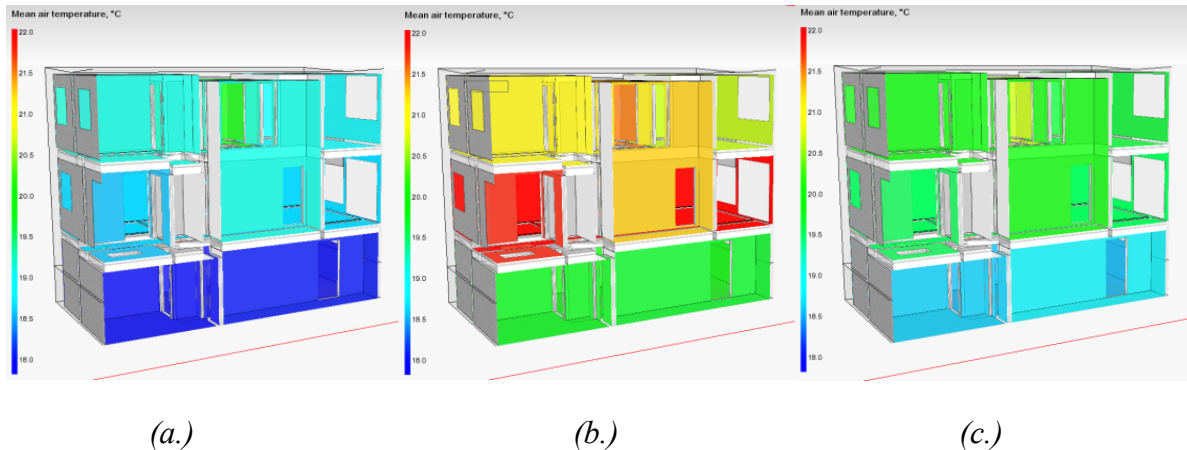


Figur 5-9: DUT i Trondheim hentet fra IDA ICE



### 5.3.2 I. Regulert som forsøkshus

I Figur 5-10 illustreres lufttemperaturen i et snitt av boligen sett fra sør-øst (vedlegg B.7 til B.9) for simuleringer under dimensjonerende utetemperatur (DUT).

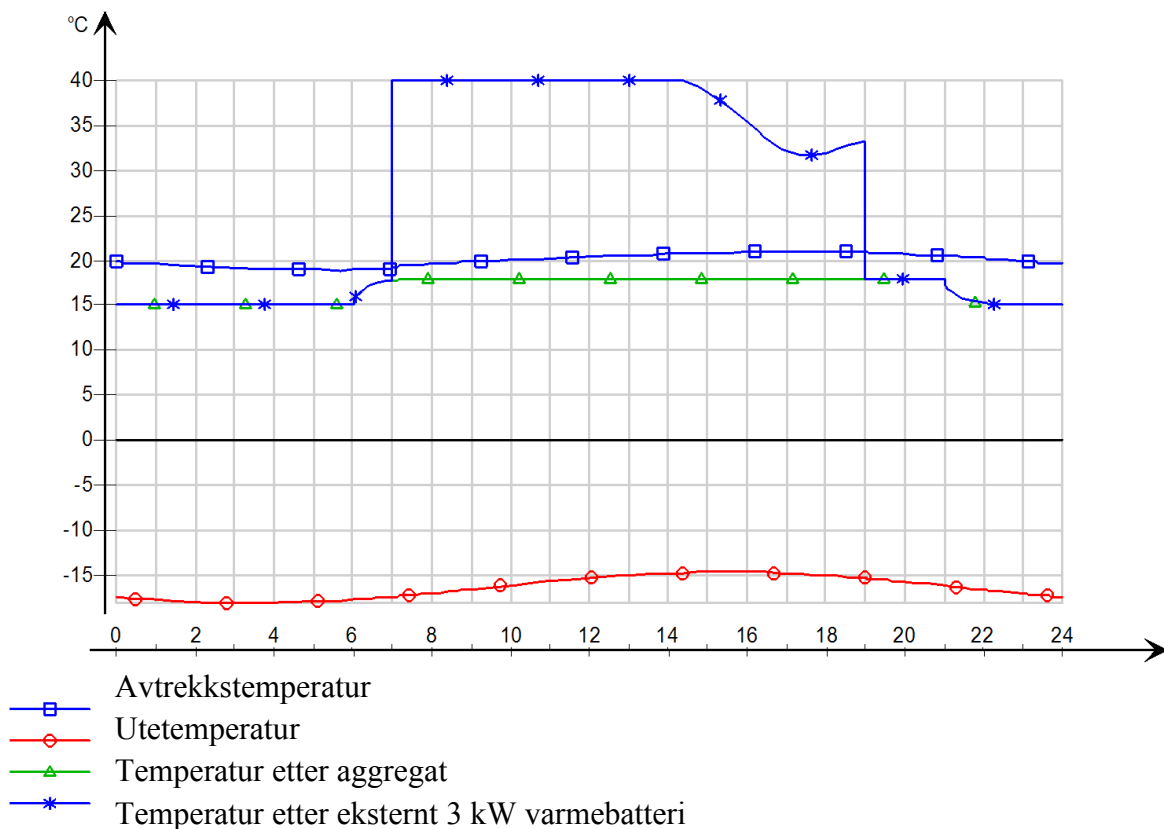


Figur 5-10: Lufttemperatur ved DUT (a.) kl. 06:00, (b.) 18:00 og (c.) 22:00

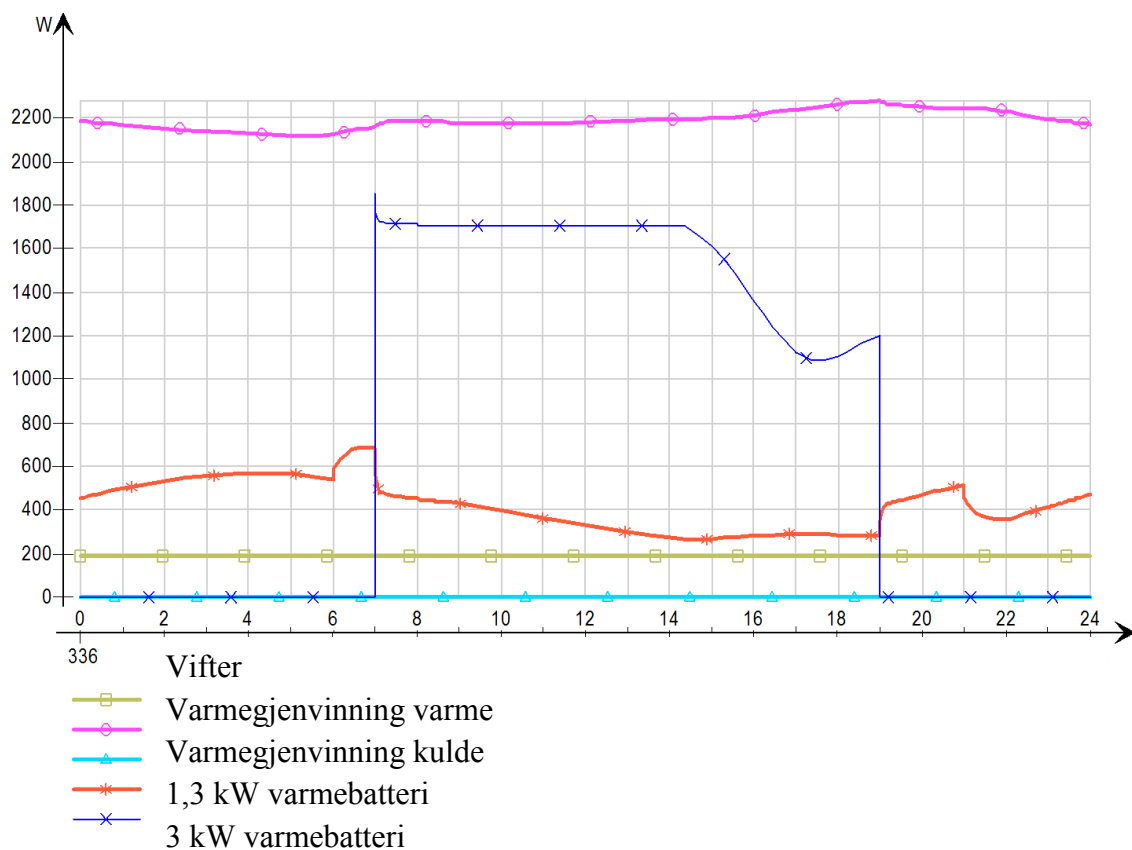
Tilluftstemperaturen holder seg på 40 °C store deler av dagen, i omtrent 7.5 timer. Kl. 14 starter den å synke grunnet tilfredsstilt settpunkt i stue.

Varme batteriet på 3 kW begrenses av maksimal tilluftstemperatur hele driftstiden og går aldri over 1.9 kW (Figur 5-12). Dette tyder på at settpunkttemperaturen for stue ikke blir opprettholdt. Temperaturkurven for stuen viser at dette stemmer (Figur 5-13). Når 3 kW-batteriet stoppes kl. 19:00 er romtemperaturen 21.1 °C og fremdeles under settpunkt. Lufttemperaturen når ikke en akseptabel temperatur på 20 °C før kl. 10:30 og morgenen vil oppleves som for kald.

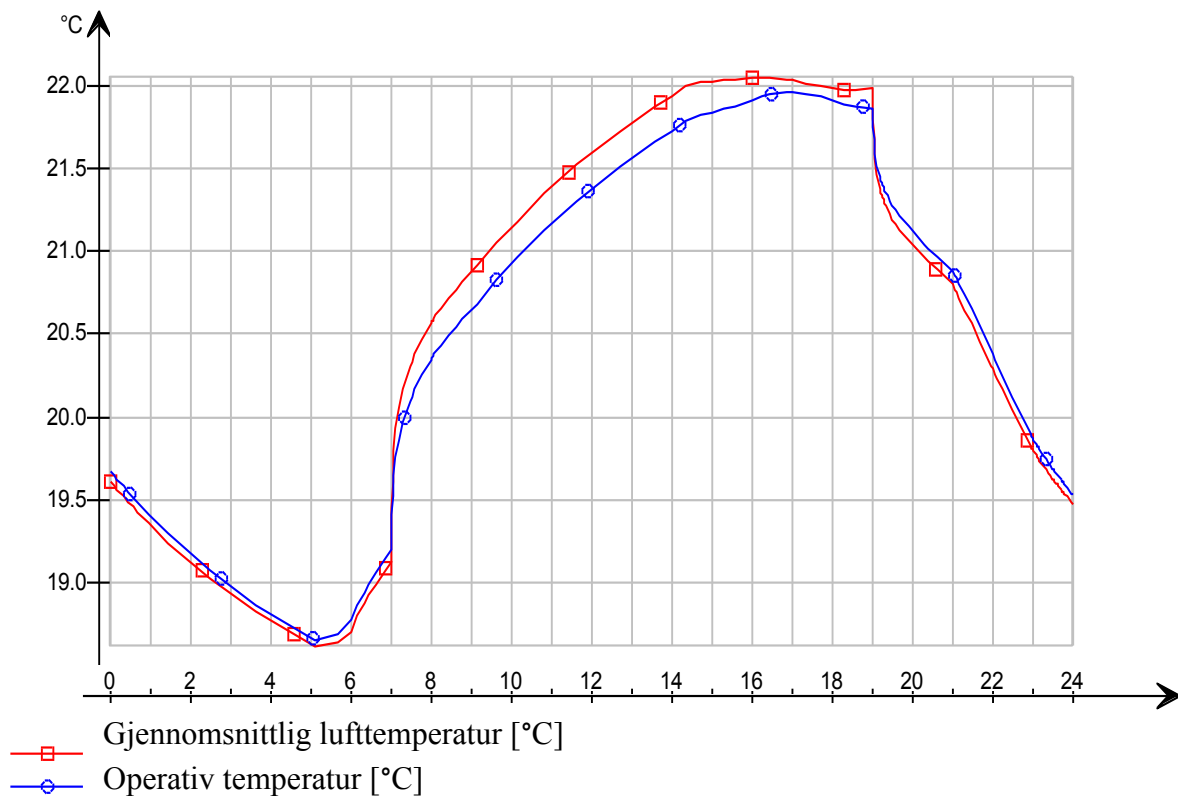
Soveromstemperaturen på det største soverommet holder seg under 20,7 °C hele døgnet. Laveste temperatur på soverom er 18,8 °C (Figur 5-14).



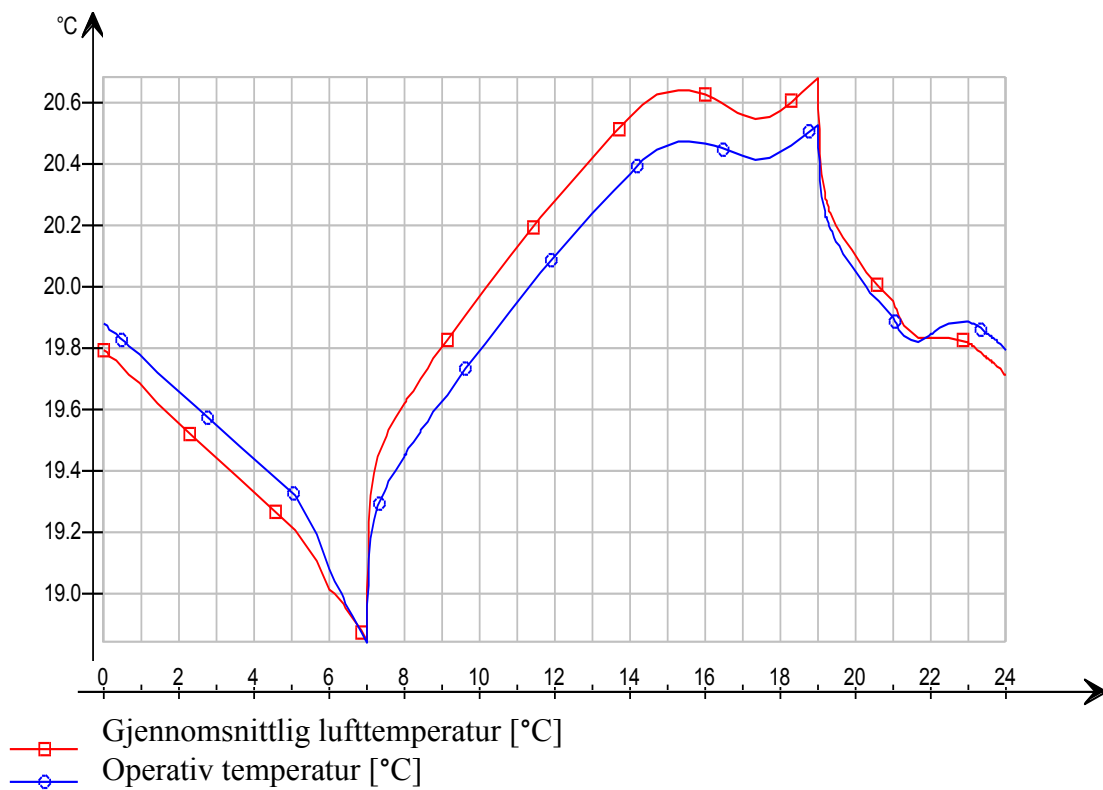
Figur 5-11: Temperaturer i aggregatet for DUT, regulert som forsøkshus



Figur 5-12: Effekt i aggregat DUT, regulert som forsøkshus



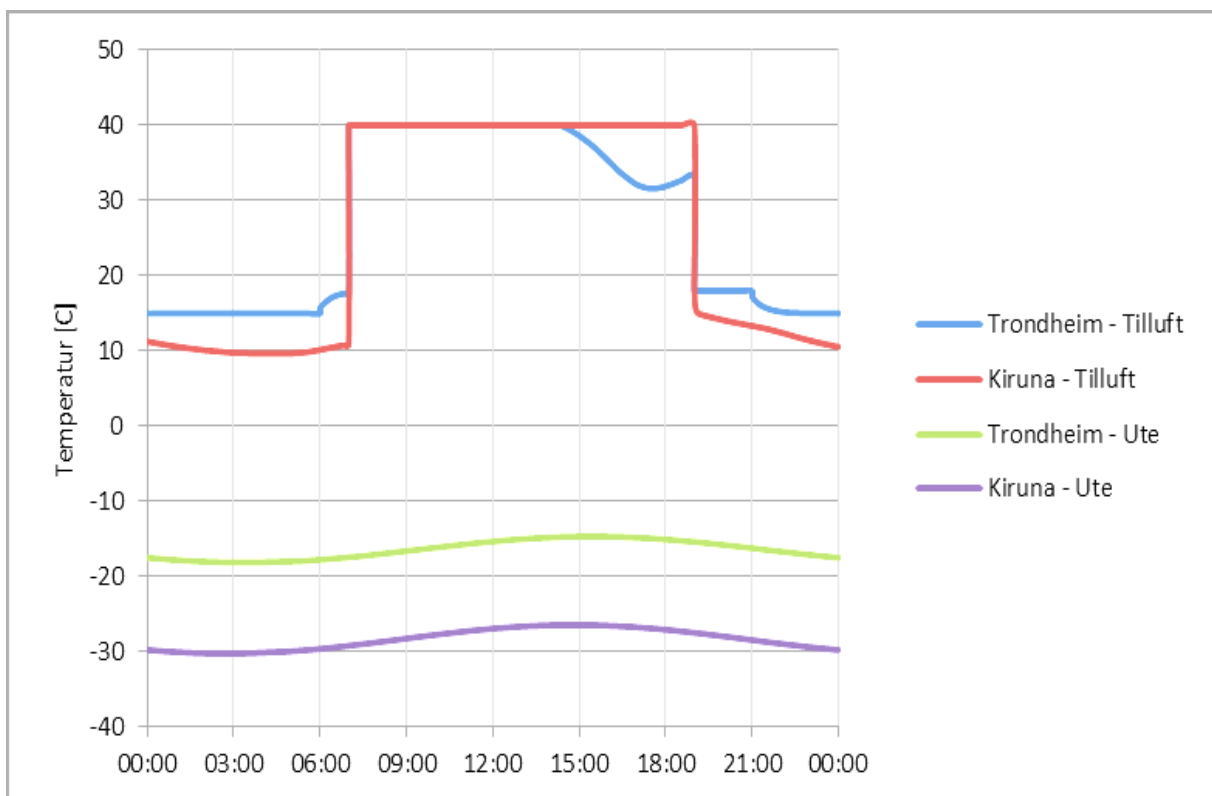
Figur 5-13: Temperaturkurve for stue DUT, regulert som forsøkshus



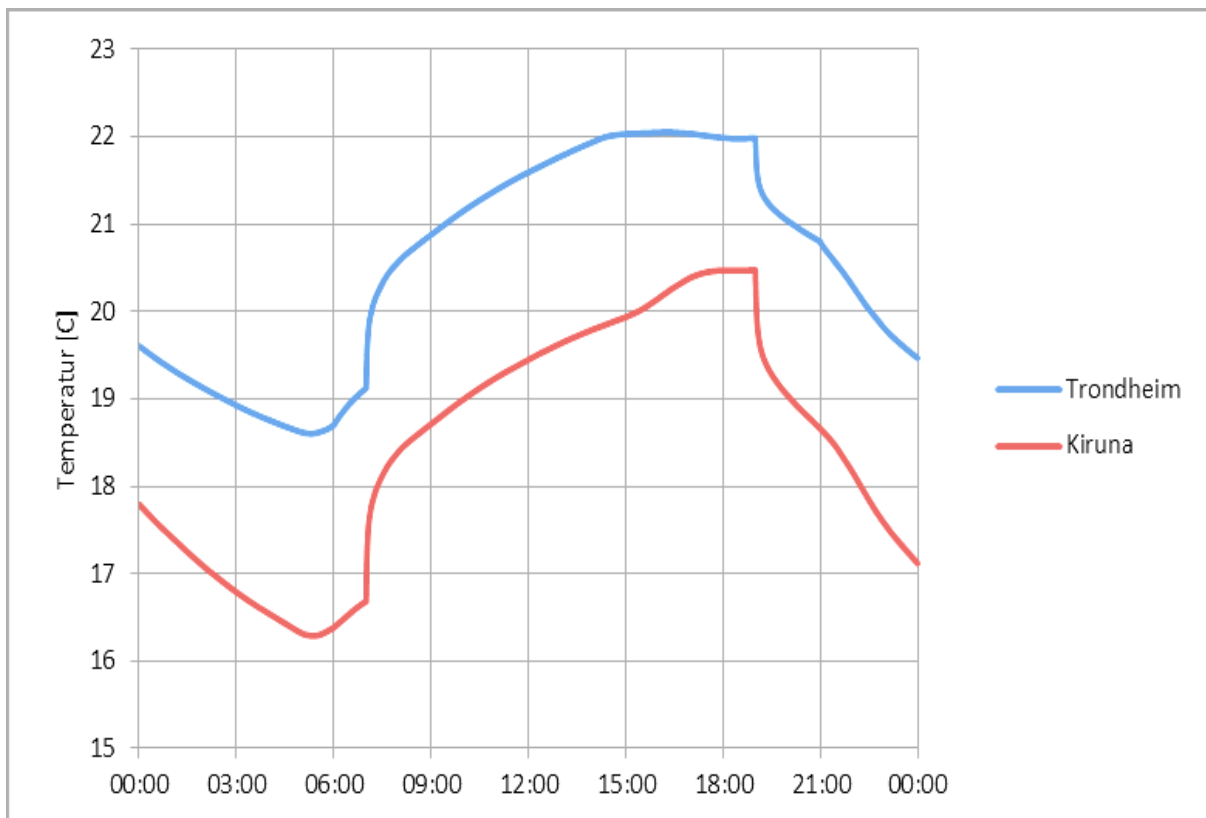
Figur 5-14: Temperaturkurve for stort soverom DUT, regulert som forsøkshus

### 5.3.2 II. Regulert som forsøkshus i «Kiruna»

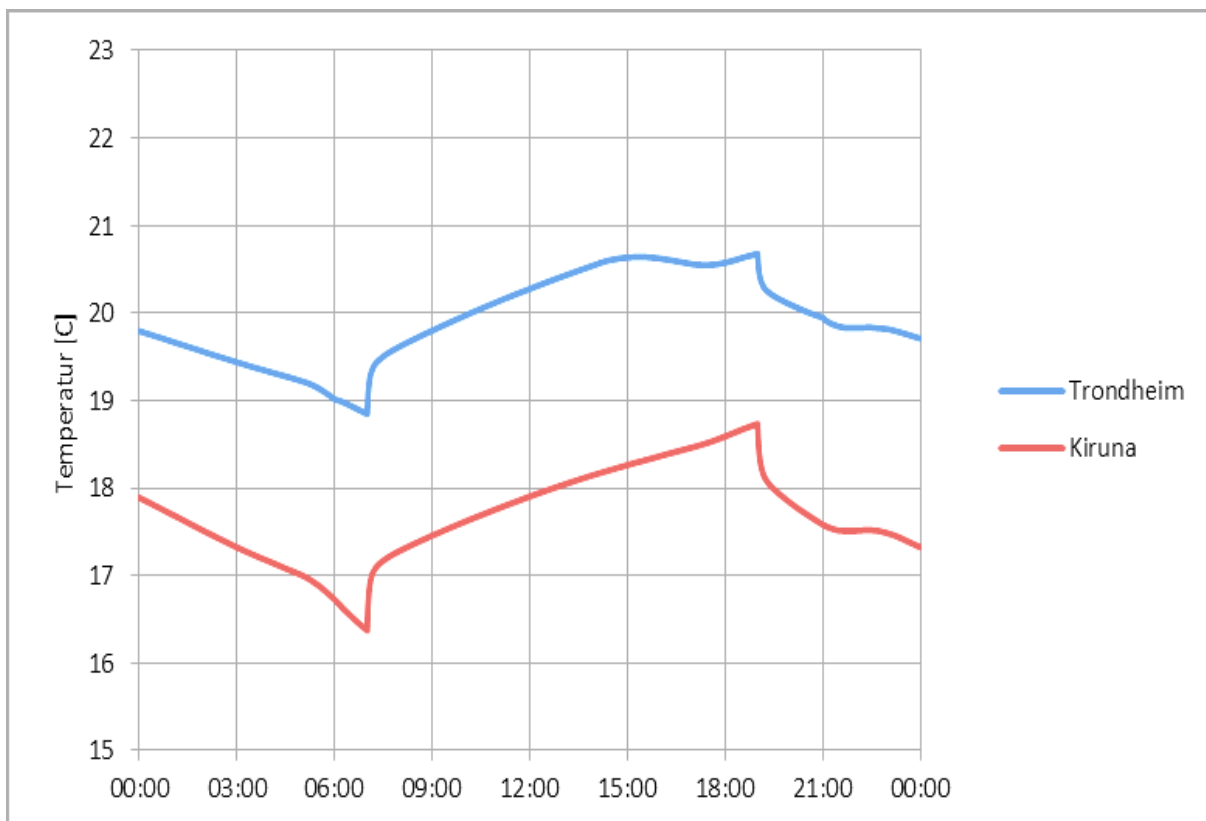
Byen med kaldeste dimensjonerende utetemperatur i IDA's database er Kiruna. Denne er derfor brukt for å sammenligne med tilfellet i Trondheim. Som man ser i Figur 5-15 er det omtrent 10 °C differanse mellom utetemperaturene. Man ser også at tilluftstemperaturen på natten senkes til under 15 °C fordi varmegjenvinneren og 1,3 kW-varmebatteriet ikke er i stand til å opprettholde denne temperaturen alene (vedlegg B.10). På dagtid er tilluftstemperaturen konstant lik 40 °C. Settpunkt i stue oppnås aldri og 20 °C nås ikke før kl. 15.00 (Figur 5-16). Soveromstemperaturen er minimum 16,5 °C og maksimalt 18,5 °C for Kiruna (Figur 5-17).



Figur 5-15: Tilluftstemperatur for Kiruna og Trondheim DUT



Figur 5-16: Stuetemperatur for Trondheim og Kiruna DUT



Figur 5-17: Soveromstemperatur for Trondheim og Kiruna DUT

### 5.3.2 III. *Endret styringsstrategi for DUT*

Det er valgt å sammenligne ulike endringer i styringsstrategi for å få et tydeligere bilde på hvilke konsekvenser disse endringene får for tilluftstemperatur, effektbehov og temperaturnivå i boligen. Det er ikke valgt å ta med forsering av luftmengde i dette avsnittet (side 65) for gjennomgang av dette emnet. Luftmengden er som i forsøkshus (avsnitt 4.1) og det simuleres med dimensjonerende utetemperatur. Følgende modifiseringer sammenlignes;

- Økt temperatur på nattsinking fra 15 °C til 18 °C
- Økning av maksimal tilluftstemperatur fra 40 °C til 55 °C
- Utvidet drift av begge varmebatterier; oppstart kl. 05:00

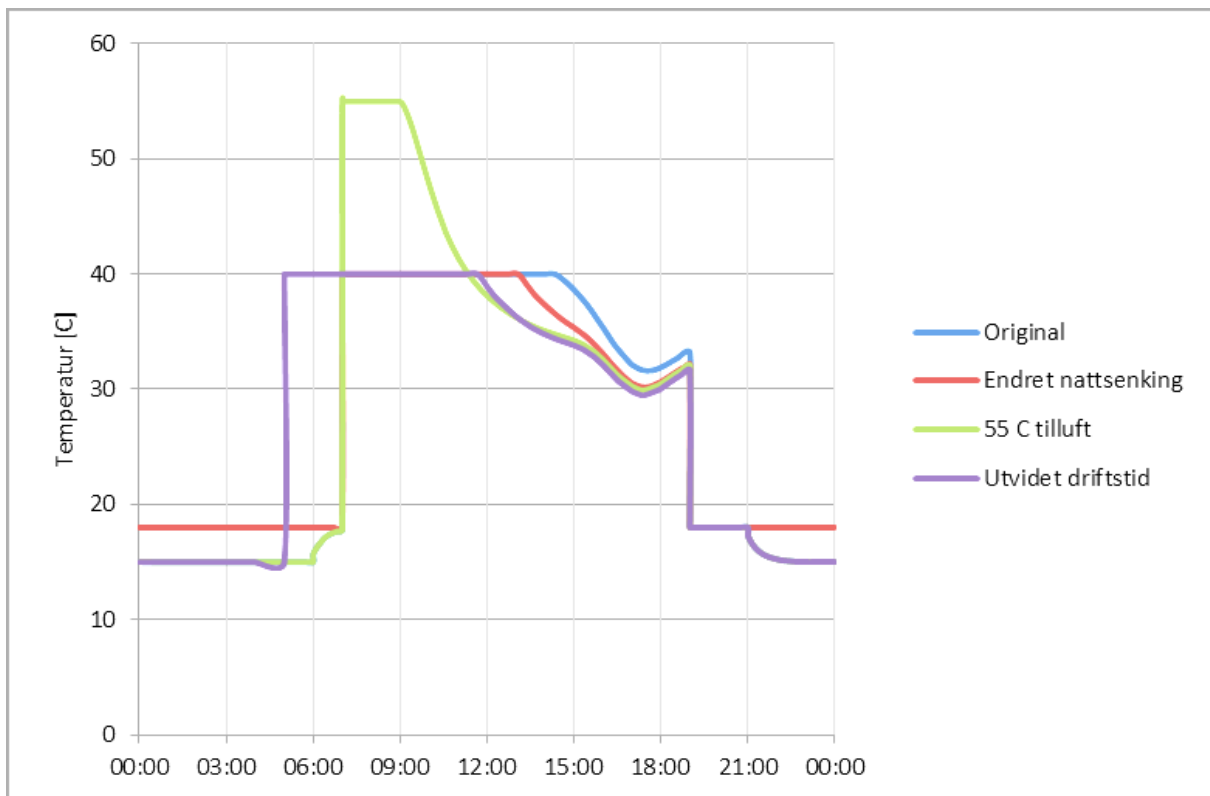
Under de kaldeste periodene kan det være interessant å se hvor mye lavere effektbehovet blir på morgenen dersom man har en mindre grad av nattsinking av tilluftstemperaturen. Det forsøkes med en tilluftstemperatur ut fra det interne varmebatteriet på 18 °C hele døgnet. Legg merke til at endringen ikke gjelder for 3 kW-batteriet, som fortsatt har samme begrensning på driftstiden og maksimal temperatur som tidligere. Konsekvensene av høyere natt-temperatur er at perioden for konstant, maksimal temperatur og effekt varer i 6 timer og frem til kl. 13, altså én time kortere enn originalen. Maksimalt effektbehov er stort sett uendret (Figur 5-19). Stuetemperaturen blir 20 °C omtrent samtidig som for opprinnelig timeplan og soveromtemperaturen er ca. 0,25 °C høyere hele natten (Figur 5-20 og Figur 5-21). Se vedlegg B. 11 til B. 14 for detaljerte kurver over endret nattsinking.

Maksimal tilluftstemperatur er tidligere satt til 40 °C. I rapporten fra det tyske passivhusinstituttet (Feist, et al., 2005) er grenseverdien oppgitt å være 55 °C for å unngå sviing av støv. Denne temperaturen er derfor forsøkt simulert i IDA. Tilluftstemperaturen er på 55 °C i omtrent 2 timer og er over 40 °C i omtrent 4 timer (Figur 5-18). Total maksimal effekt øker til ca. 3700 W (Figur 5-19), en økning på omtrent 1200 W fra 40 °C tilluft. Settpunkt i stue tilfredsstilles allerede kl. 9 i motsetning til forsøkshuset som ikke når settpunktet før like etter kl. 14 (Figur 5-20). Soveromtemperaturen ligger under 20 °C hele natten og når 20 °C litt før kl. 8 (Figur 5-21). Se vedlegg B. 15B. 18 for detaljerte kurver over økt tilluftstemperatur.

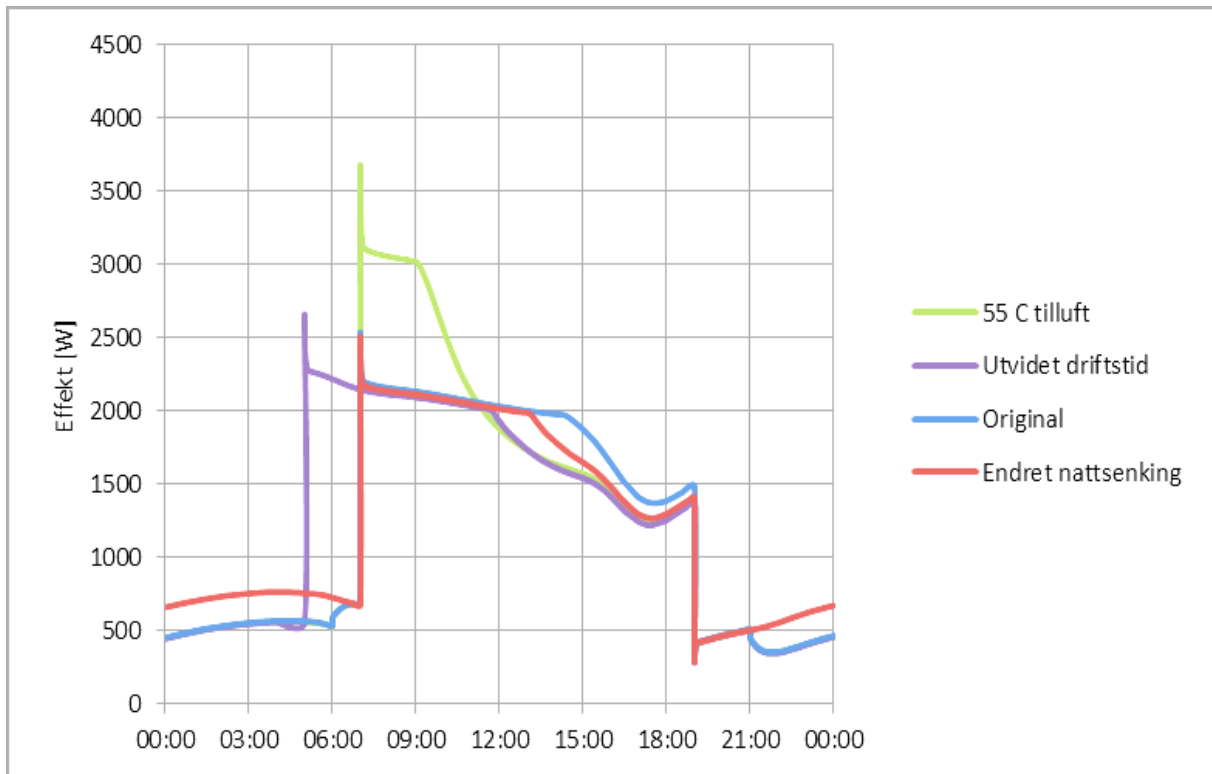
Under målinger i virkelig passivhus opplevde beboere at det var litt for kaldt i huset på morgenen. Det er derfor forsøkt å stoppe nattsinkingen én time tidligere, kl. 5, for å oppnå mer behagelige romtemperaturer på morgenen. I tillegg er oppstart for 3 kW-batteriet satt til samme tid som 1,3 kW-batteriet, kl. 5, i stedet for én times mellomrom mellom disse (Figur 5-18). Perioden for maksimal tilluftstemperatur varer i ca. 7 timer, mot opprinnelig 7,5 timer, en liten forskjell (Figur 5-18). Den utvidede driftstiden vil gi like lave soveromtemperaturer på natten (frem til kl. 5), samtidig som at akseptable romtemperaturer oppnås tidligere på morgenen (Figur 5-21 og Figur 5-20). I tillegg vil maksimalt effektbehov være omtrent det samme. Se vedlegg B. 19 og B. 22 for detaljerte kurver over endret driftstid.

Tabell 5-2: Utvidet driftstid for varmebatterier

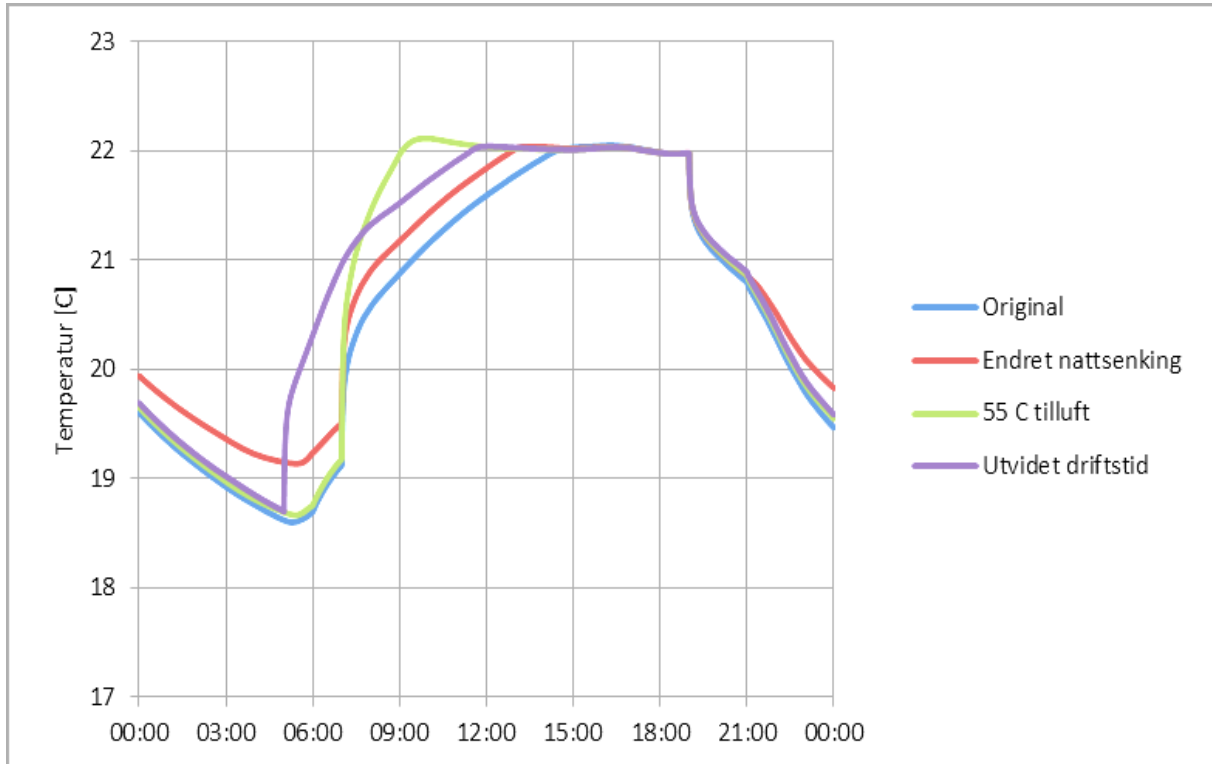
Tid	Tilluftstemperatur etter:		Aktiv enhet
	1.3 kW batteri	3 kW batteri	
00:00 – 05:00	15 °C		Aggregat
05:00 – 19:00	18 °C	≤ 40 °C	Aggregat   3 kW batteri
19:00 – 21:00	18 °C		Aggregat
21:00 – 23:59	15 °C		Aggregat



Figur 5-18: Sammenligning av tilluftstemperatur DUT

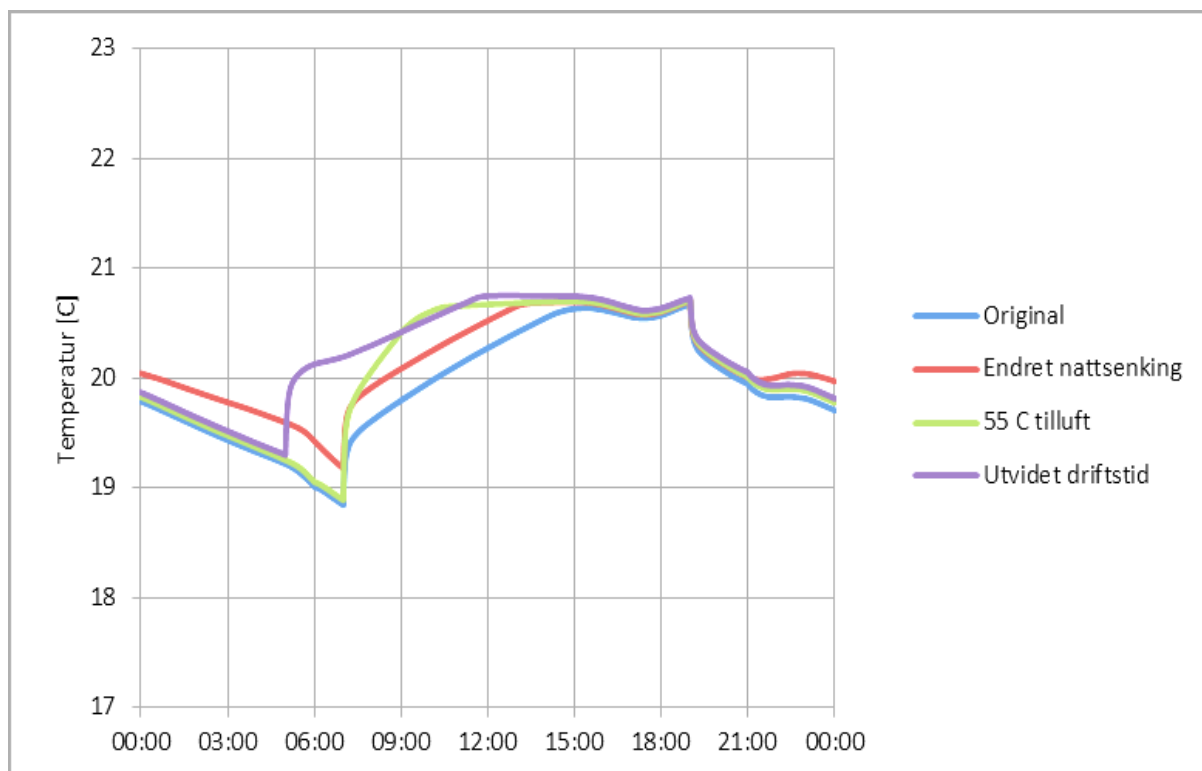


Figur 5-19: Sammenligning av effektbehov DUT



Figur 5-20: Sammenligning av stuetemperatur DUT





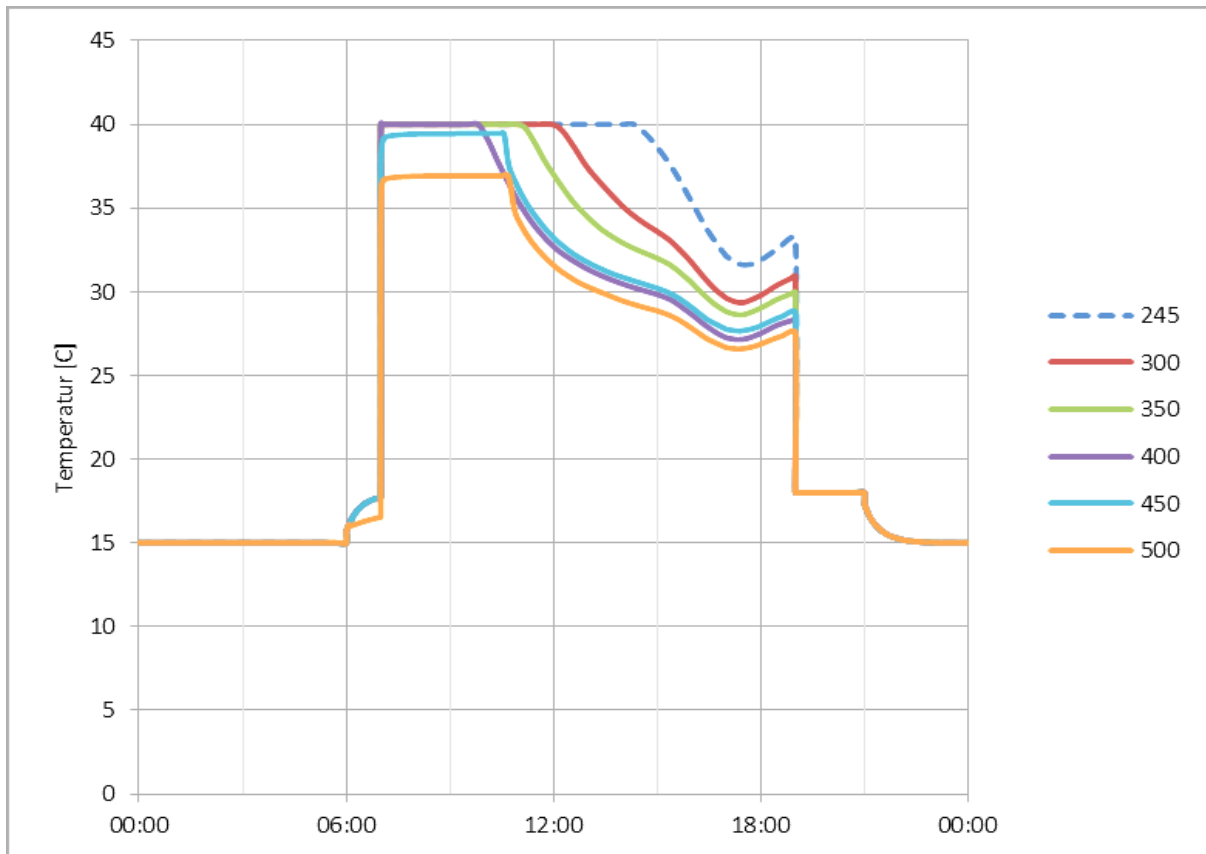
Figur 5-21: Sammenligning av soveromstemperatur DUT

### 5.3.2 IV. Økt luftmengde

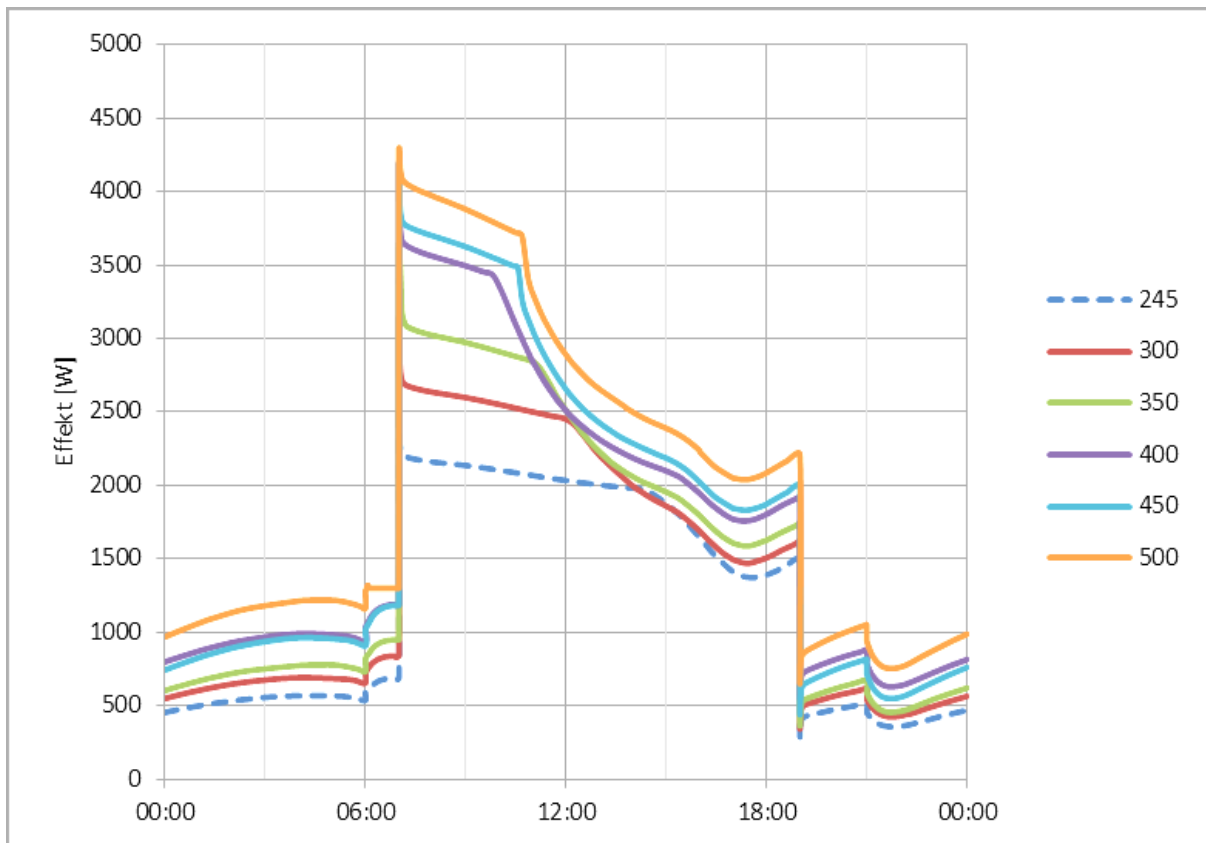
I tillegg til foreslåtte endringer i styringsstrategi (side 49), studeres effekten av å øke den totale luftmengden for å oppnå tilstrekkelig komfort. Det er forsøkt å øke luftmengden i henhold til Tabell 5-3. Maksimal luftmengde fra UNI4 er 600 m<sup>3</sup>/h. I simuleringen vil luftmengden holdes konstant over hele simuleringsperioden. Tilluftstemperaturen er som i forsøkshuset. Det simuleres fortsatt med dimensjonerende utetemperatur. Tilluftstemperatur og total effekt ut fra varmebatteri er illustrert i henholdsvis figur 5-22 og figur 5-23.

Tabell 5-3: Variasjon av total luftmengde

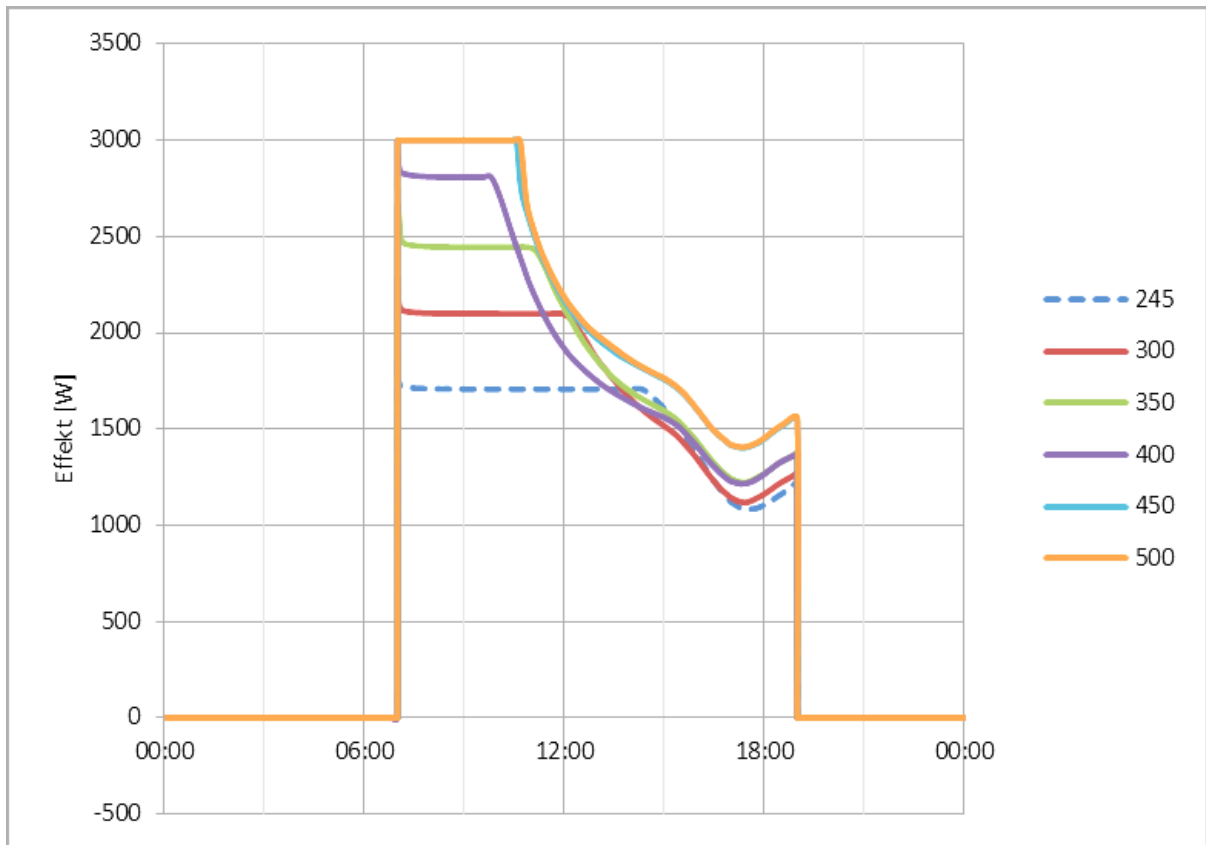
m <sup>3</sup> /h	L/s	h <sup>-1</sup>	Prosent av max.
500	139	1,6	83 %
450	125	1,4	75 %
400	111	1,3	67 %
350	97	1,1	58 %
300	83	0,9	50 %
245	68	0,8	41 %



Figur 5-22: Tilluftstemperatur i aggregat for ulike luftmengder [ $m^3/h$ ] DUT



Figur 5-23: Totalt effektbehov for varmebatteriene ved varierende luftmengde [ $m^3/h$ ] DUT

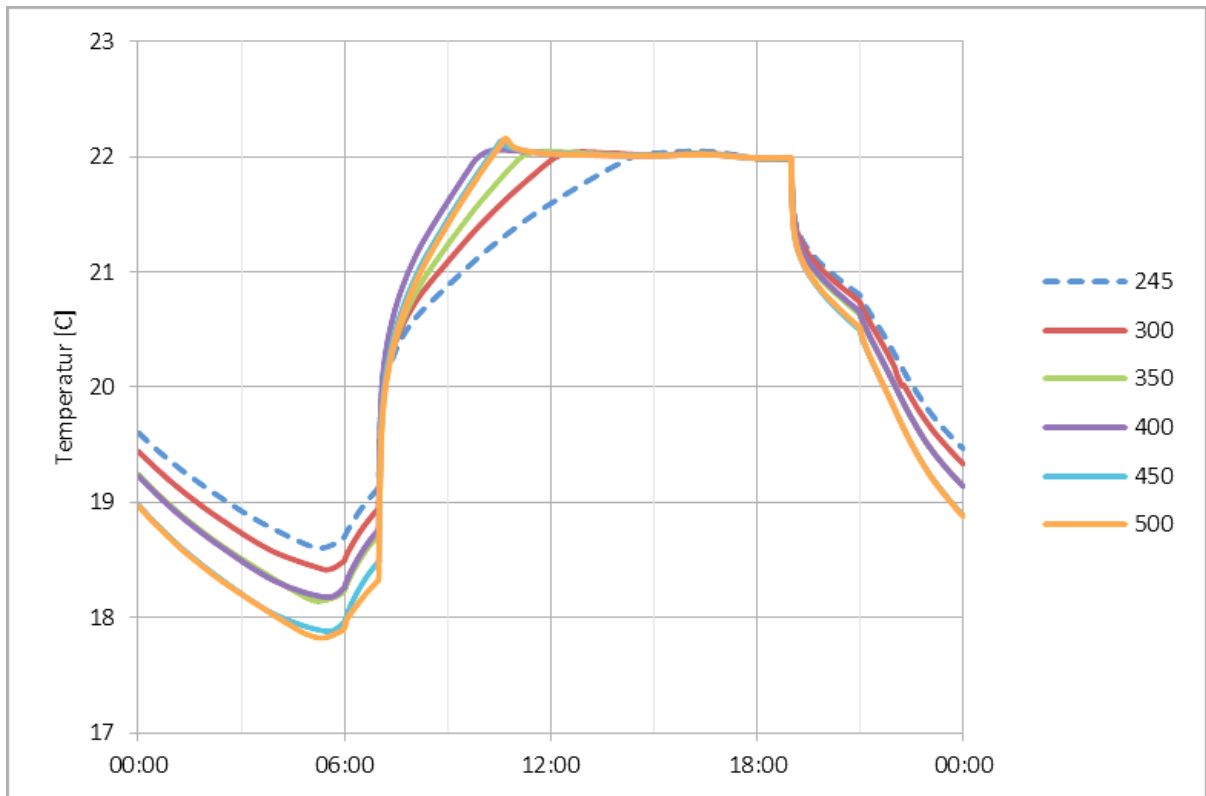


Figur 5-24: Effektbehov i 3 kW varmebatteri med varierende luftmengde [m<sup>3</sup>/h], DUT

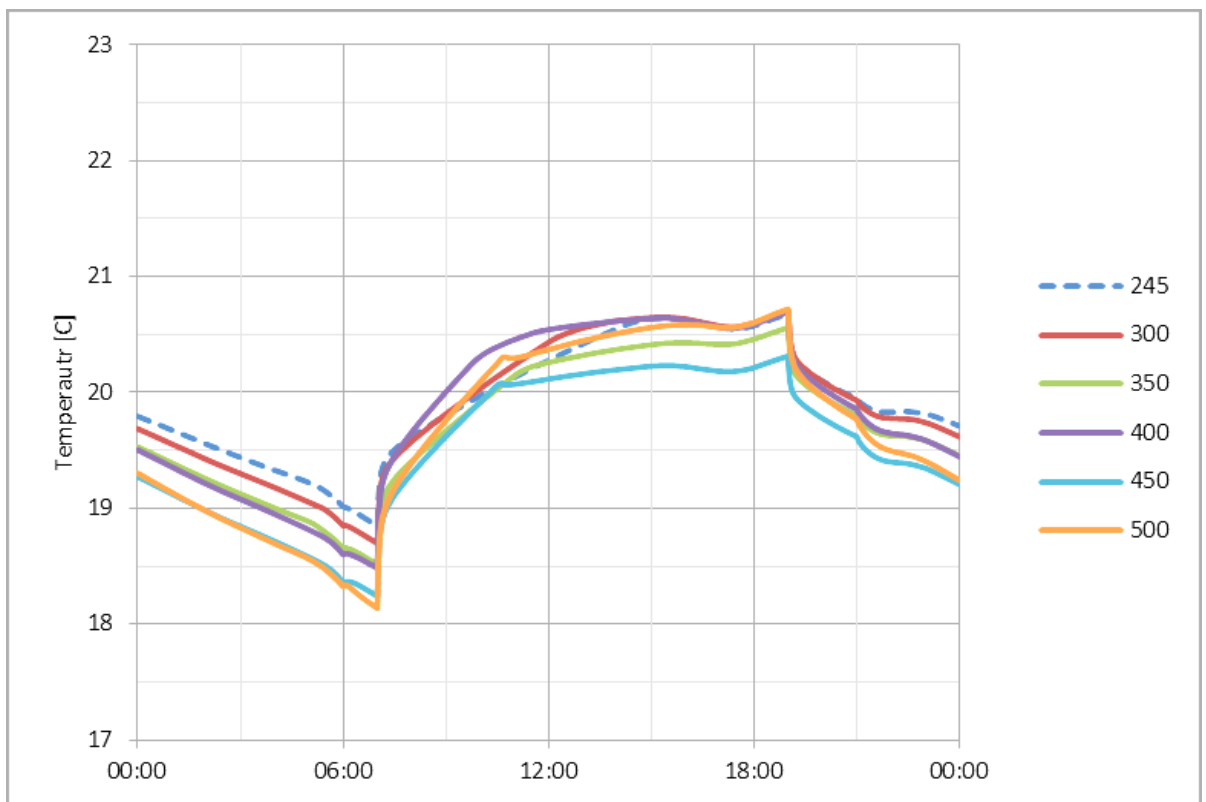
Nivå på tilluftstemperaturen for de ulike luftmengdene er fremstilt i Figur 5-22. Først ved 450 m<sup>3</sup>/h går tilluftstemperatur ned. Effektbehovet i Figur 5-24 viser at maksimalt tilgjengelig effekt på 3000 W inntreffer ved høyeste og nest høyeste luftmengde og varmebatteriet er altså ikke i stand til å levere 40°C tilluft på dette punktet. Dette er altså med en økning i tilluftstemperatur på 22°C. Det kan se ut som at man ved 400 m<sup>3</sup>/h luftmengde oppnår korteste periode med 40°C tilluft, omtrent 3 timer. Det er også luftmengden som ser ut til å tilfredsstille stuens settpunkt på 22°C først.

Det viktigste oppholdsrommet på dagtid er stue/kjøkken. Figur 5-25 illustrerer gjennomsnittstemperaturen i stuen hele døgnet. Alle luftmengder oppnår en akseptabel romtemperatur på 20 °C kort tid etter oppstart av eksternt varmebatteri kl. 7. De tre høyeste luftmengdene når settpunktet for stue omtrent samtidig kl. 10. Laveste luftmengde, 245 m<sup>3</sup>/h, når ikke denne før kl. 14. En ser at dersom nattsenkingen hadde stanset f.eks. én time tidligere ville kanskje stuen hatt en akseptabel temperatur allerede kl. 6 når beboerne står opp.

Man ser at soveromstemperaturen vil fortsette å synke mot 18 °C når nattsenkingen slås av grunnet fravær fra rommet etter kl. 6 (Figur 5-26). I stuen vil lufttemperaturen øke grunnet økte internlast. Økte luftmengder bidrar til å senke temperaturen på soverommet på natten, som forventet med økt luftskifte. På dagen er det vanskeligere å trekke ut noen spesielle tendenser, grunnet kryssende kurver og at den største differansen i temperatur oppstår mellom 450 og 500 m<sup>3</sup>/h luftskifte.



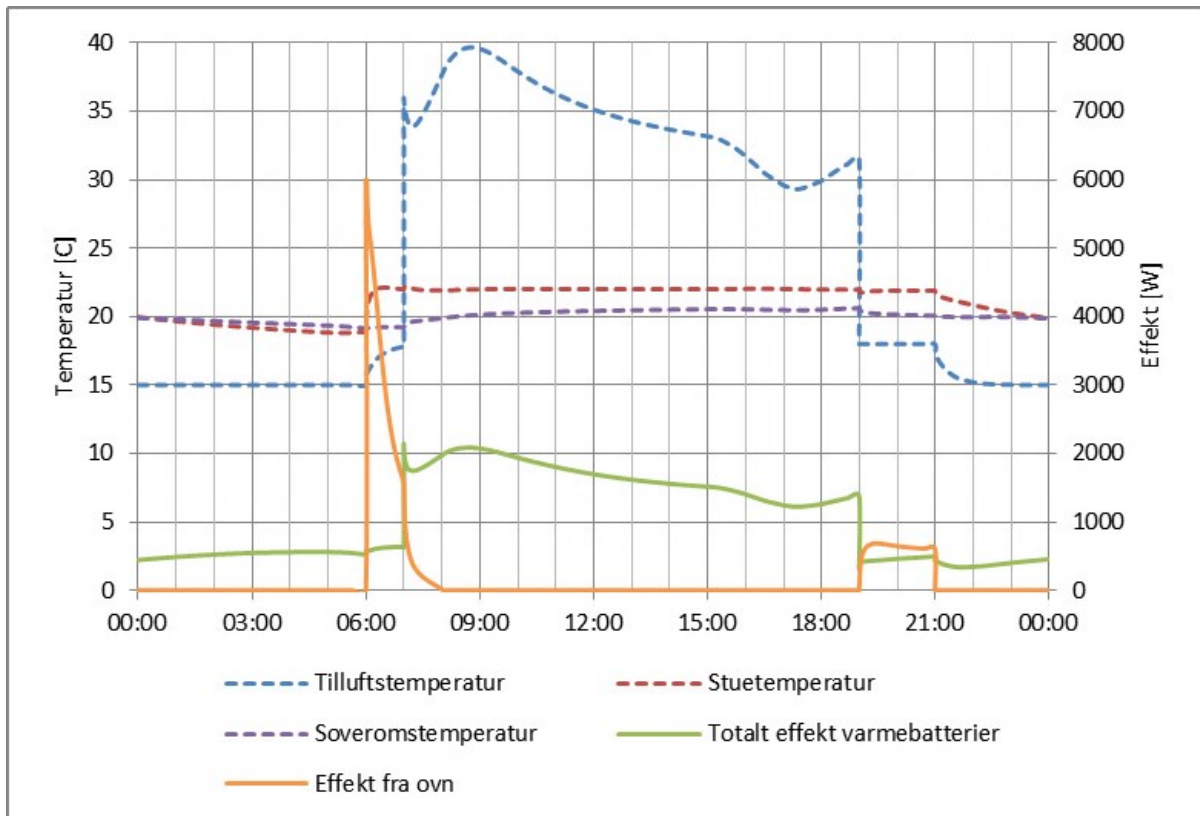
Figur 5-25: Gjennomsnittlig lufttemperatur i stue for ulike luftmengder [m<sup>3</sup>/h], DUT



Figur 5-26: Gjennomsnittlig lufttemperatur på soverom for ulike luftmengder [m<sup>3</sup>/h], DUT

### 5.3.2 V. Bruk av ovn for dekking av spisslast

Det settes inn en elektrisk radiator i stuen og temperatur- og effektforløpet illustreres i Figur 5-27. Se kapittel 5.2.6 for detaljer om implementering. Luftmengden og regulering av tilluftstemperaturen er som i forsøkshus og det simuleres fortsatt med dimensjonerende utetemperatur.



Figur 5-27: Effektbehov ved bruk av ovn til dekking av spisslast DUT

Behovet for bidrag fra ovn er størst på morgenen. Etter en natt med temperatursenking av tilluftstemperatur er husets termiske masse nedkjølt. Denne skal varmes opp i tillegg til luften i boligen. Ved konstant og umiddelbar oppstarts-effekt på 6 kW vil stuetemperatures settpunkt oppnås innen ca. 30 minutter. I virkeligheten vil oppstartstiden til vedovner være noe lengre. Ovnens virkelige effektforløp vil ha en karakteristikk som i Figur 3-1, hvor både ved- og pelletsfyring er illustrert. Den virkelige oppstartstiden er vanskelig å forutsi og vil ikke undersøkes nærmere i denne rapporten, men konsekvensen er at oppstartstiden på 30 minutter utvides. Maksimalt effektbehov for varmebatteriene har minket til omtrent 2100 W, mot opprinnelige 2500 W (side 64).

## 5.4. Analyse av resultater og feilkilder

### 5.4.1. Feilkilder

Det viser seg at det er en større forskjell mellom effektforløpet i IDA modellen og forsøkshuset for mars-døgnet (Figur 5-4). Dette kan komme av at utetemperaturen som benyttes i IDA er noe høyere både på dagtid og på natten enn under målingene (side 52). Det kan også være på grunn av en viss unøyaktighet i modellens gjengivelse av det virkelige huset.

Simuleringer for nesten soner kjøres i det som IDA kaller «Energy zone model fidelity», en simulering som kun gir gjennomsnittlig lufttemperatur og operativ temperatur i sonene. Alternativet til «Energy» er å kjøre med «Climate zone model fidelity» som gjengir temperaturgradienter og benytter en mer avansert beregningsmetode. Denne krever derfor at rommet er rektangulært. Simulering under sonemodell «Energy» tar kortere tid enn for «Climate». Det er absolutt interessant å forsøke «Climate» sonemodell for varmluftsoppvarming, men dette er ikke undersøkt nærmere i denne rapporten. Det er valgt fullstendig omrøring for alle soner i modellen. Det ville derfor ikke fått noe utfall ved kjøring i «Climate» sonemodell. Dette er antakeligvis en veldig stor forenkling av virkeligheten, men det er som nevnt ikke valgt å fokusere på temperaturgradienter i enkeltrom i simuleringene.

Det er valgt at varmetap i varmedistribusjonsanlegget har 50% tap tilbake til sonene, resten av varmen går altså tapt. Det er ikke undersøkt nærmere konsekvensen av å øke/minke andelen varmetap tilbake til sonene.

Ved simuleringer for dimensjonerende utetemperatur, kjøres simuleringer for tre like døgn hvor data for det siste døgnet fremstilles. At tre like kalde døgn forekommer like etter hverandre er antatt at skjer svært sjeldent og det ikke vil være representativt for store deler av fyringssesongen.

### 5.4.2. Analyse

Modellen i IDA og det virkelige forsøkshuset vil selvfølgelig aldri bli helt like. Men en sammenligning for resultatene fra mars-simuleringen og måleperioden er likevel foretatt (side 52). Dette for å forsikre seg om at modellen ikke er vesentlig forskjellig fra forsøkshuset når man fortsetter med simuleringer under andre omstendigheter.

Ved økning av tilluftstemperaturen til 55°C øker maksimalt effektbehov, men i gjengjeld oppnår man en raskere økning i romtemperatur (side 64). I IDA er oppgitt lufttemperatur en gjennomsnittlig verdi og forteller ingenting om temperaturgradienten i rommet. I henhold til tidligere nevnte forskningsrapport fra det tyske Passivhusinstituttet er 55°C den maksimalt akseptable tilluftstemperaturen for å unngå sviing av støv (Feist, et al., 2005). Rapporten forteller at en tilluftstemperatur på 40°C gir en temperaturgradient under 1 K, men den inneholder ikke konkrete strømnings tekniske observasjoner for en tilluftstemperatur på 55°C. En temperaturøkning på 15°C kan utgjøre en vesentlig forskjell for temperaturgradienten og bør studeres ytterligere i simuleringer og målinger.

Det er valgt å simulere med økte luftmengder for hele døgnet. Optimalt sett ville man forsert luftmengden ved behov, men man får på denne måten se konsekvensen av å ha en enklere, men mindre fleksibel reguleringsstrategi og ulempene dette medfører. Forseringen av luftmengden førte til at akseptable romtemperaturer på morgen inntraff tidligere, som forventet. Det man også ser er at ved 400 m<sup>3</sup>/h, som er middels forserte luftmengde, oppfyller man stuens settpunkt tidligst med en lavere maksimal effekt enn for høyere luftmengder. Årsaken til dette er at man ved høyeste forserte luftmengde også rekker å kjøle ned rommet mest under nattsinkingen, og får dermed et større oppvarmingsbehov på morgenen. Lavere luftmengder kjøler ned rommene mindre, men behøver igjen lengre tid på å oppnå riktig romtemperatur på morgenen. Man må vurdere om man virkelig bør ha nattsinking av tilluftstemperatur når de laveste utetemperaturene inntreffer og man får behov for forsering av luftmengder.

Tilluftstemperaturen er begrensende faktor for effektbehovet. For opprinnelig styringsstrategi med 245 m<sup>3</sup>/h tilluftsmengde er det maksimale totale effektbehovet lik 2500 W, men man ser at dette effektbehovet er kortvarig ved oppstart og at effekten like etter synker til 2200 W. Ved 55°C tilluft er maksimalt effektbehov lik 3700 W og synker raskt til omtrent 3200 W. For dobling av luftmengde blir totalt effektbehov lik 4300 W, som er maksimal installert effekt. Også dette behovet er kortvarig og synker raskt til ca. 4000 W. Det er altså mulig å sette et tak på maksimalt installert effekt for minimering av installasjonskostnader. Et slik effekttak vil antakeligvis bremse oppstartstiden men vil også ha mye å si for installasjonskostnaden for varmebatteri. Dimensjonerende faktorer for installert effekt ser ut til å være avhengig av om man vurderer bruk av forserte luftmengder som aktuell strategi og om man vurderer bruk av ovn for å dekke spisslast.

Det er valgt å gjøre simuleringer med alle innvendige dører åpne hele døgnet. Dette er vesentlig annerledes fra brukervaner i forsøkshus (side 21). På natten er det vanlig å ha dører lukket for å forhindre f.eks. varmetap fra bad eller varmetap til kaldere rom som f.eks. kjeller. Når det likevel velges å simulere med åpne dører er det fordi tidligere forskning viser at varmluftsoppvarming og bruk av ovn krever en større andel åpne innvendige dører for tilstrekkelig varmeoverføring mellom rom og jevnere temperaturer i hele boligen (Georges, et al., 2013) (Feist, et al., 2005). Men forskning viser også at avtrekk under dør er det mest hensiktsmessige for overtemperert lufttilførsel for høy ventilasjonseffektivitet og luftskifteeffektivitet (side 1). Men det er viktig å merke seg at avtrekk i spalte over dør ikke gir vesentlig lavere effektiviteter foran spalte over dør. I forsøksboligen så man at selv om avtrekket satt i taket på kjøkkenet og tilluftsventilen også var plassert i taket, litt over én meter fra avtrekk, var avtrekkstemperaturen omtrent 10°C lavere enn tilluftstemperaturen ved maksimal tilluftstemperatur.

## 6. Konklusjon

---

Målingene i forsøkshuset viste at varmluftsoppvarming under aktuelle forhold i Trondheim fungerte godt og varmen fordelte seg tilstrekkelig gjennom hele boligen. Beboerne hadde ingen andre kommentarer enn et ønske om tidligere stansing av nattsinkingen grunnet kjølige morgener. For simuleringer under lignende forhold som for måleperioden ser man at det termiske inn klimaet er tilfredsstillende gjennom hele døgnet i de viktigste oppholdssonene.

Temperaturgradientene var små for bolig 1 men stort sett større enn i bolig 2 og 3. Stuen er det mest kritiske rommet i bolig 1 og har de høyeste temperaturdifferansene på dagtid. «Stående» temperaturdifferanse ligger mellom 1.5 og 1.75°C hele dagen (side 27), komfortkravet på 3 K/m er likevel opprettholdt. Gjennomsnittlig temperaturdifferanse i trapperommet i bolig 1 er omtrent 3°C hele måleperioden. Man ser at differansen for bolig 2, som er varmet opp av radiator, varierer i større grad med utetemperaturen og er lavest for de høyeste utetemperaturene (vedlegg A. 52).

I forsøkshuset ble det målt et maksimalt varmetap fra kanalstrekket på 7°C. Denne ble målt for kanalstrekket aggregat-soverom på dagtid. På natten økte tilluftstemperaturen 3°C i samme kanal. Varmetapet på dagtid får ikke negative konsekvenser da soverommet ikke brukes som oppholdsrom på dagen. Men temperaturøkningen på natten er uheldig da soverommet er selve årsaken til nattsinkingen. Dette understreker betydningen av å isolere kanalstrekk som går forbi soner hvor man ikke ønsker hverken varmetap eller varmetilførsel, for å få en mer forutsigbar og korrekt varmefordeling til rommene.

Tilluftstemperaturen er begrensende faktor for effektutnyttelse av varmebatteriene ved lave luftmengder. For dimensjonerende utetemperatur er tilluftstemperaturen konstant lik 40°C store deler av driftsperioden for det eksterne varmebatteriet. Tiltak som har vist seg å være effektive for å minimere nødvendig periode med maksimal tilluftstemperatur er å; øke tilluftstemperaturen, øke tilluftsmengden, minke periode for nattsinking av tilluftstemperatur, øke settpunkt-temperatur på nattsinkingen og benytte bistand fra oven på morgenen.

Økning av tilluftstemperatur utover 40°C og opp mot 55°C er en endring som kan være aktuell for norske forhold for å sikre komfort i perioder med lave utetemperaturer. Temperaturen på 55°C er oppgitt å være en grense for å unngå sviing av støv (Feist, et al., 2005). Temperaturøkningen viser seg å være spesielt nyttig på morgenen for en hurtig økning av romtemperaturen i oppholdsrommene dersom nattsinking er tatt i bruk. Ut fra simuleringresultatene kan man ikke trekke konklusjoner for komfortforhold med denne tilluftstemperaturen. Det er heller ikke utført fullskalamålinger på hvordan denne drastiske økningen i tilluftstemperatur vil påvirke temperaturgradienten i rommet.

Bruk av nattsinking for tilluftstemperatur er både benyttet i forsøkshuset og i simuleringene. I forsøkshuset opplevde beboerne en behagelig sovetemperatur, men en noe kald morgentemperatur i hele huset. Dette foreslås løst med en tidligere oppstart av varmebatteriene. Man fikk et høyt effektbehov på morgenen men dette sank utover dagen med synkende oppvarmingsbehov. I simuleringene for dimensjonerende utetemperatur så man at



nattsenkningen førte til en større nedkjøling av hele boligen. Forserte luftmengder kan benyttes i kortere perioder ved behov. Ved bruk av nattsinking ser man at forsering av luftmengder for hele døgnet naturligvis fører til ytterligere nedkjøling. Om man skal benytte en variert eller konstant tilluftstemperatur over døgnet må veies opp mot konsekvenser for komfort og energibesparelser.

Total installert effekt for varmebatterier i forsøkshuset er lik 4300 W, 1300 W i aggregatets varmebatteri og 3000 W i eksternt varmebatteri. Maksimal effekt har kort varighet ved oppstart av varmebatteri og det antas at man for hvert av tilfellene over kan redusere installert effekt (side 70). Dette må veies opp mot forsinkelse for oppstarttid av romoppvarmingen. Forsering av luftmengde og bruk av ovn er dimensjonerende faktorer for maksimalt installert effekt. Dobling av luftmengde gir et maksimalt effektbehov på 4300 W som synker raskt til 4000 W. Men maksimal tilluftstemperatur som oppnås ved denne luftmengden er bare 35 °C.

Som diskutert i avsnitt 4.3.2 og 5.4.2 er det ikke klart om åpning av dører gir økt risiko for kortslutningsventilasjon. Anbefalinger fra tidligere forskning er at dører bør stå åpne for jevn fordeling av luftvarme og varme fra ovn i hele boligen. I tillegg viser forskning at avtrekk ved gulv, og da ofte gjennom spalt under innvendige dører, gir den beste ventilasjons- og luftskifteeffektiviteten. Men åpning i spalt over dør har ikke påvist vesentlig lavere effektiviteter. I stue i forsøkshus er avtrekksventil plassert i tak like ved tilluftsventil. Men man ser likevel ikke tydelige tendenser til kortslutningsventilasjon. Den horisontale retningen for den radielle tilluftsventilen er mulig å variere, og det at denne er vendt bort fra avtrekket er åpenbart en fordel. Det kan altså se ut som at omrøring av romluft skjer i større grad for forsøkshuset, og at risiko for kortslutningsventilasjon er lav.

Forsøksboligen brukte beboerne stort sett å ha lukkede dører både natt og dag, med unntak av gjennomgang. På tross av dette følte beboerne en god komfort og at varmen spredte seg i huset.

I de fleste av simuleringene i kapittel 5 brukes dimensjonerende utetemperatur. Dersom slike forhold inntreffer antas det at beboere er villige til å tilpasse sine brukervaner i kortere perioder. Åpning av dører vil være en slik tilpasning. Spørsmålet om bruk av varmluftsoppvarming i Norge går altså ut på hvor mye vi er i stand til å strekke oss med tanke på komfort, når denne utfordres bare noen få dager i fyringssesongen, og hvilke tilpasninger som kan gjøres for å forbedre komforten. Feltnmålinger som er utført i forbindelse med denne rapporten viser gode resultater for varmluftsoppvarming av et rekkehus i Trondheim men konklusjonen er at temaet må studeres videre for andre temperaturforhold og boligtyper.

## 7. Forslag til videreføring av arbeidet

---

Lignende målinger som er foretatt i denne rapporten, burde forsøkes gjennomført ved dimensjonerende utetemperatur og lavt solinnskudd ved diverse geografiske plasseringer i Norge. Dermed kan man kartlegge hvor i Norge varmluftsoppvarming ikke vil være egnet. Det er i tillegg nødvendig med en bredere analyse av ulike boligtyper og planløsningenes betydning for egnetheten av varmluftsoppvarming.

Det er også interessant å utelukke nattsinking av tilluftstemperaturen for å undersøke om dette har en vesentlig betydning for nødvendig installert oppvarmingseffekt og komfort. Det har i tillegg blitt diskutert en øvre grense for tilluftstemperatur, og det er interessant å utføre forsøk hvor denne grenseverdien vurderes i forhold til temperaturgradienter i rommet og temperaturfordeling i hele boligen.

Datamaterialet fra IDA ICE 4.5 er omfattende og kan analyseres i mye større grad enn i denne rapporten. Det er her kun valgt å fokusere på det som antas å være relevant informasjon i denne sammenhengen; effektforbruk i aggregatet (totalt for varmebatteriene) i tillegg til forløp for temperaturer i aggregat og i viktige oppholdssoner som stue og soverom. For et mer helhetlig bilde av modellen bør man sammenligne temperaturer i alle soner. I tillegg bør man studere variasjoner av selve modellen ytterligere, som f.eks. lukkede innvendige dører og betydningen av internlastenes størrelse og timeplan.

Som diskutert i avsnitt 5.4.1 har man mulighet til å gjennomføre simuleringer i en såkalt «Climate» sonemodell i IDA. Denne funksjonen anbefales å utforskes videre i sammenheng med varmluftsoppvarming. Men da bør også sonemodellens grunnlag for beregninger studeres ytterligere.

Simuleringer for forserte luftmengder er utført slik at den forserte luftmengden er konstant for hele døgnet. Det kan være interessant å studere virkningen av å forserte luftmengden i en kortere periode på morgenen. Det er antakeligvis i denne perioden det vil være mest nødvendig med forsering, også uten nattsinking.

For videre arbeid er det mulig å gjøre flere simuleringer for hele året, spesielt med tanke på overoppheting i sommerhalvåret, da dette har vist seg å være en utfordring for passivhus. Helårssimuleringer vil også gi informasjon om totalt energibruk og størrelsesforholdet på energibruket, for sammenligning med andre typer oppvarmingsanlegg.

## Terminologi

---

Atopisk – arvelig disponert for sykdommer som astma, allergisk rhinitt eller atopisk eksem.

Termisk inneklima – Omfatter lufttemperatur, middelstråletemperatur, lufthastighet, termisk asymmetri og luftfuktighet.

Atmosfærisk inneklima – Omfatter luftfuktighet, luftkvalitet og luftbårne forurensninger.

Arkimedestall [Ar] – Forholdstall mellom oppdriftskrefter og treghetskrefter i strømning.

Veggstråle/klebeeffekt – Luftstråle tilføres parallelt langs en flate og kleber seg fast til overflaten på grunn av trykkforskjeller mellom strålen og luften langs flaten.

«Stående» temperaturdifferanse – Vertikal temperaturdifferanse mellom målepunkter som er 1.7 og 0.1 meter over gulv.

«Sittende» temperaturdifferanse – Vertikal temperaturdifferanse mellom målepunkter som er 1.1 og 0.1 meter over gulv. Anbefaling for komfort er en sittende temperaturdifferanse  $\leq 3$  K.

IFC-format – Industry foundation classes. Et åpent, standardisert filformat som kommuniserer bygningskroppens form og materialer. Benyttes i forbindelse med BIM (Building Information Modeling).

DWG-format – DraWingG. Filformat som inneholder 2- og 3-dimensjonale data. Grunnformat for ulike CAD-programmer (Computer-aided design).

## Kilder

---

- Bakke, J. V., 4/2007. Oppvarming - Varmekilder og inneklima. *Allergi i Praxis*.
- Berner, M. & Mathisen, H. M., 2012. *Oppvarming av norske eneboliger med bruk av varmluftsoppvarming*, Trondheim: Sintef.
- Etheridge, D. & Sandberg, M., 1996. *Building ventilation - Theory and measurement*. 1st red. England: John Wiley & Sons.
- Feist, W., Schnieders, J., Dorer, V. & Haas, A., 2005. Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept. *Energy and Buildings*, 37(11), pp. 1186-1203.
- FLEXIT AS, 2012. *Personlig meddelelse via e-mail*. s.l.:s.n.
- FLEXIT AS, 2013. *UNI 4*. [Internett]  
Available at: <http://www.flexit.no/produkter/luftbehandlingsaggregater/boligaggregater/UNI4/>  
[Funnet 1 Mai 2013].
- FLEXIT, 2013. *Avtrekkventil plast / Tilluftsventil runde*. [Internett]  
Available at: <http://www.flexit.no/produkter/Ventiler/Ventiler-for-mekanisk-ventilasjon/>  
[Funnet 1 Mai 2013].
- geminidataloggers.com, 2013. *TinyTag TGP-4500*. [Internett]  
Available at: [http://www.geminidataloggers.com/file/loggers\\_variant/datasheet/tgp-4500.pdf](http://www.geminidataloggers.com/file/loggers_variant/datasheet/tgp-4500.pdf)  
[Funnet 1 Mai 2013].
- Georges, L., 2013. *Personlig meddelelse*. s.l.:s.n.
- Georges, L., Berner, M. & Mathisen, H. M., 2013. *Analysis of the Air Heating in Norwegian Passive Houses using Detailed Dynamic Simulations*, Trondheim: NTNU.
- Georges, L., Skreiberg, Ø. & Novakovic, V., 2012. On the proper integration of wood stoves in passive houses: Investigation using detailed dynamic simulations. *Energy and Buildings*, Issue 59, pp. 203-213.
- Heimdal Bolig AS, 2013. *Personlig meddelelse*. Trondheim: -.
- Jones, R., Hughes, C., Wright, D. & Baumer, J., 1999. *Early house moves, indoor air, heating methods and asthma*, UK: Respir Med.
- Krajcik, M., Simone, A. & Olesen, B. W., 2012. Air distribution and ventilation effectiveness in an occupied room heated by warm air. *Energy and Buildings*, Volum 55, pp. 94-101.
- maximintegrated.com, 2013. *iButton*. [Internett]  
Available at: <http://www.maximintegrated.com/datasheet/index.mvp/id/4088>  
[Funnet 1 Mai 2013].

Meteorologisk institutt, 2013. *eKlima*. [Internett]

Available at: <http://www.eklima.no>

[Funnet 2013].

Nilsson, P. E., 2003. *Achieving the Desired Indoor Climate*. Denmark: The Commtech Group.

NS 3700, 2010. *Kriterier for passivhus og lavenergihus - Boligbygninger*. [Internett]

Available at: <http://www.standard.no>

[Funnet 11 September 2012].

NS-EN 15251, 2007. *Inneklimateparametre for dimensjonering og vurdering av bygningers energiytelse inkludert inneluftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustikk*. [Internett]

Available at: <http://www.standard.no>

[Funnet 11 September 2012].

Petersen, A. J. et al., 2009. *Forhold tilknyttet bruk av roterende gjenvinnere i skolen*, Oslo: Erichsen & Horgen A/S og SINTEF Energiforskning A/S.

SINTEF AS, 2013. *Lettere tilgjengelig passivhusinfo*. [Internett]

Available at: <http://www.sintef.no/Byggforsk/Nyheter/Lettere-tilgjengelig-passivhusinfo/>

[Funnet 1 Mai 2013].

Skåret, E., 2000. *Ventilasjonsteknisk håndbok*. Håndbok 48 red. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.

Standard Norge, 2007. *NS-EN 15251*, Oslo: CEN.

Systemair, 2013. *Elegant VT-125 Diffuser*. [Internett]

Available at: [http://www.systemair.com/Elegant-VT-125-Diffuser\\_nbno-6207.aspx](http://www.systemair.com/Elegant-VT-125-Diffuser_nbno-6207.aspx)

[Funnet 1 Mai 2013].

Sørensen, H. H., 1996. *Ventilation Ståbi*. København: Teknisk forlag A/S.

Thomsen, J. & Berge, M., 2012. *Inneklimate i energieffektive boliger - en litteraturstudie*, Trondheim: SINTEF AS.

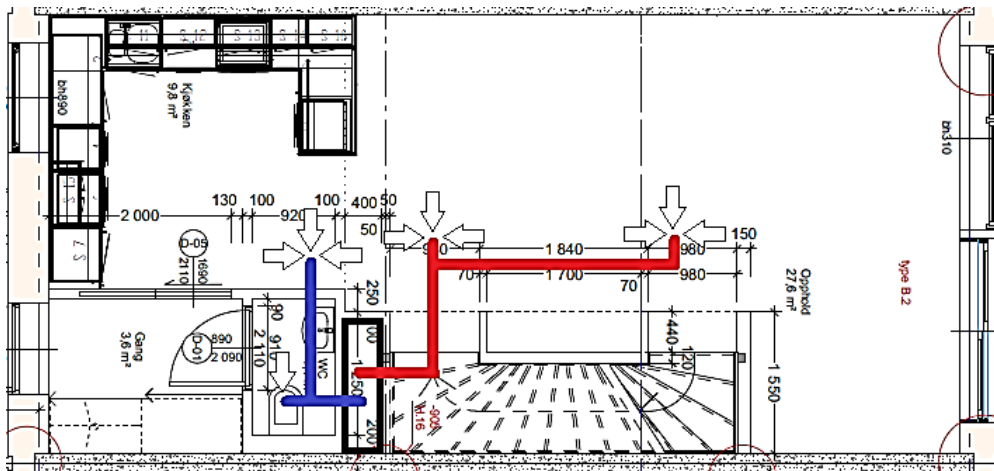
tsi.com, 2013. *Velocicalc Plus TSI 8388*. [Internett]

Available at: <http://www.tsi.com/velocicalc-plus-air-velocity-meter-8388/>

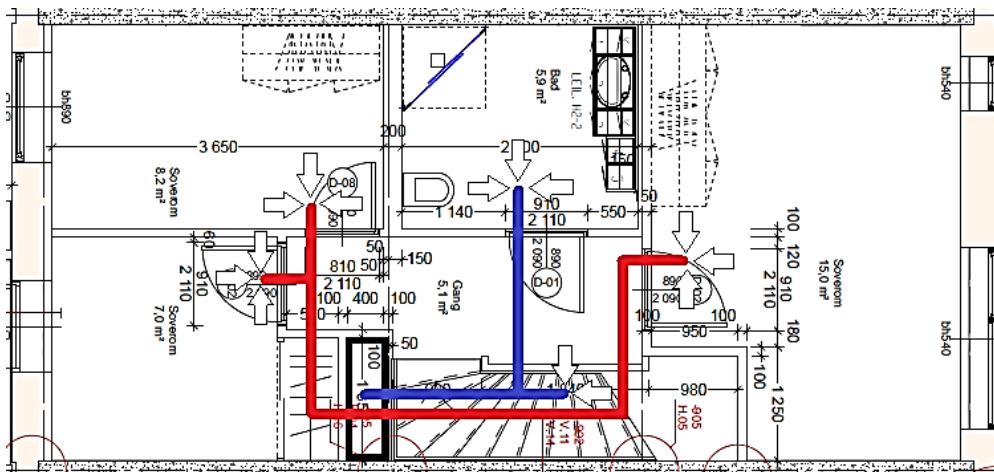
[Funnet 1 Mai 2013].

# Vedlegg A

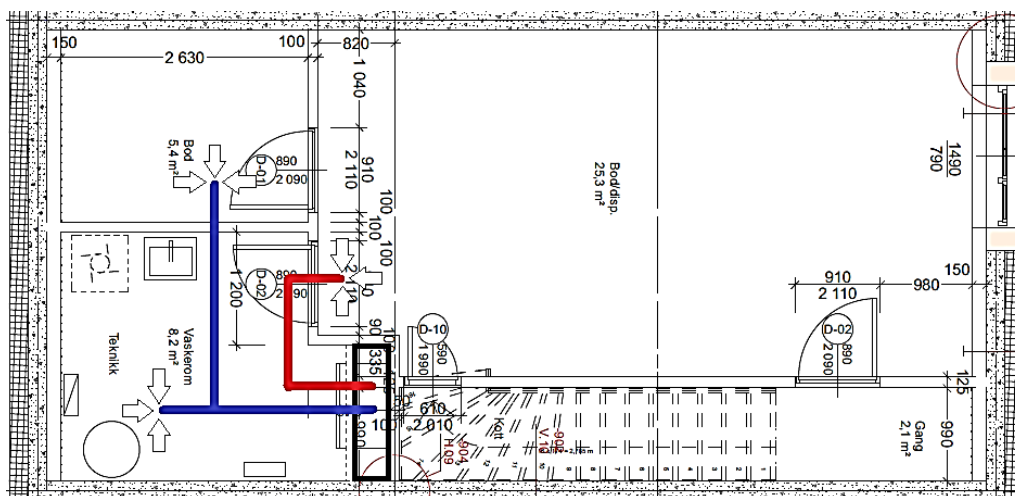
A. 1: Kanaler - 1. etg<sup>2</sup>



A. 2: Kanaler - 2. etg<sup>2</sup>

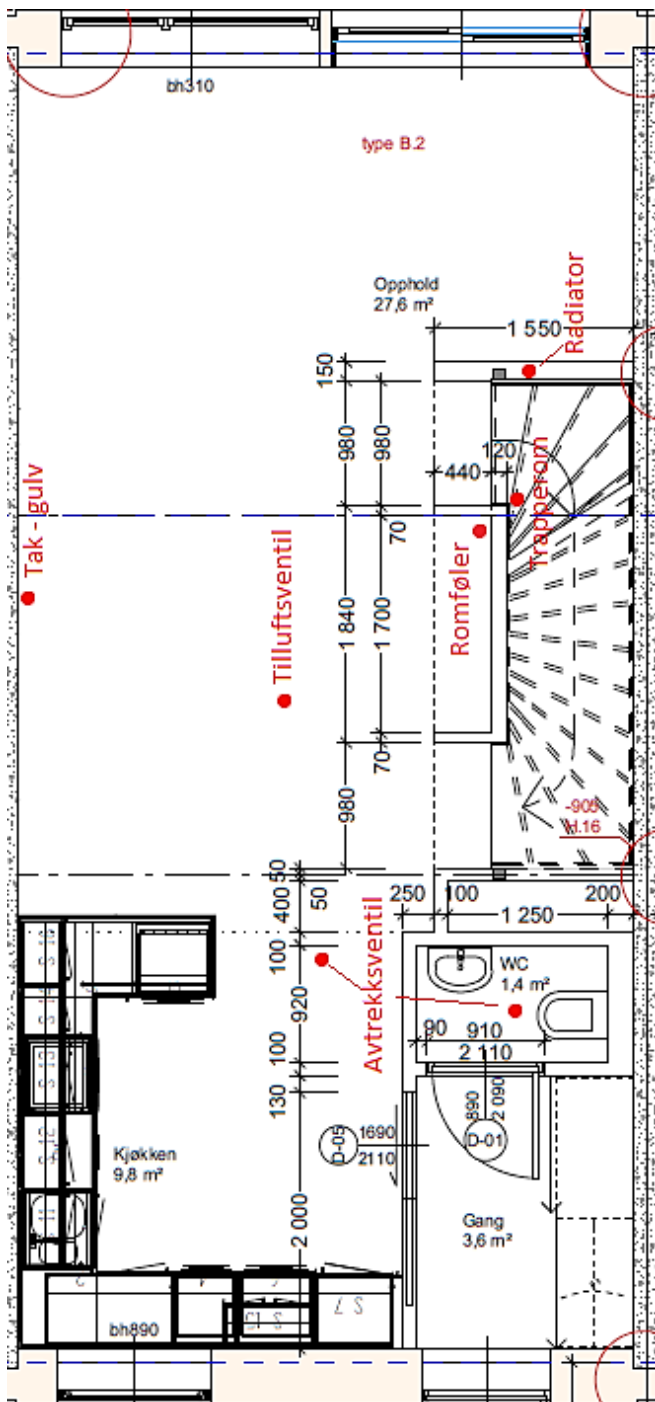


A. 3: Kanaler - 3. etg<sup>2</sup>



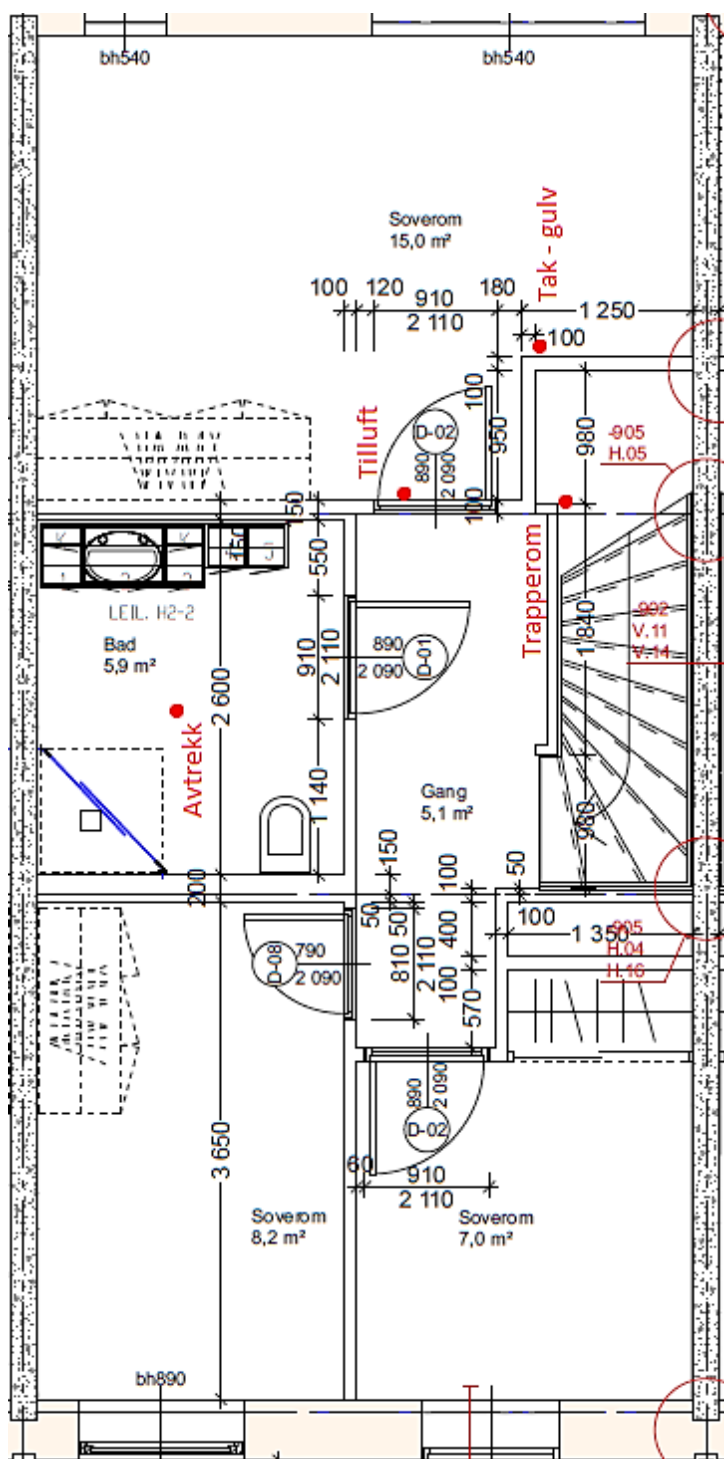
<sup>2</sup> Dette er ikke tekniske kanaltegninger, de er kun laget for å illustrere ventilplasseringer.

A. 4: Målerplassering - 1. etg<sup>3</sup>



<sup>3</sup> Det er ikke tatt hensyn til nøyaktig plassering av målepunkter.

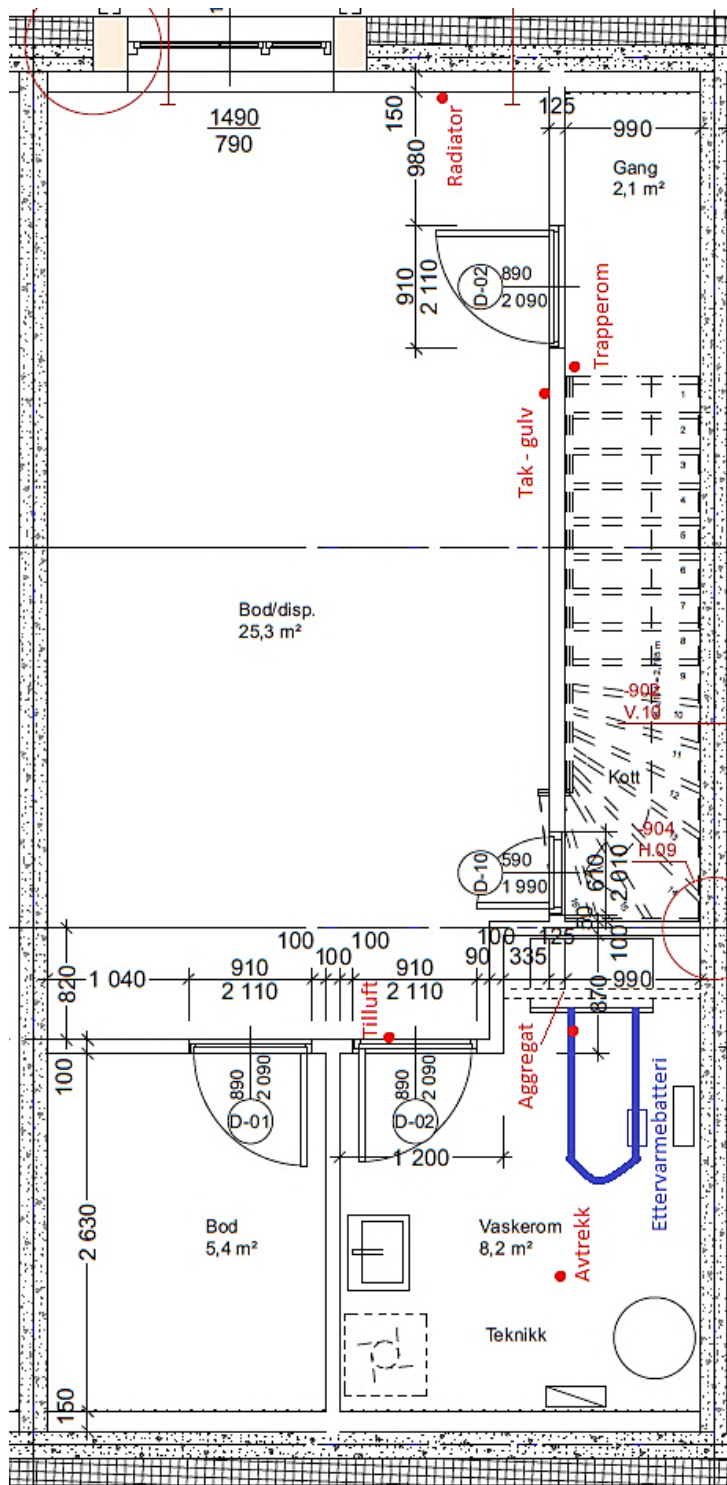
A. 5: Målerplassering - 2. etg<sup>4</sup>



<sup>4</sup> Det er ikke tatt hensyn til nøyaktig plassering av målepunkter.



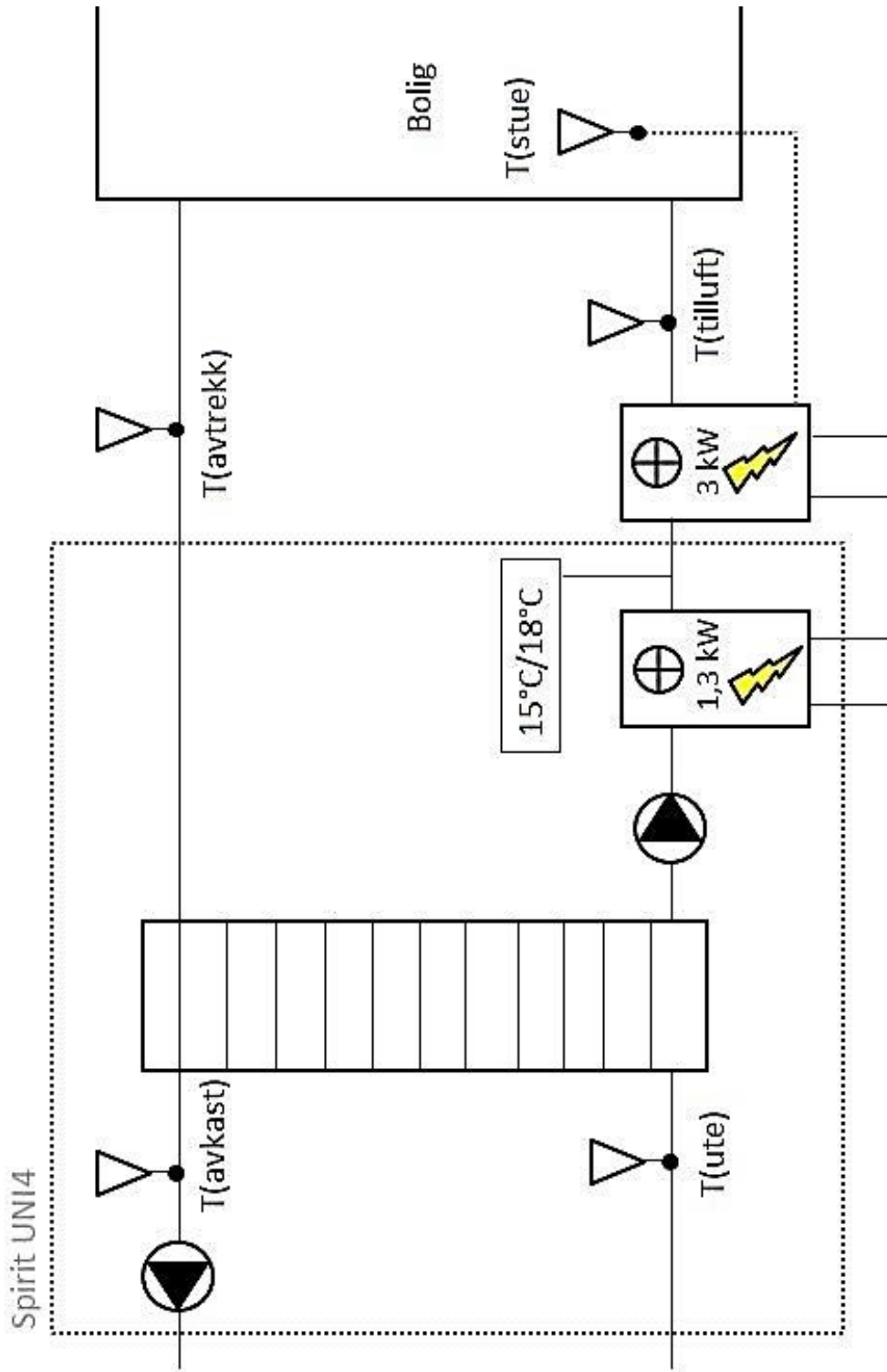
A. 6: Målerplassering - kjeller<sup>5</sup>



<sup>5</sup> Det er ikke tatt hensyn til nøyaktig plassering av målepunkter.

A. 7: Målerplassering i aggregat

Plassering av loggere - Aggregat



A. 8: Installasjon av varmebatteri i forlenging av tilluftskanal



## *A. 9: Feltarbeidsrapport*

Feltarbeid - Varmeluftsoppvarming av passivhus

Student: Marianne Nordlund Holte

Veileder: Hans Martin Mathisen

### Måleoppsett:

Forsøket går ut på å gjøre feltarbeid i 3 rekkehus i Miljøbyen Granåsen. Formålet med forsøket er å måle temperaturer og ventilasjonseffektivitet i en bolig som kun varmes opp av varmluft. 2 av husene vil fungere som referansehus og vil ikke få modifiserte anlegg.

I ett av husene skal det installeres et ekstra varmebatteri i tillegg til et styringssystem. Dette utføres og driftes av fagfolk og tilbakestilles også av samme firma når forsøket er over.

Temperaturlogger iButton skal plasseres langs vegger i oppholdsrom i alle etasjer. Loggerne legges i plastlommer som festes til hyssing som henger fra tak til gulv. Plastlommen hindrer også at barn får tak i selve loggeren. Hyssingen festes i en skrue i taket og festes til veggen med tape helt nederst. Inne i tillufts- og avtrekksventiler og bak radiatorer festes plastlommene fast med tape. Beboere gjøres oppmerksom på at barn og husdyr holdes unna loggere.

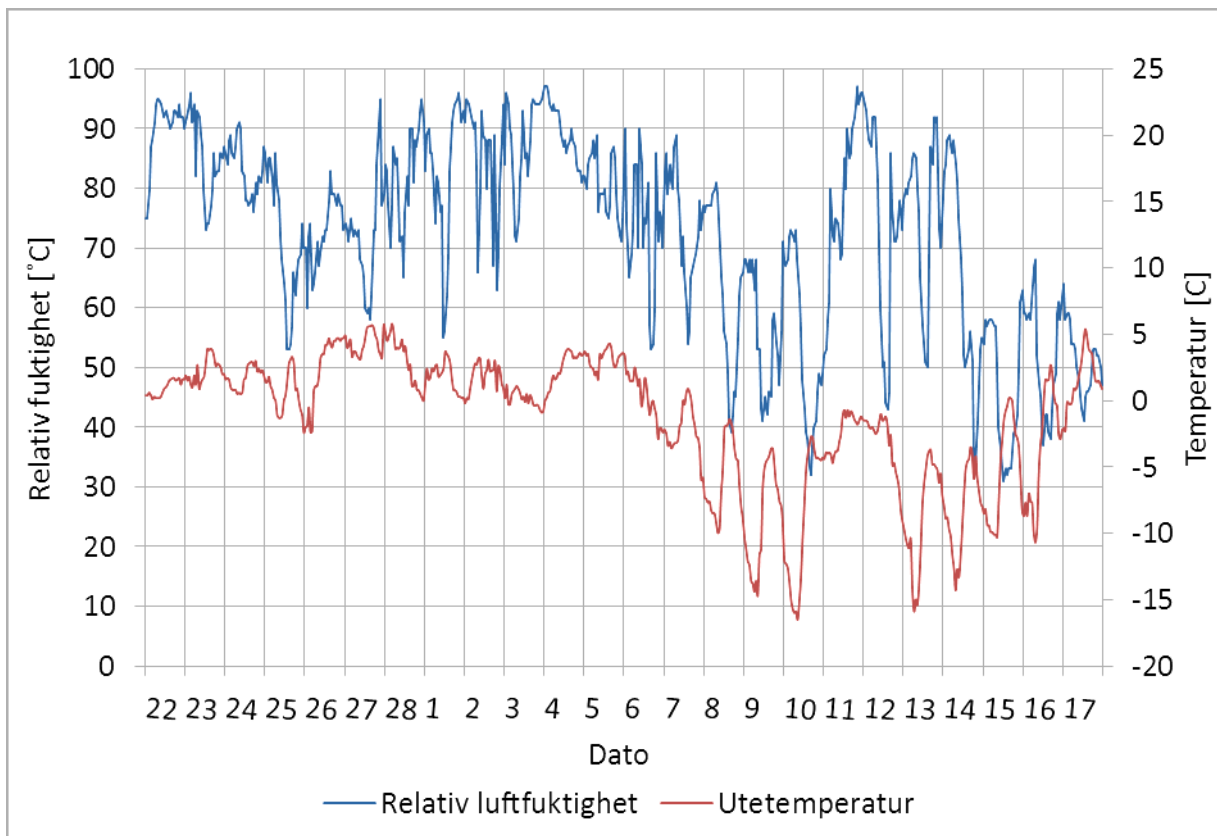
I ventilasjonsaggregatet og i kanalen rett etter ekstra varmebatteri plasseres temperatur- og fuktmålere av typen TinyTag.

### Arbeidsbeskrivelse:

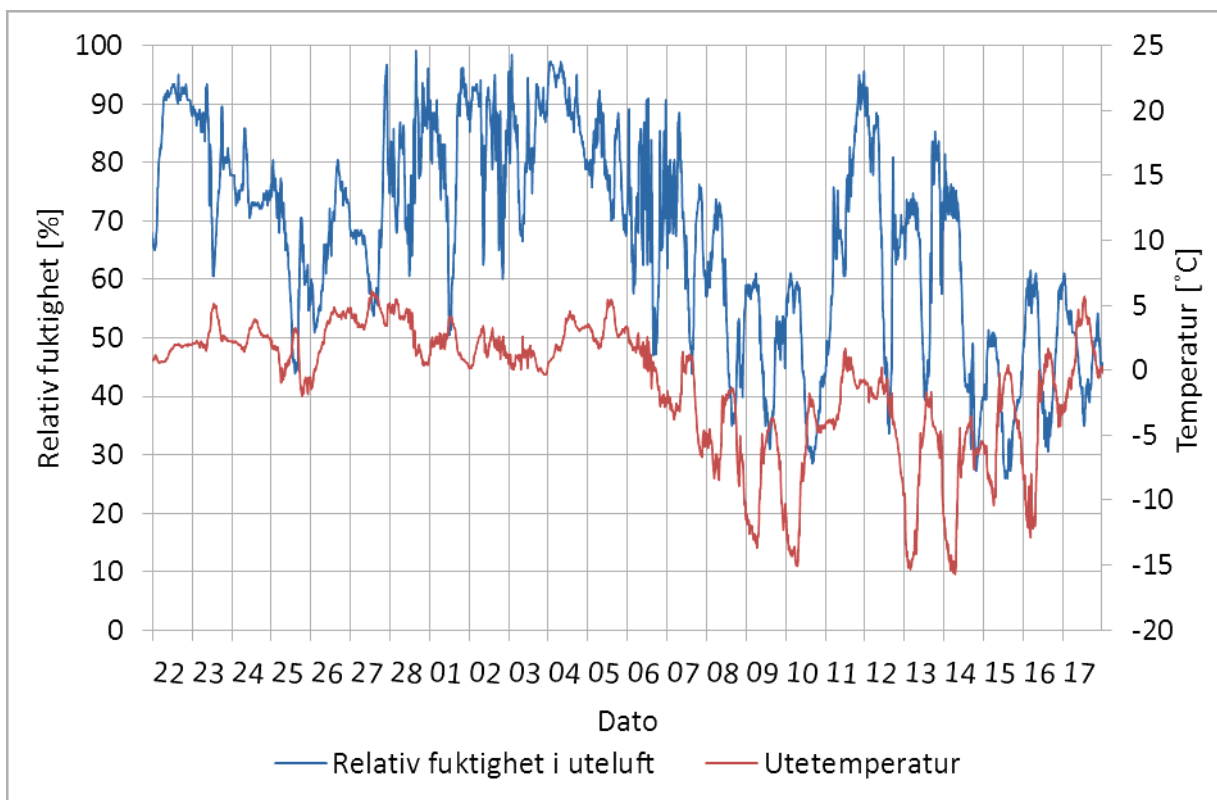
Kontrollmålinger av temperaturer skal gjennomføres noen dager etter igangsettelse av forsøket. Én av målerne må byttes ut hver 11. dag. Det skal utføres luftmengdemåling i kanal og sporgassmålinger. Ved endt måleperiode hentes alle loggere inn for tømning av data.

Risiko forbundet med feltarbeidet er lav.

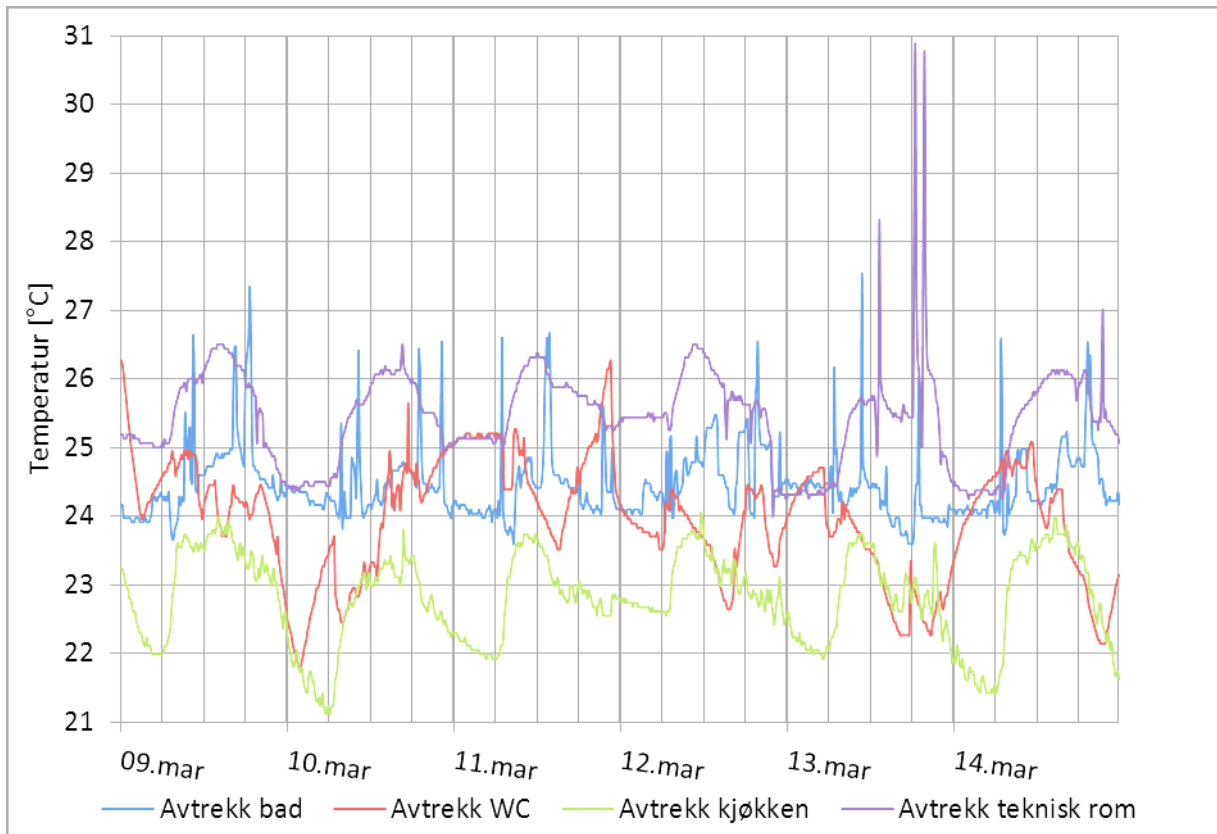
A. 10 Relativ luftfuktighet og temperatur for uteluft i måleperiode - fra [www.eklima.no](http://www.eklima.no)



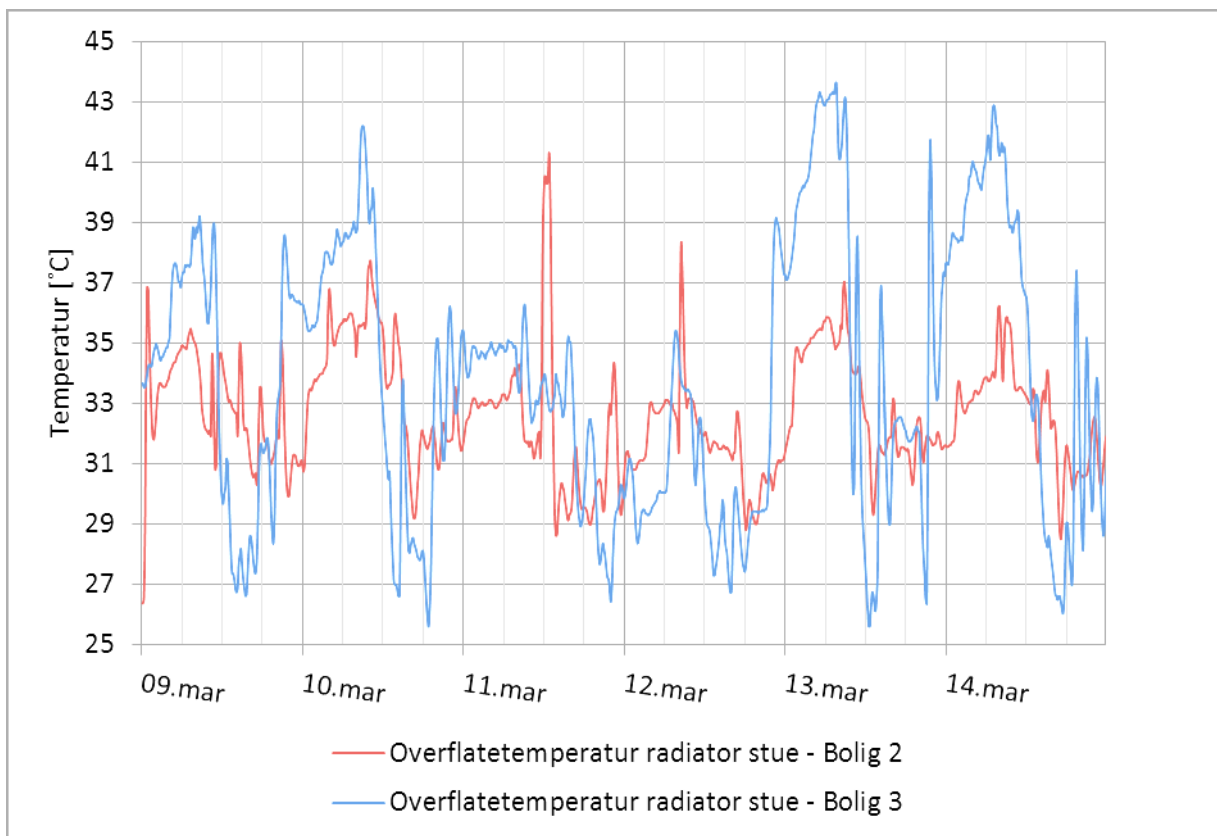
A. 11: Relativ luftfuktighet og temperatur for uteluft i måleperiode målt med TinyTag



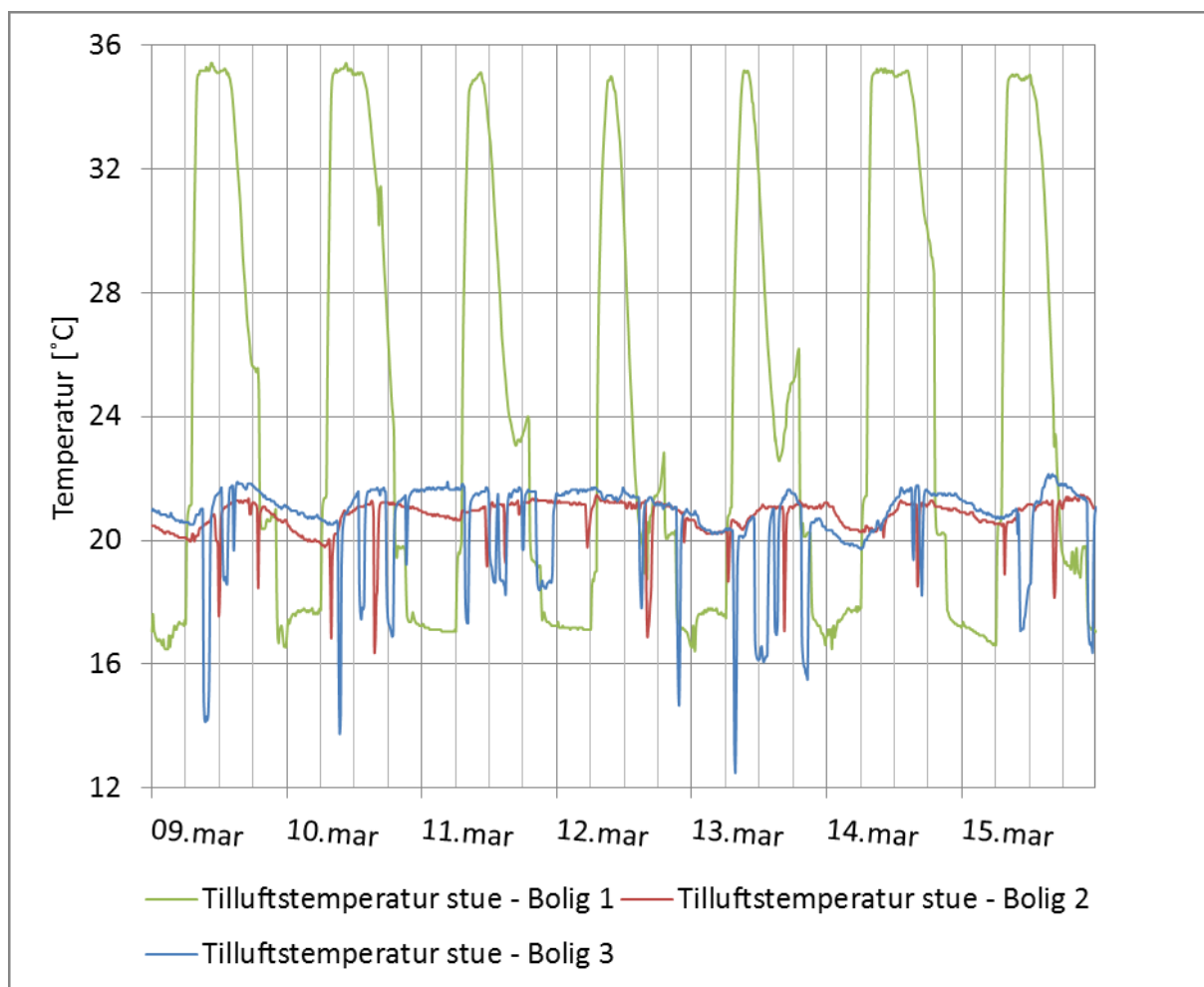
A. 12: Bolig 1 - Temperaturer i avtrekk i kald periode



A. 13: Bolig 2 og 3 - Radiatorbruk i kald periode



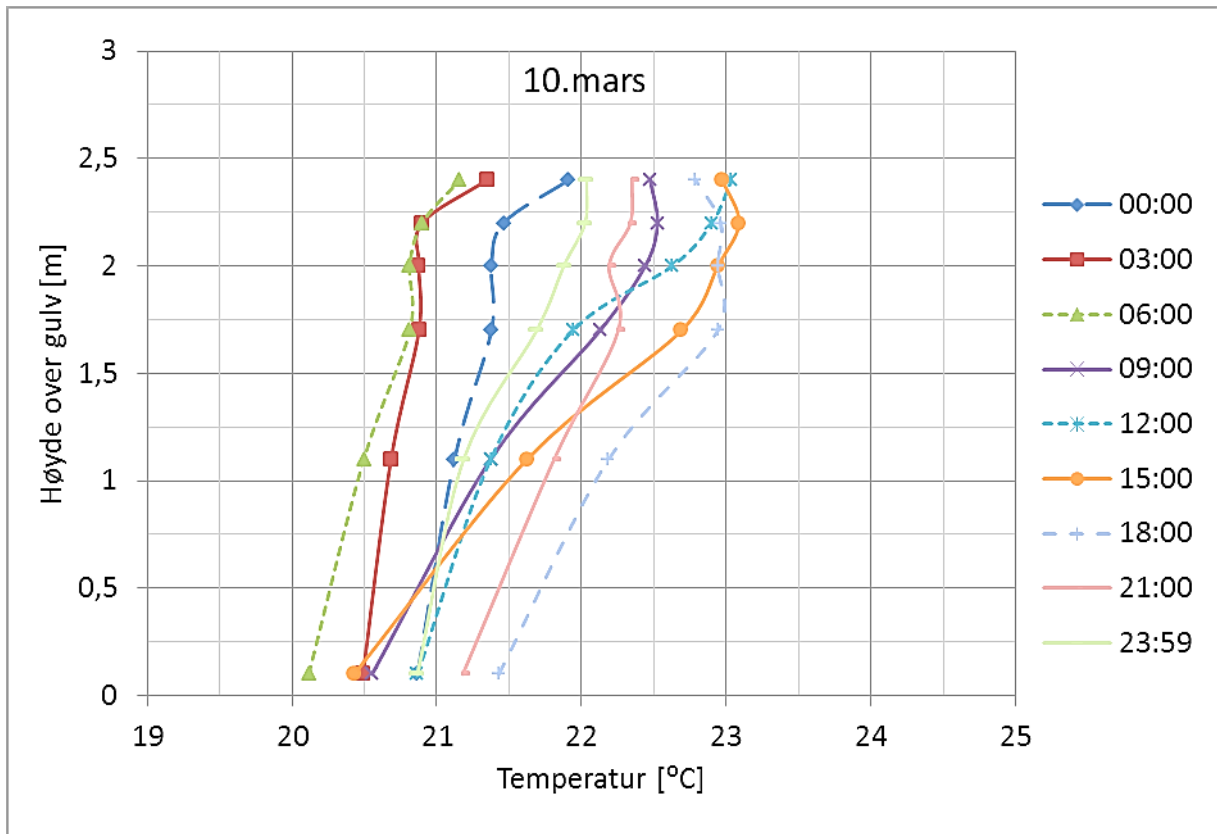
A. 14: Bolig 1/2/3 - Tilluftstemperatur i stue



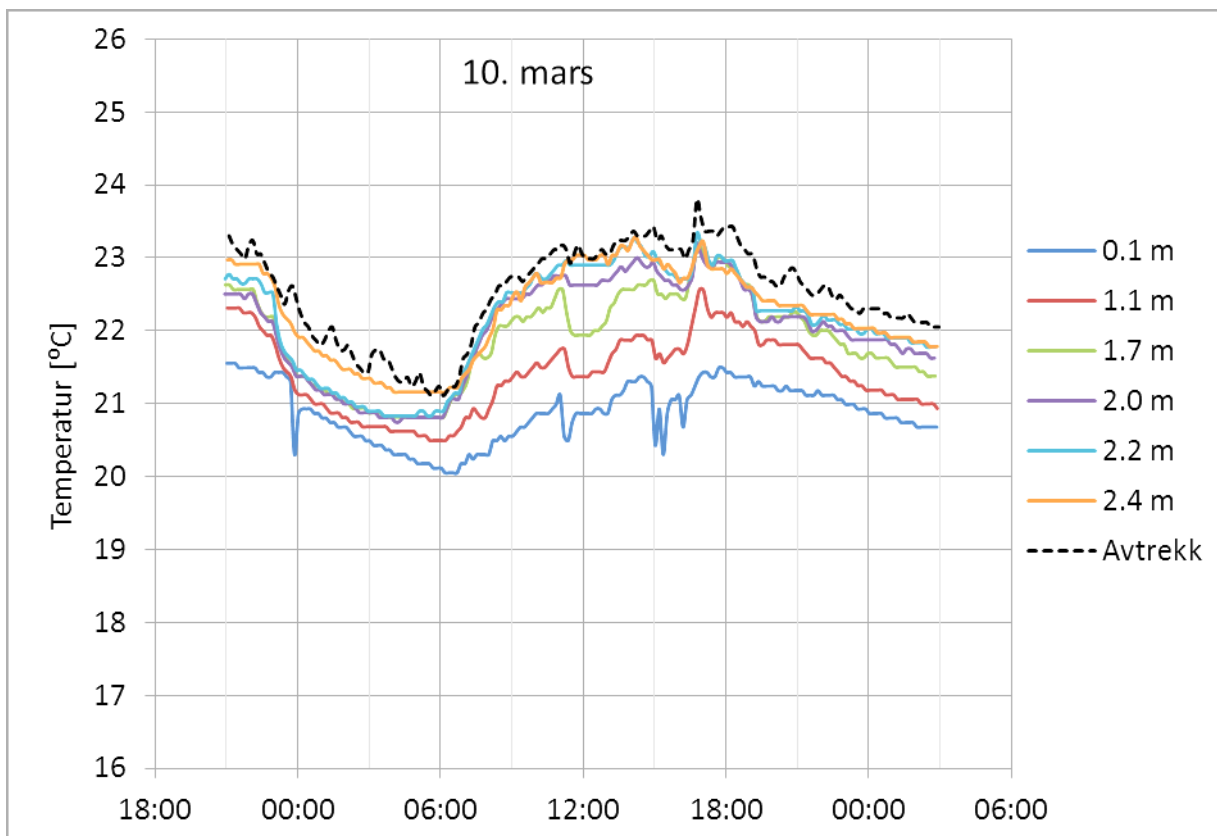
A. 15: Bolig 1/2/3 - Maksimale temperaturdifferanser i stue

	Stående [°C]	Kl.	Sittende [°C]	Kl.
Bolig 1, 10. mars	2.3	15:00	1.3	15:30
Bolig 2, 10. mars	2.7	13:30	2.5	13:30
Bolig 3, 10. mars	0.9	09:00	0.7	09:00
Bolig 1, 14. mars	2.0	14:10	1.4	14:00
Bolig 2, 14. mars	3.3	08:30	3.2	08:30
Bolig 3, 14. mars	1.8	15:00	1.4	15:00

A. 16: Bolig 1 - Temperaturfordeling i stue 10. mars - høyde(temperatur)

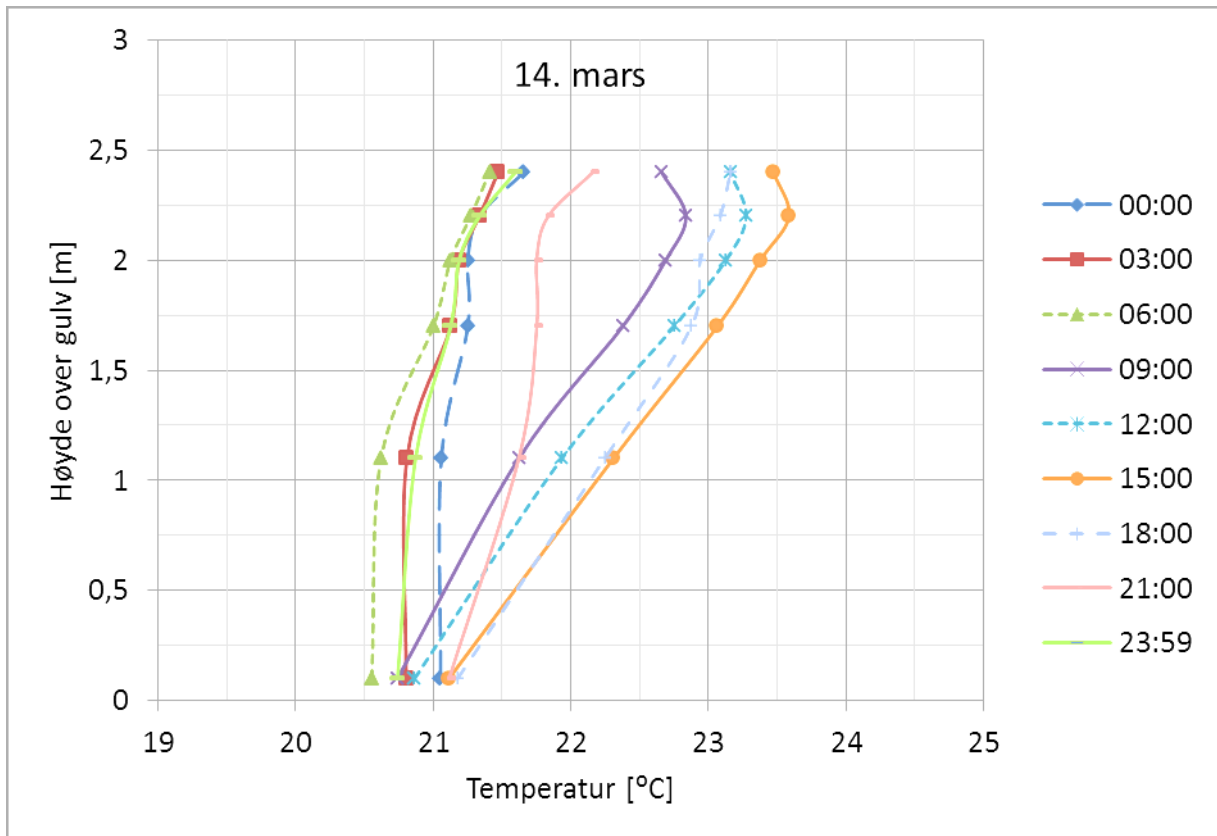


A. 17: Bolig 1 - Temperaturfordeling i stue 10. mars - temperatur(tid)

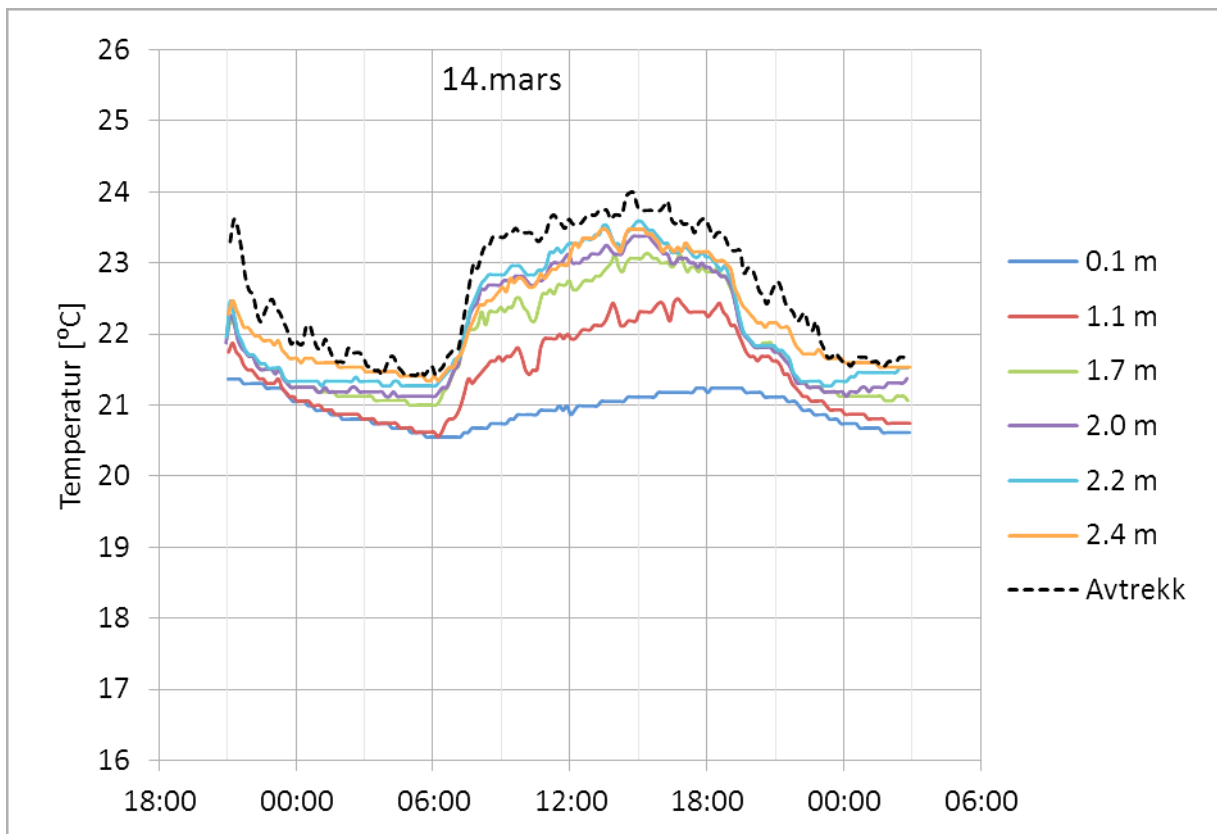




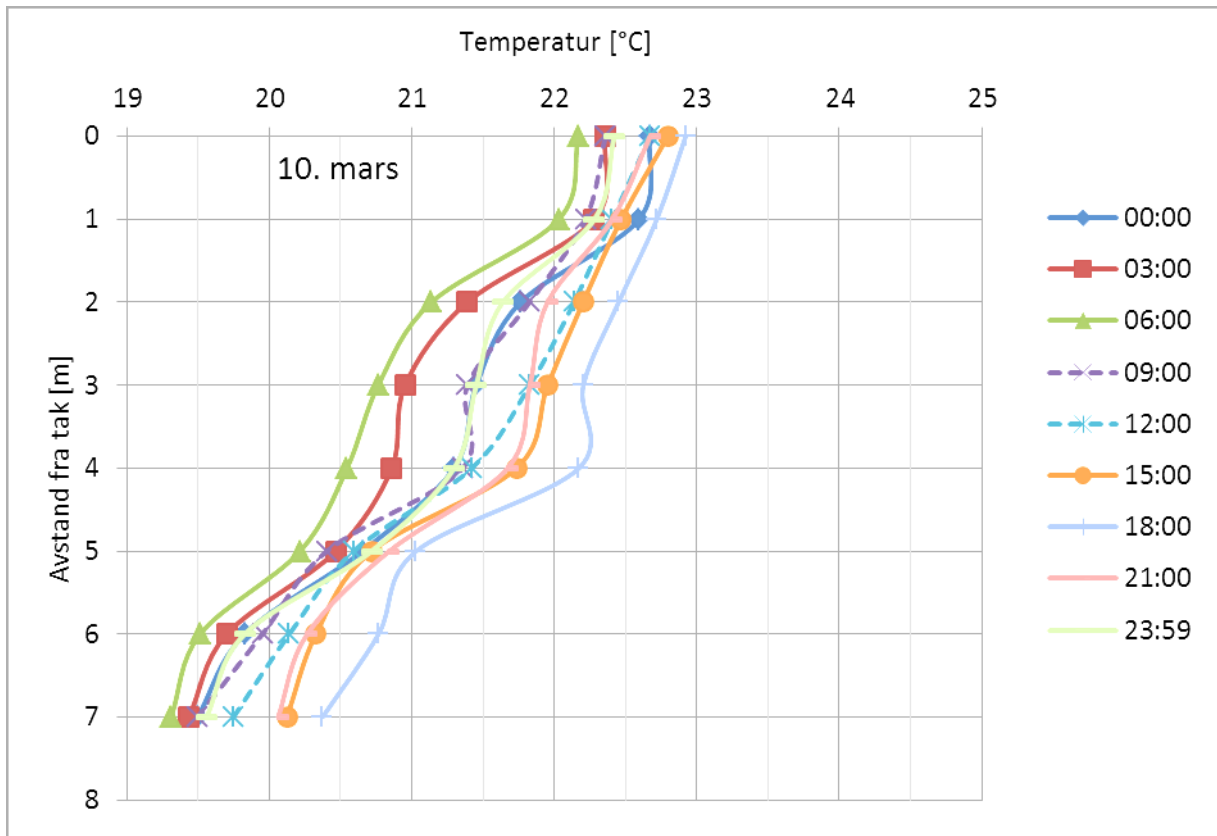
A. 18: Bolig 1 - Temperaturfordeling i stue 14. mars - høyde(temperatur)



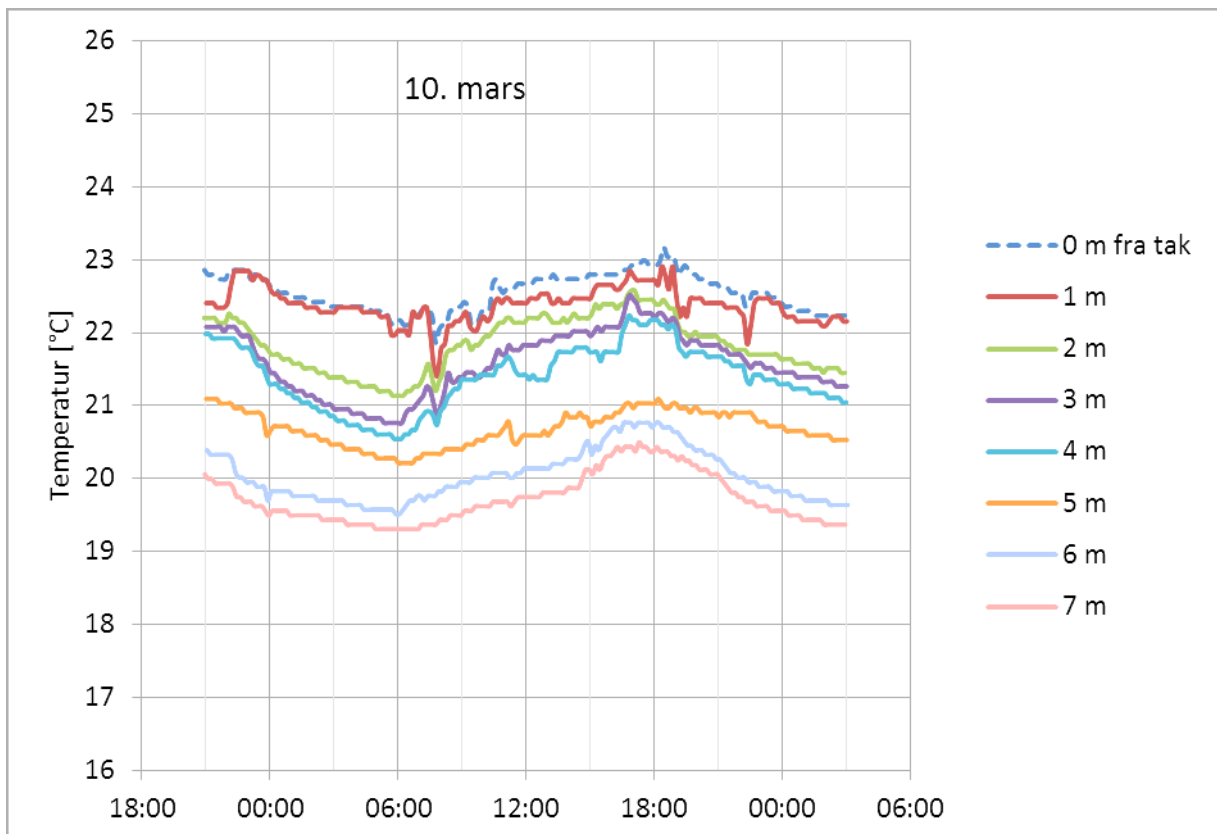
A. 19: Bolig 1- Temperaturfordeling i stue 14. mars - temperatur(tid)



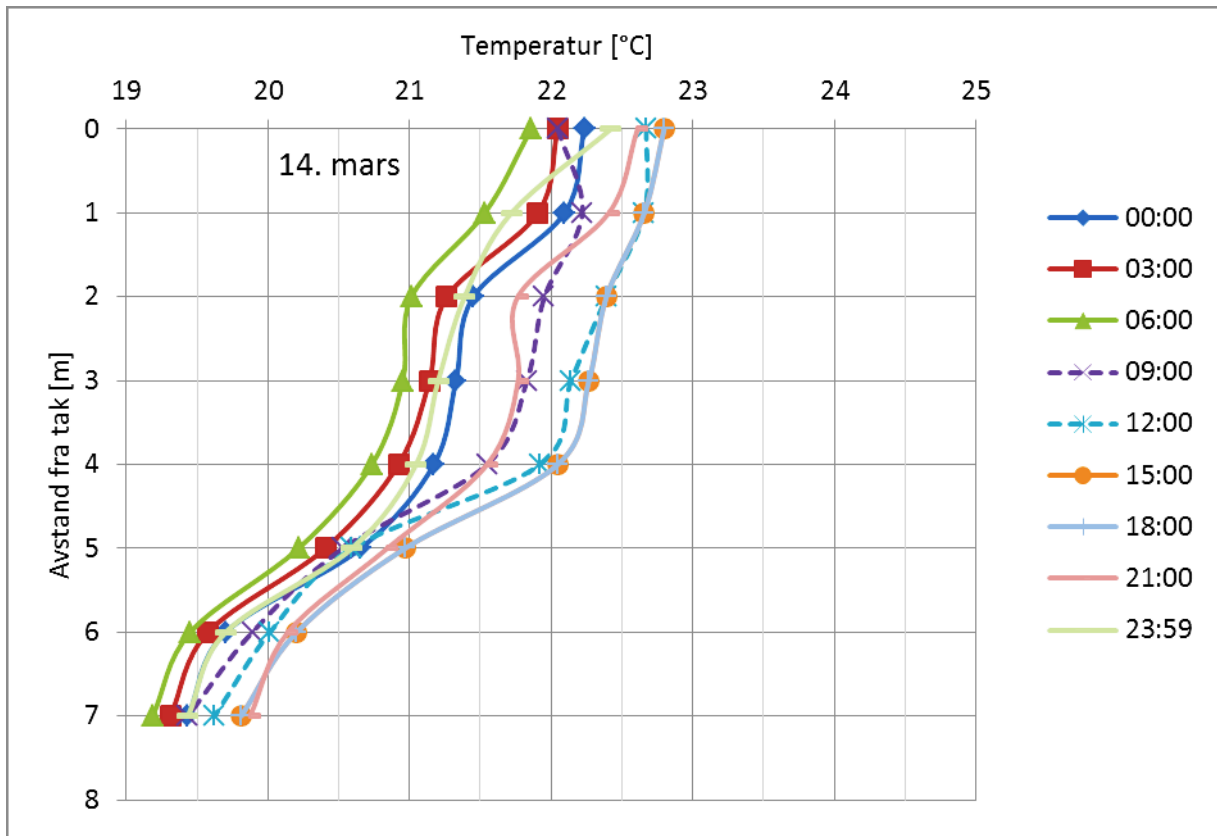
A. 20: Bolig 1 – Temperaturfordeling i trapp 10. mars



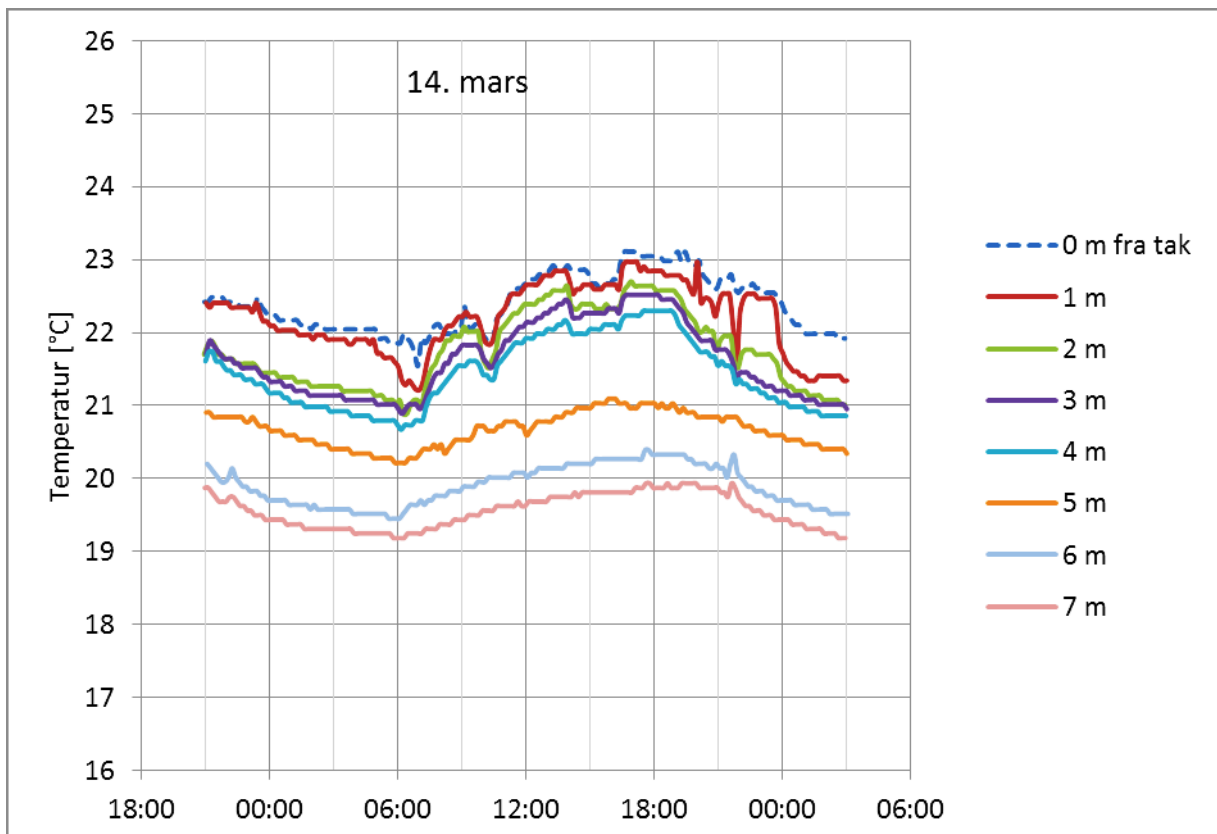
A. 21: Bolig 1 – Temperaturfordeling i trapp 10. mars



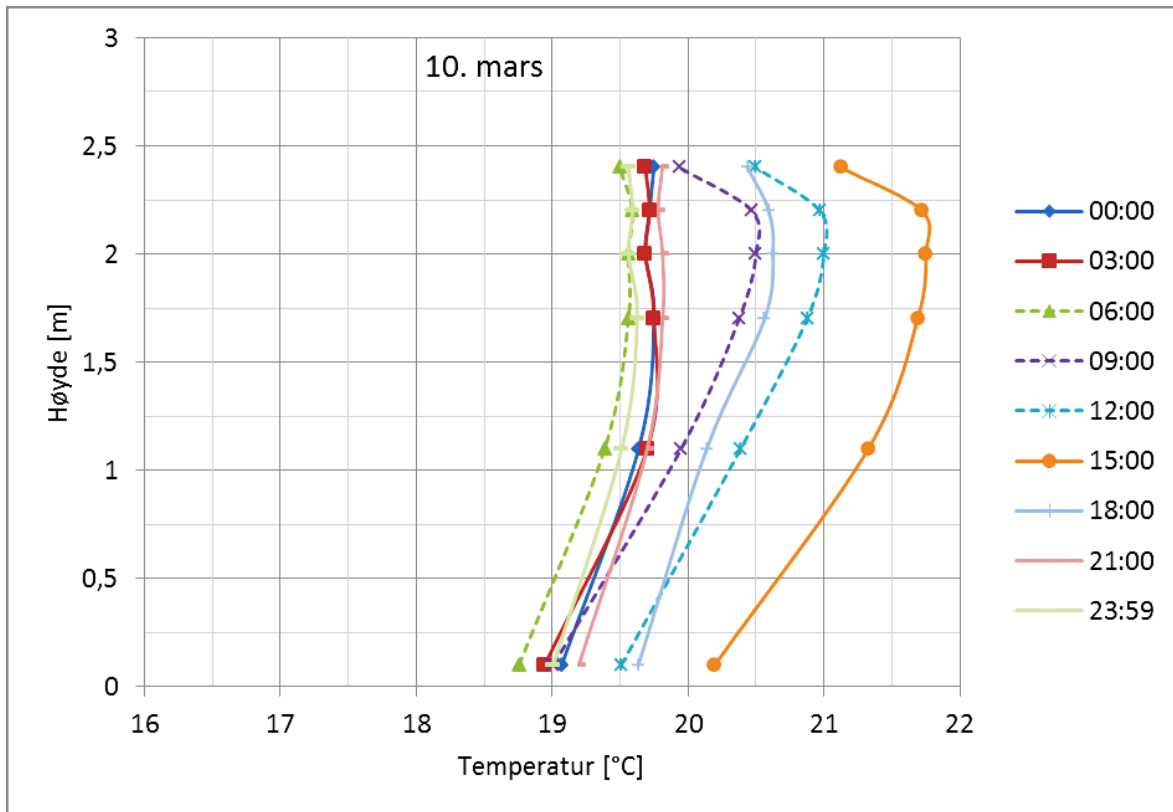
A. 22: Bolig 1 - Temperaturfordeling i trapp 14. mars



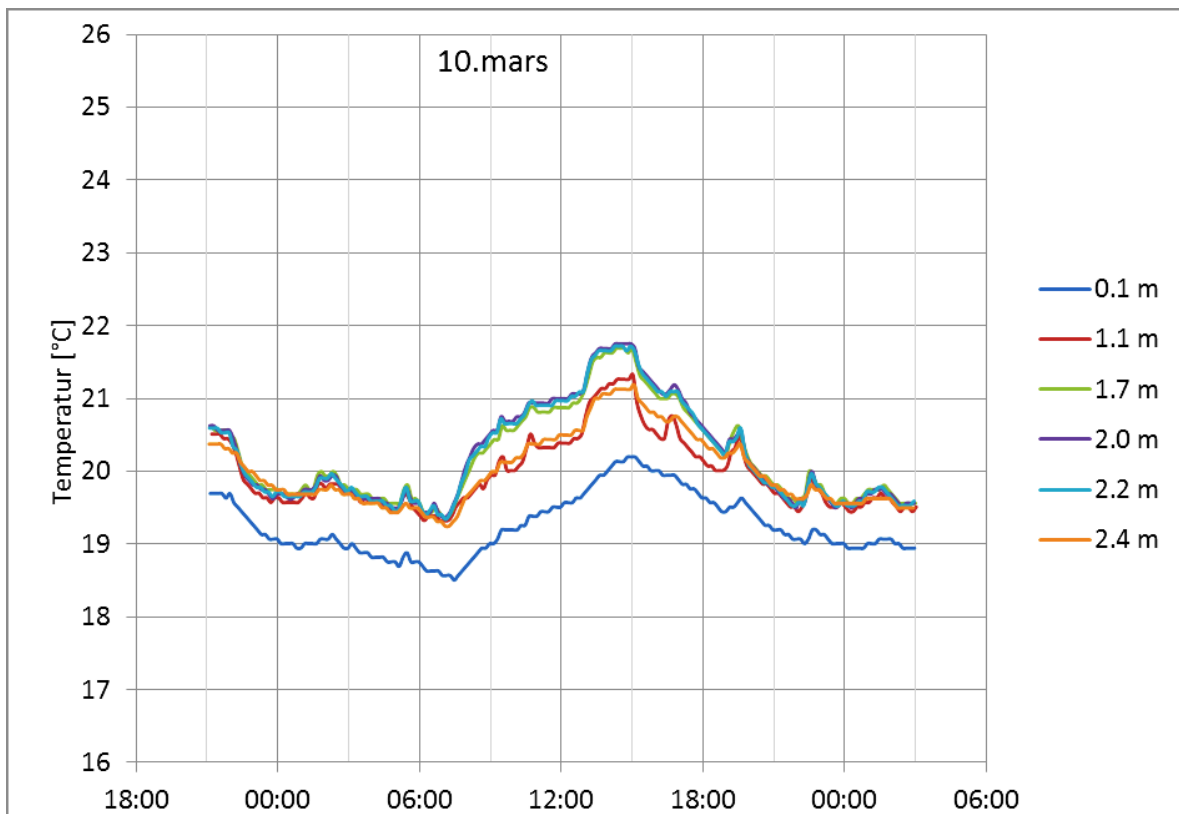
A. 23: Bolig 1 - Temperaturfordeling i trapp 14. mars



A. 24: Bolig 1 - Temperaturfordeling i soverom 10. mars<sup>6</sup>

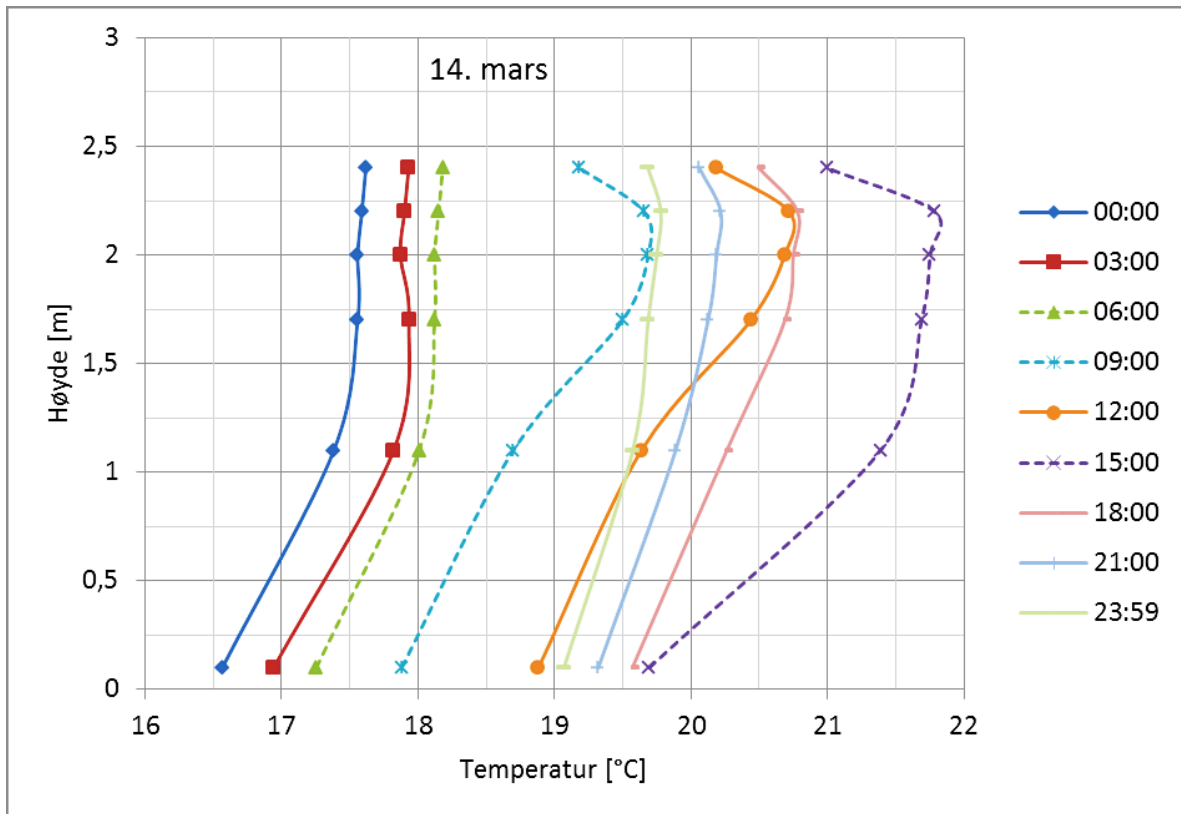


A. 25: Bolig 1 - Temperaturfordeling i soverom 10. mars

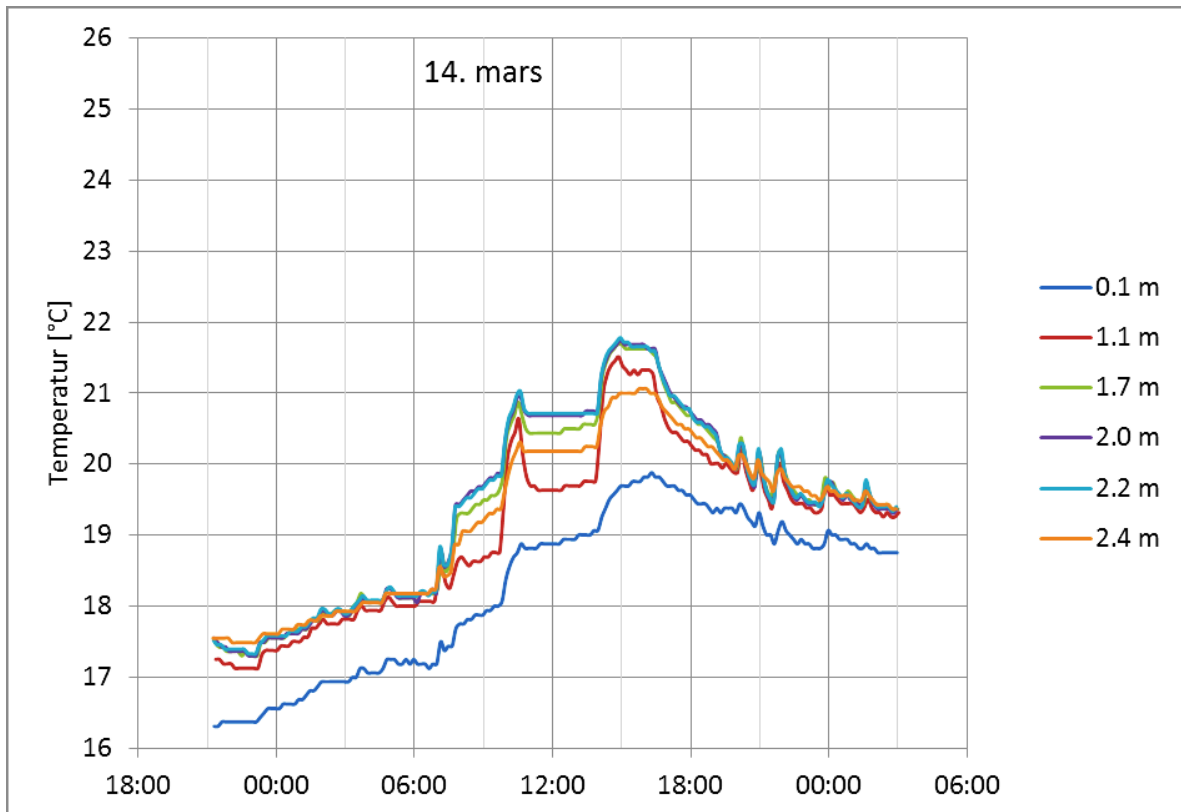


<sup>6</sup> Forskjøvet x-akse

A. 26: Bolig 1 - Temperaturfordeling i soverom 14. mars<sup>7</sup>

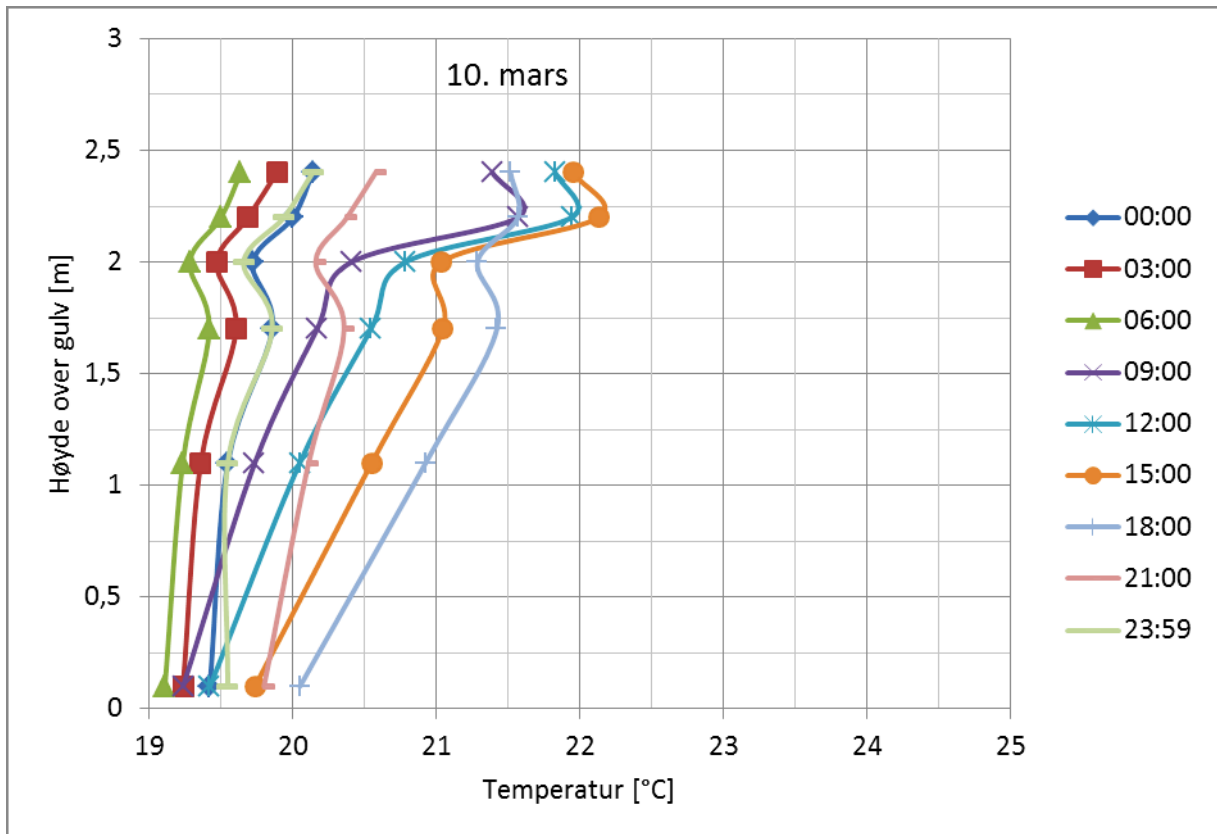


A. 27: Bolig 1 - Temperaturfordeling i soverom 14. mars

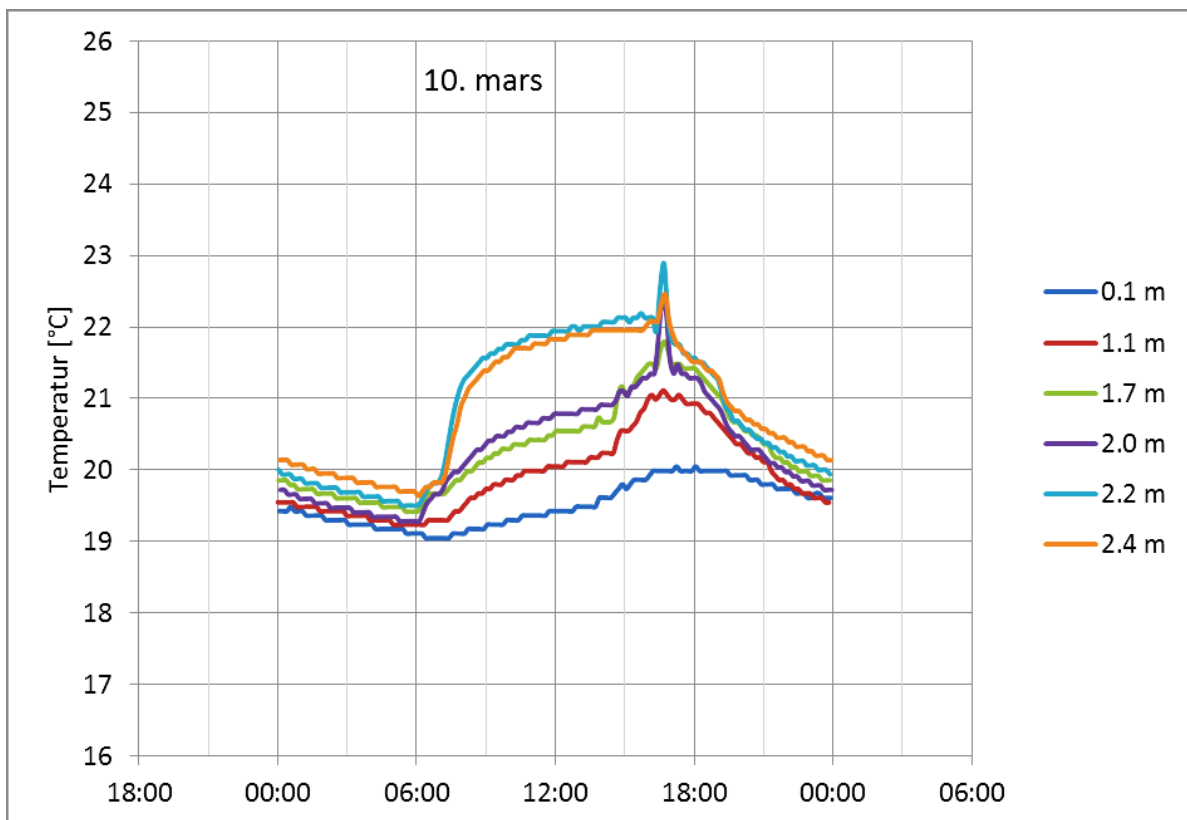


<sup>7</sup> Forskjøvet x-akse

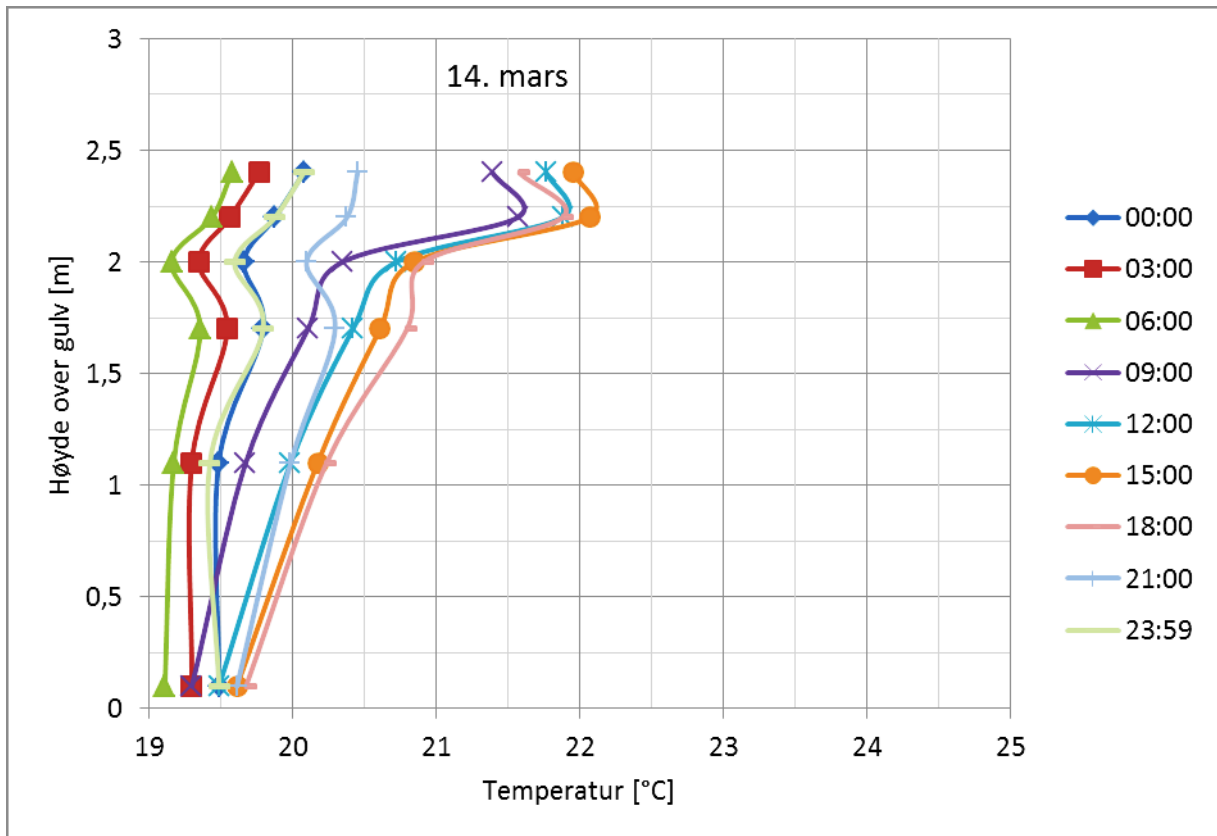
A. 28: Bolig 1 - Temperaturfordeling i kjellerstue 10. mars



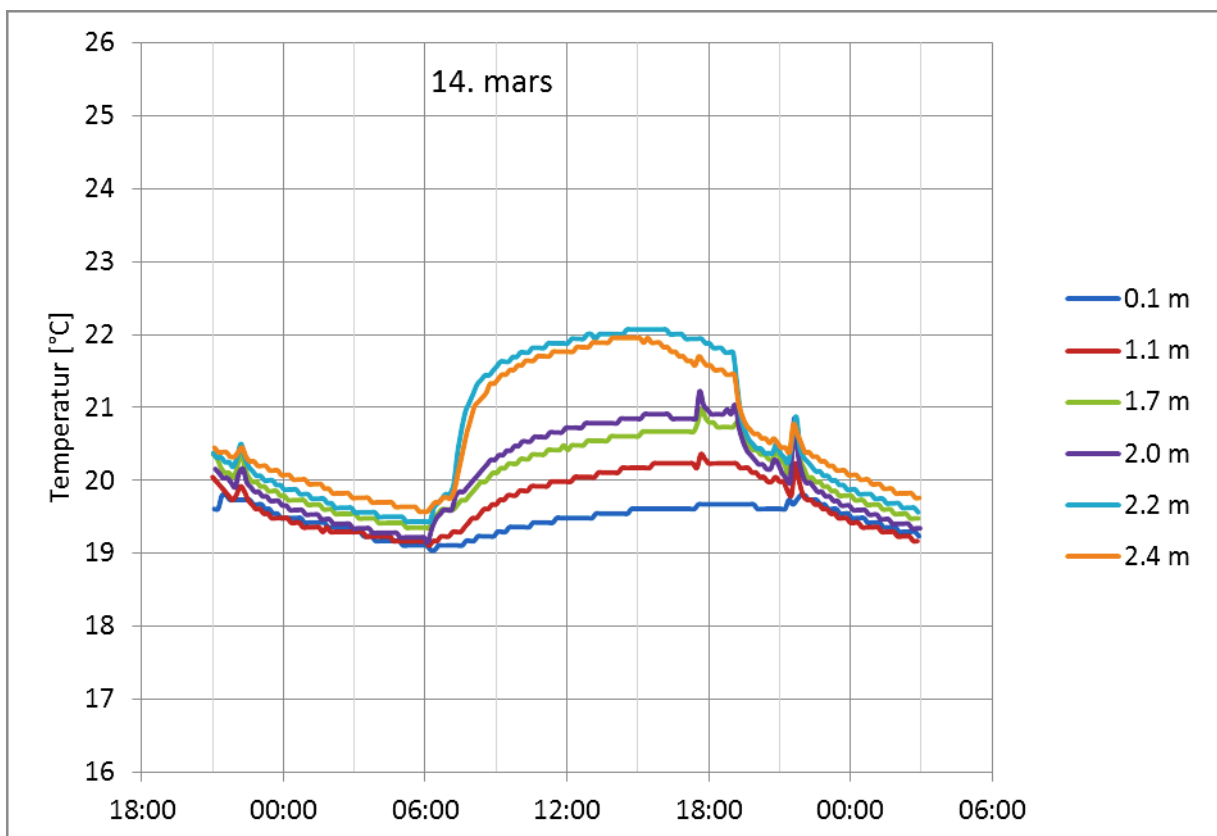
A. 29: Bolig 1 - Temperaturfordeling i kjellerstue 10. mars



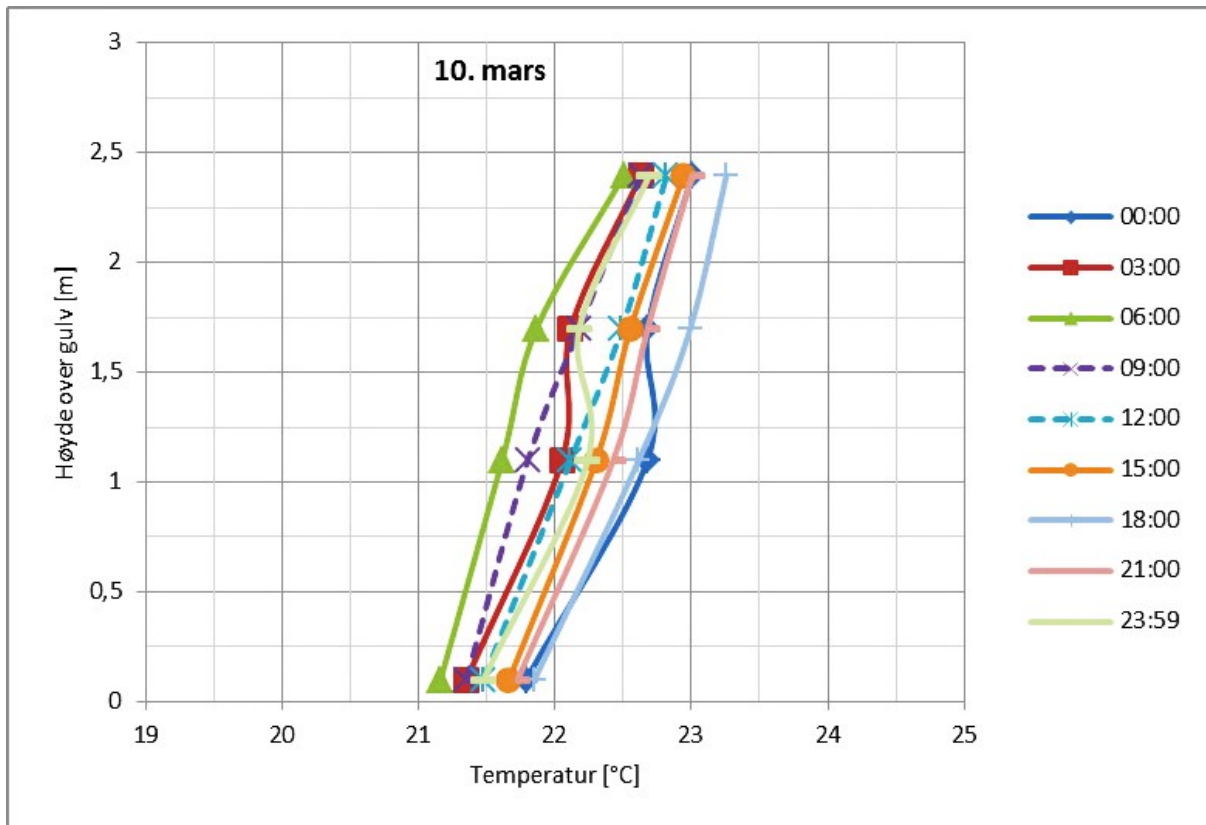
A. 30: Bolig 1 - Temperaturfordeling i kjellerstue 14. mars



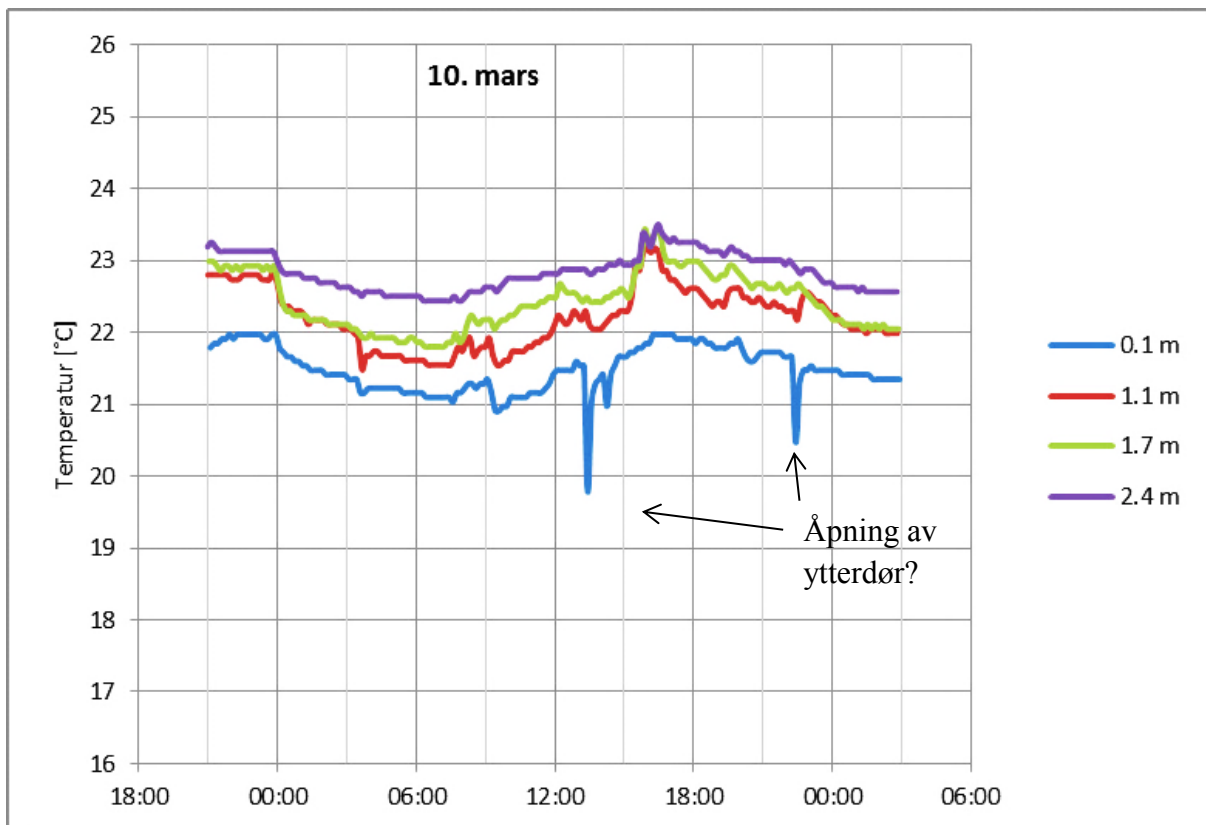
A. 31: Bolig 1 - Temperaturfordeling i kjellerstue 14. mars



A. 32: Bolig 2 - Temperaturfordeling i stue 10. mars - høyde(temperatur)

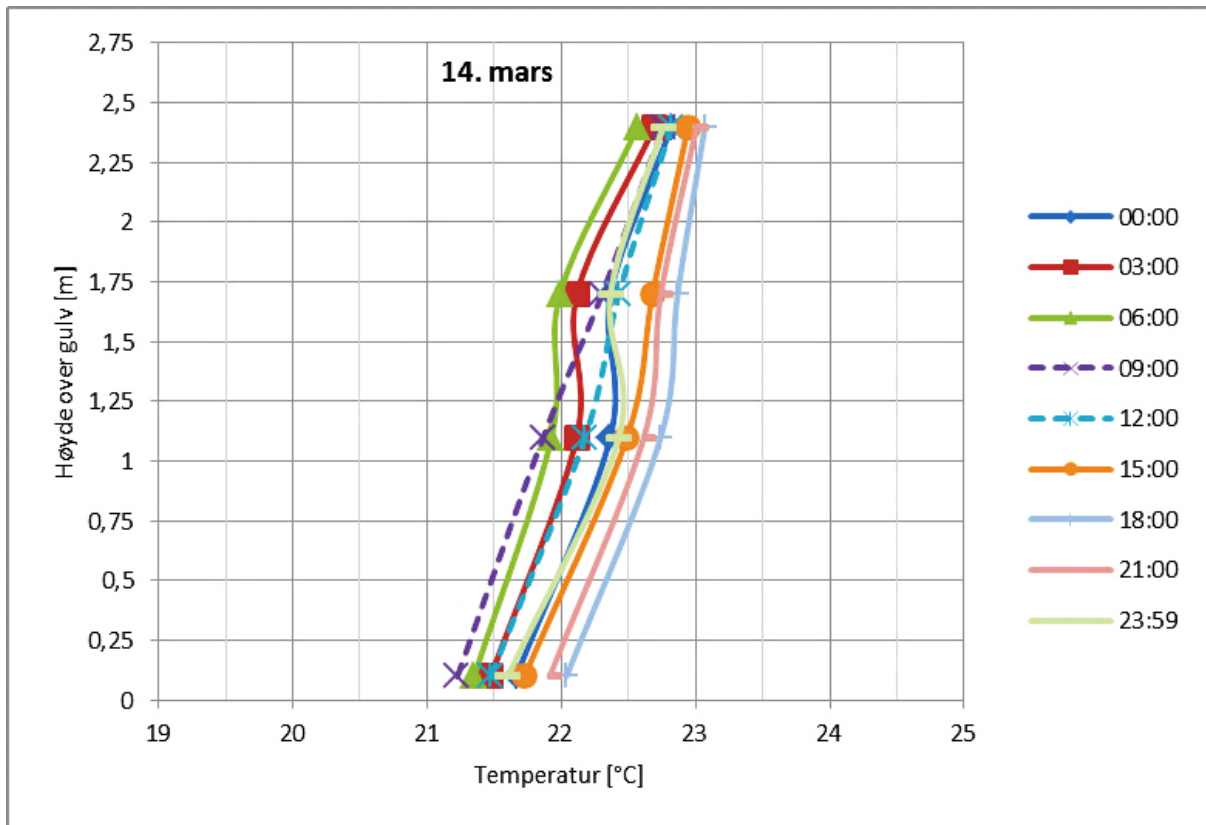


A. 33: Bolig 2 - Temperaturfordeling i stue 10. mars - temperatur(tid)

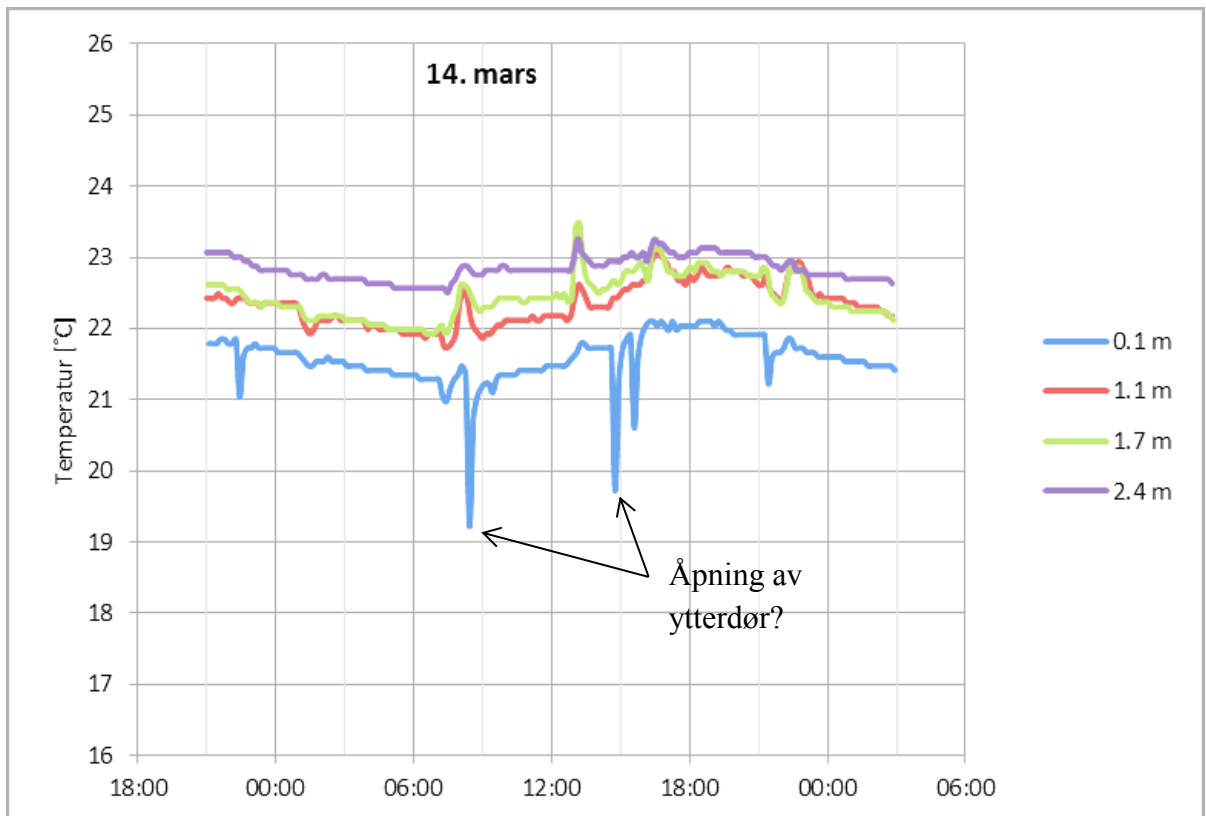




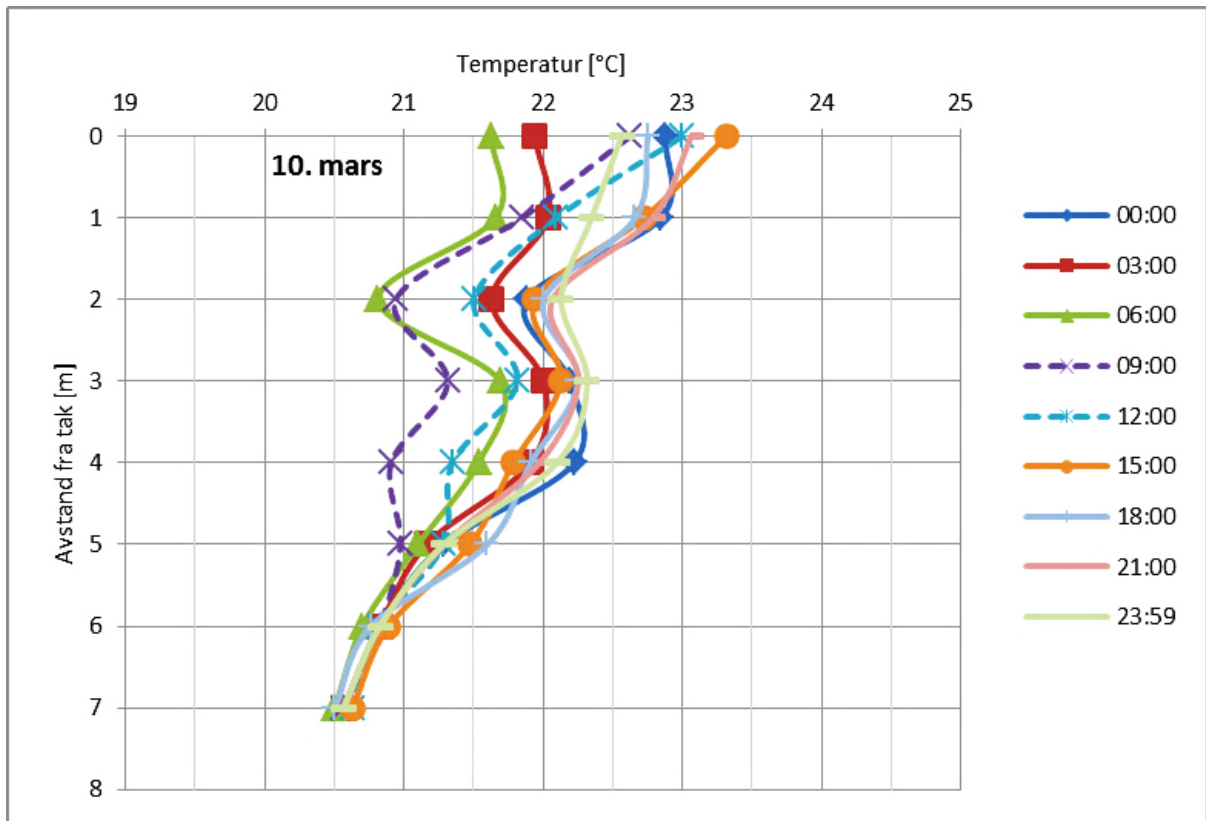
A. 34: Bolig 2 - Temperaturfordeling i stue 14. mars - høyde(temperatur)



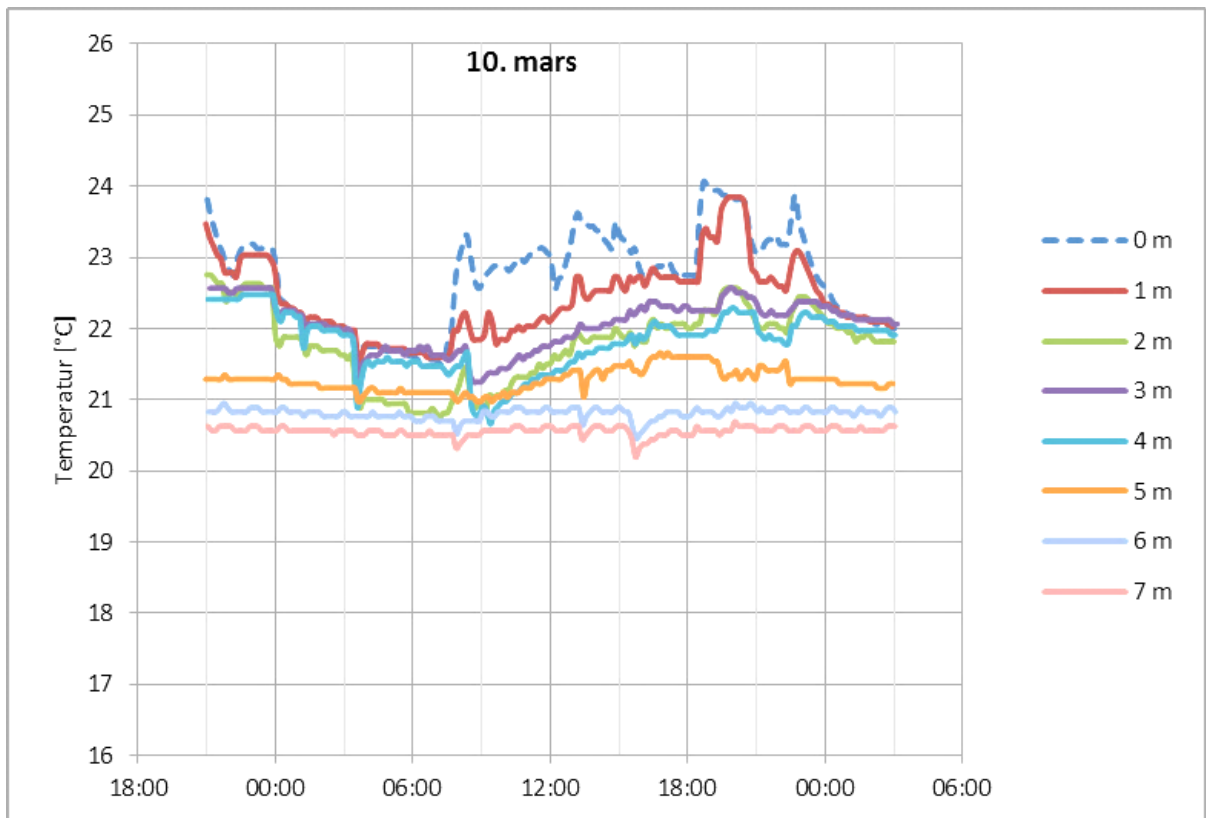
A. 35: Bolig 2 - Temperaturfordeling i stue 14. mars - temperatur(tid)



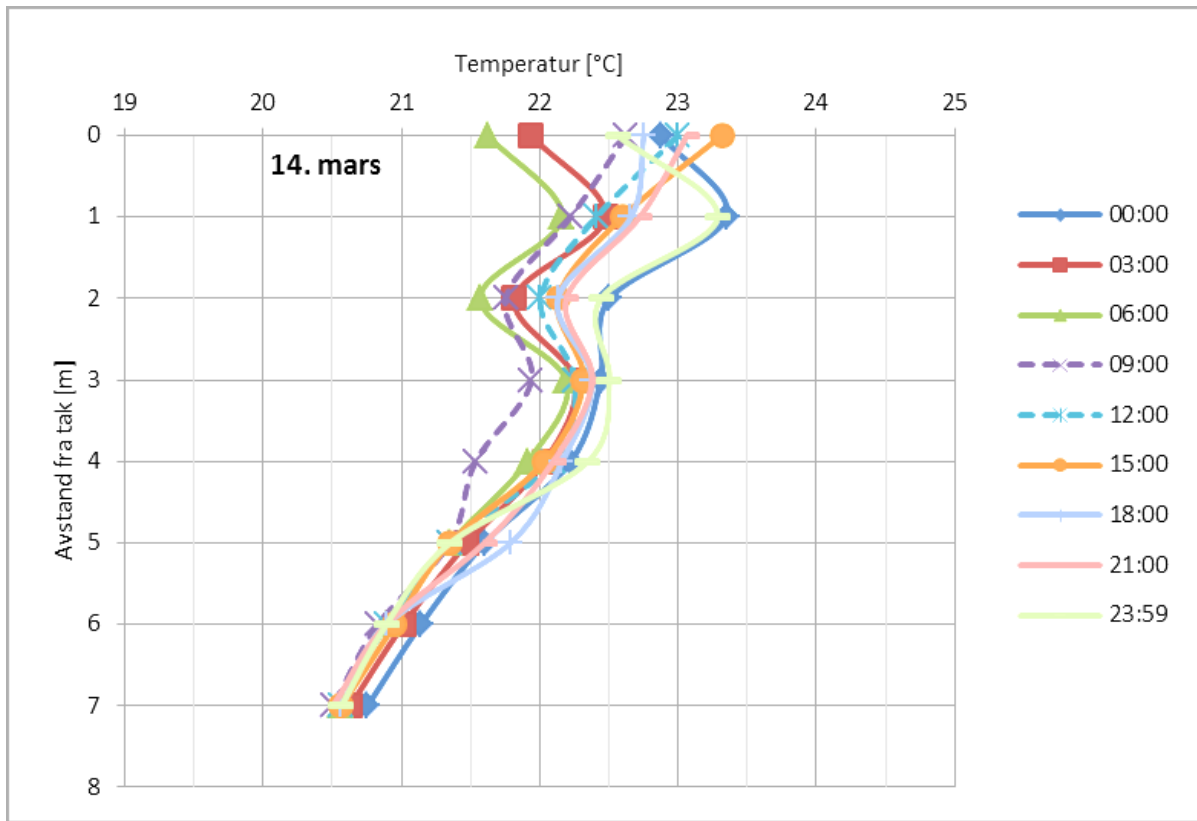
A. 36: Bolig 2 - Temperaturfordeling i trapp 10. mars



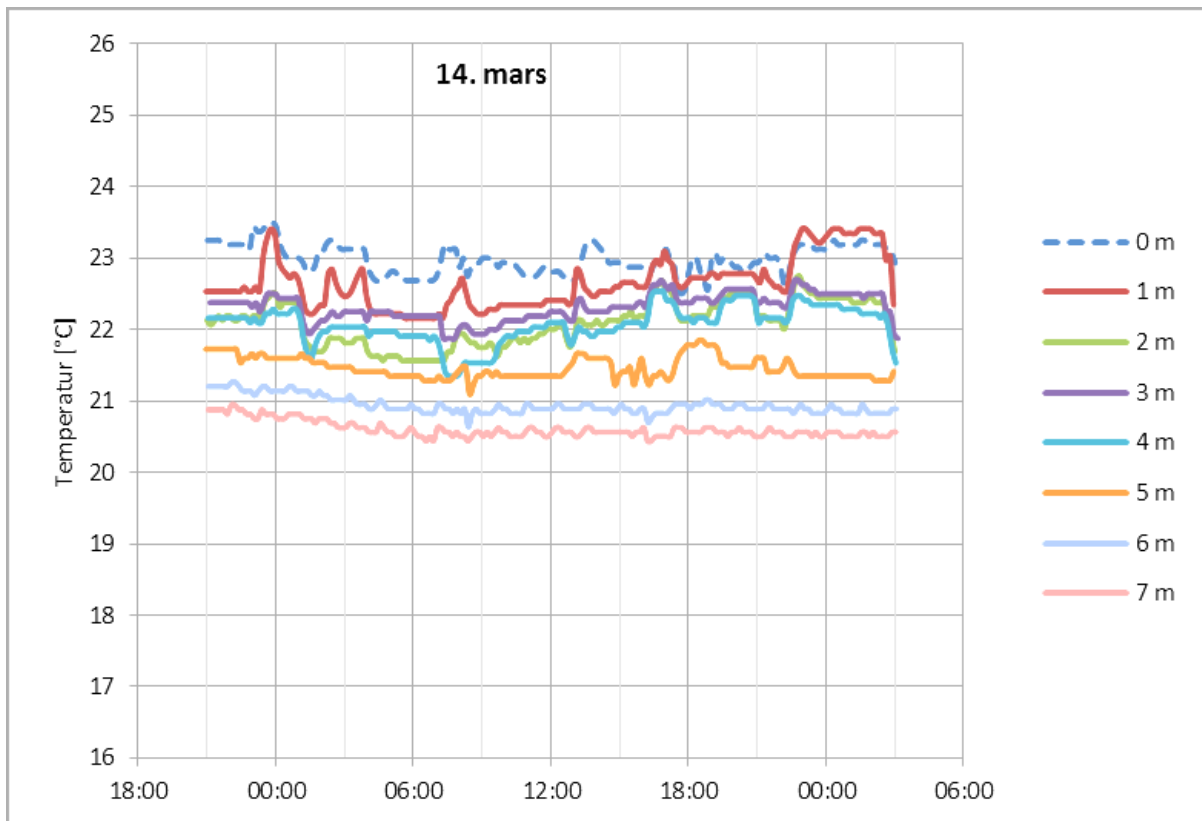
A. 37: Bolig 2 - Temperaturfordeling i trapp 10. mars



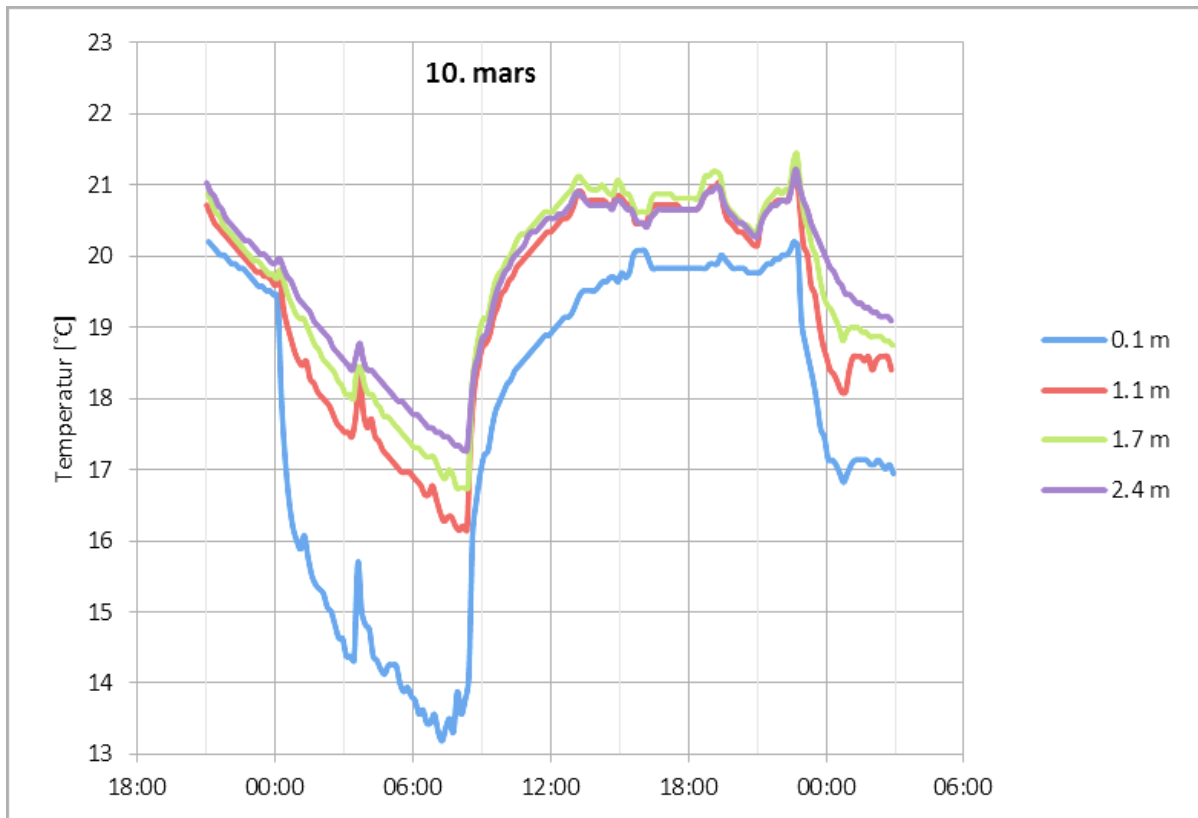
A. 38: Bolig 2 - Temperaturfordeling i trapp 14. mars



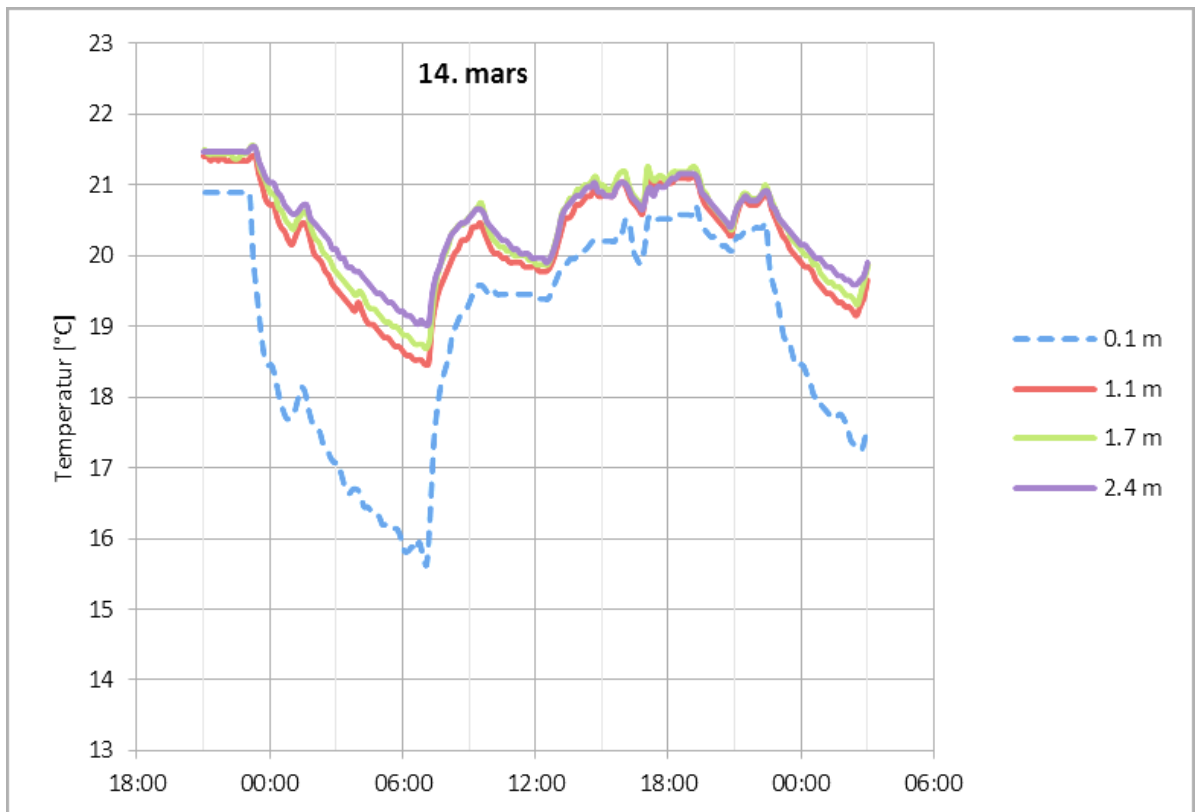
A. 39: Bolig 2 - Temperaturfordeling i trapp 14. mars



A. 40: Bolig 2 - Temperaturfordeling soverom 10. mars<sup>8</sup>

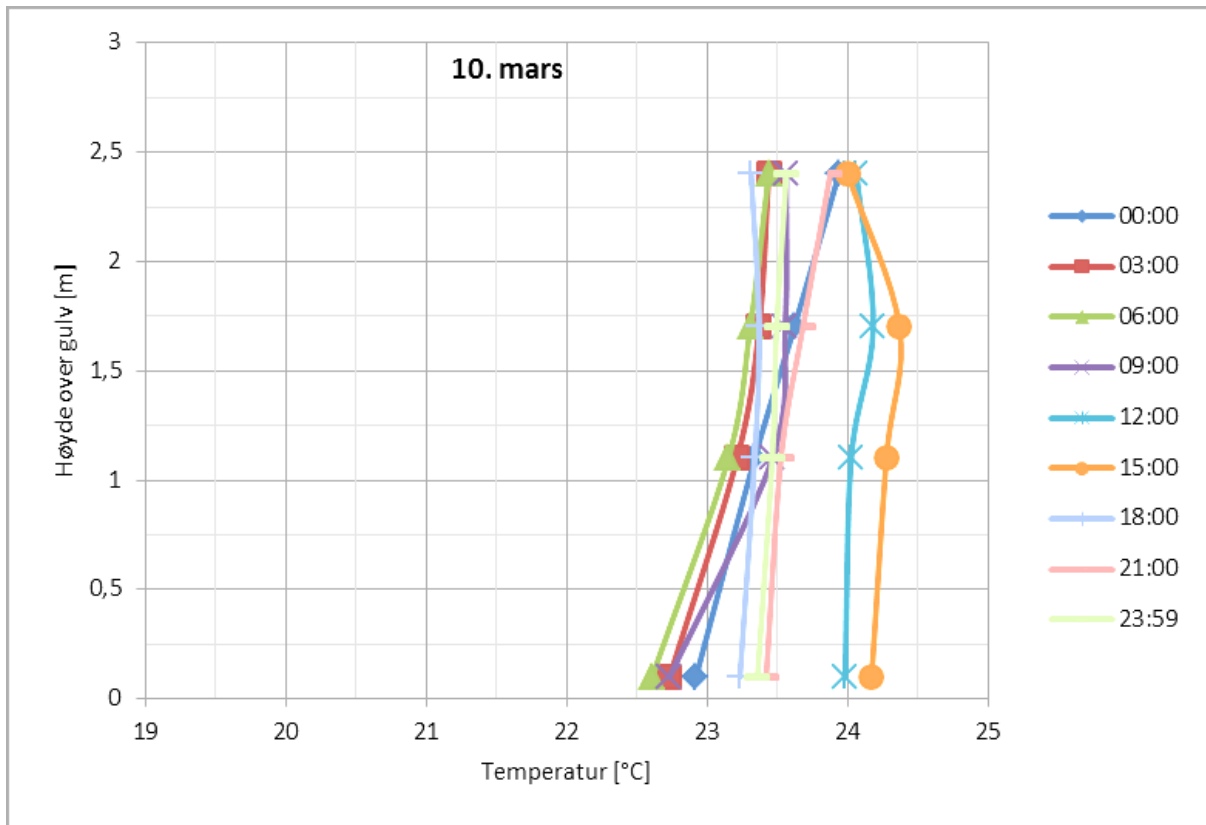


A. 41: Bolig 2 - Temperaturfordeling soverom 14. mars<sup>8</sup>

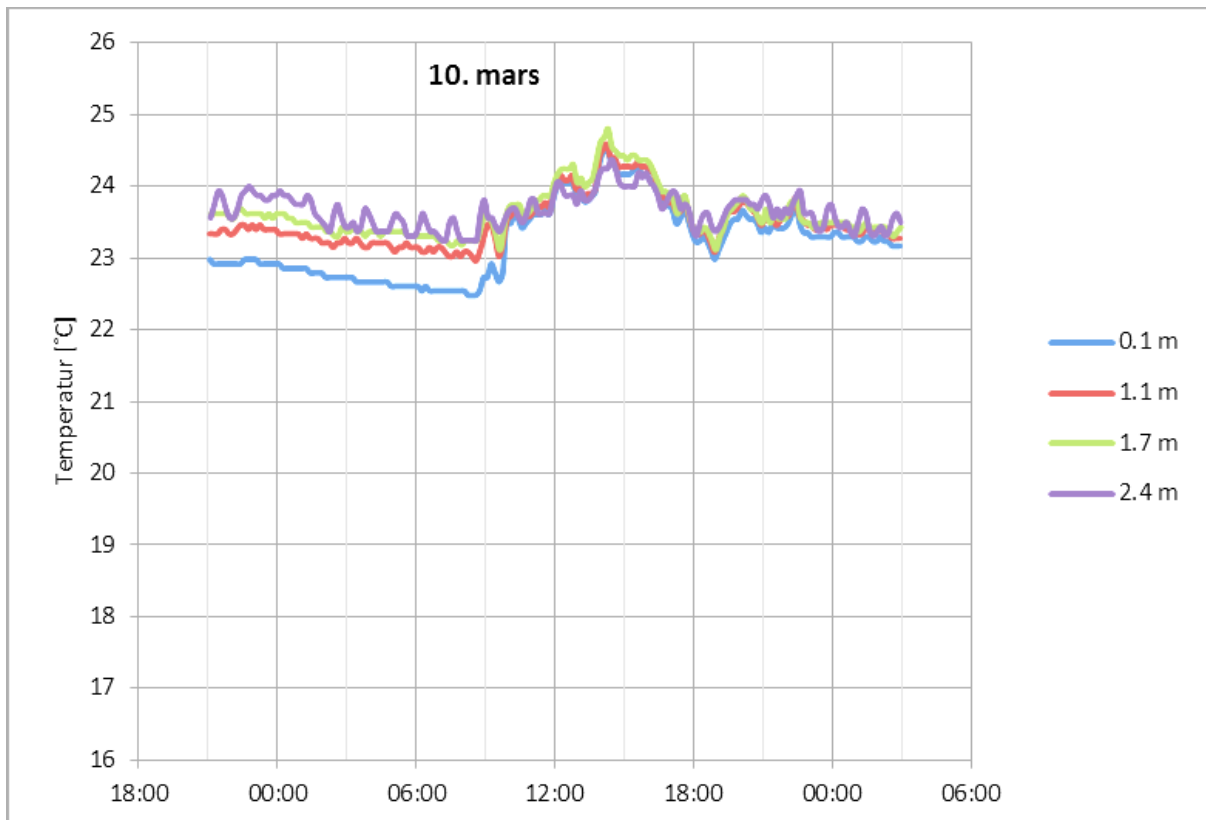


<sup>8</sup> NB – forskjøvet y-akse

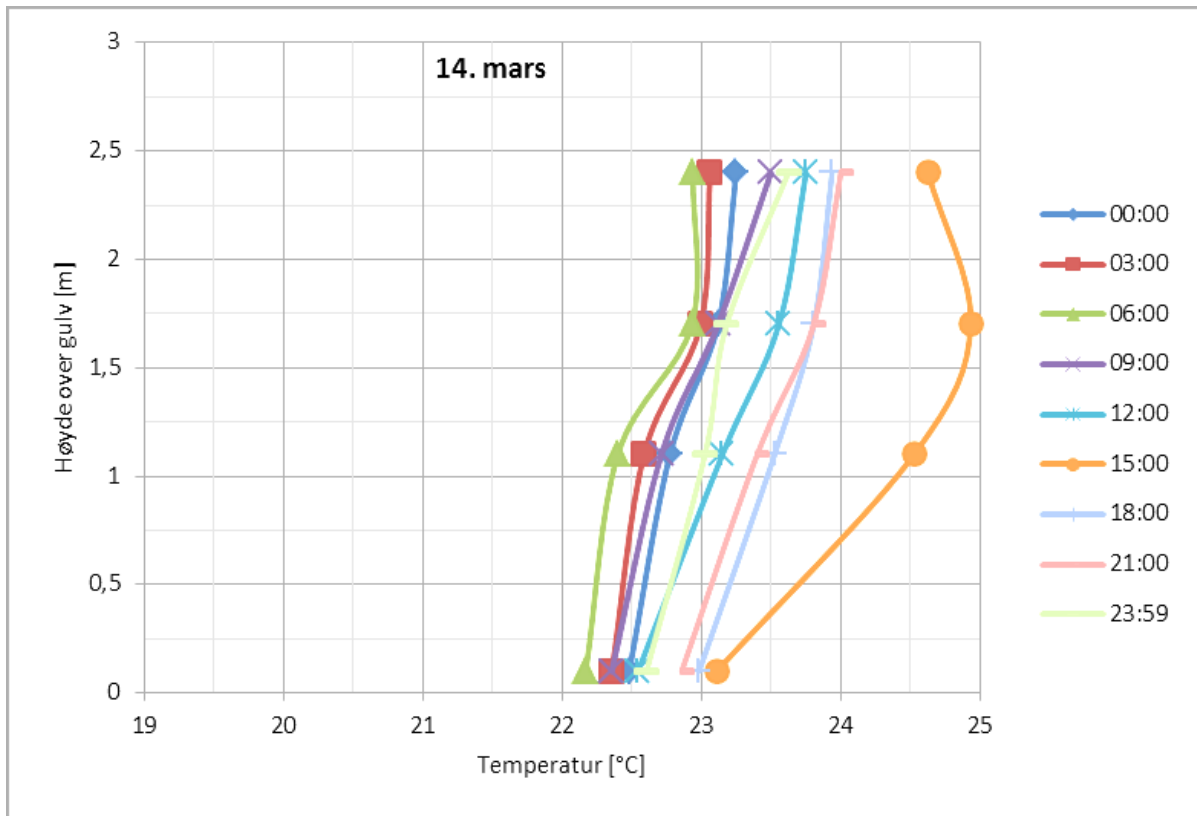
A. 42: Bolig 3 - Temperaturfordeling i stue 10. mars - høyde(temperatur)



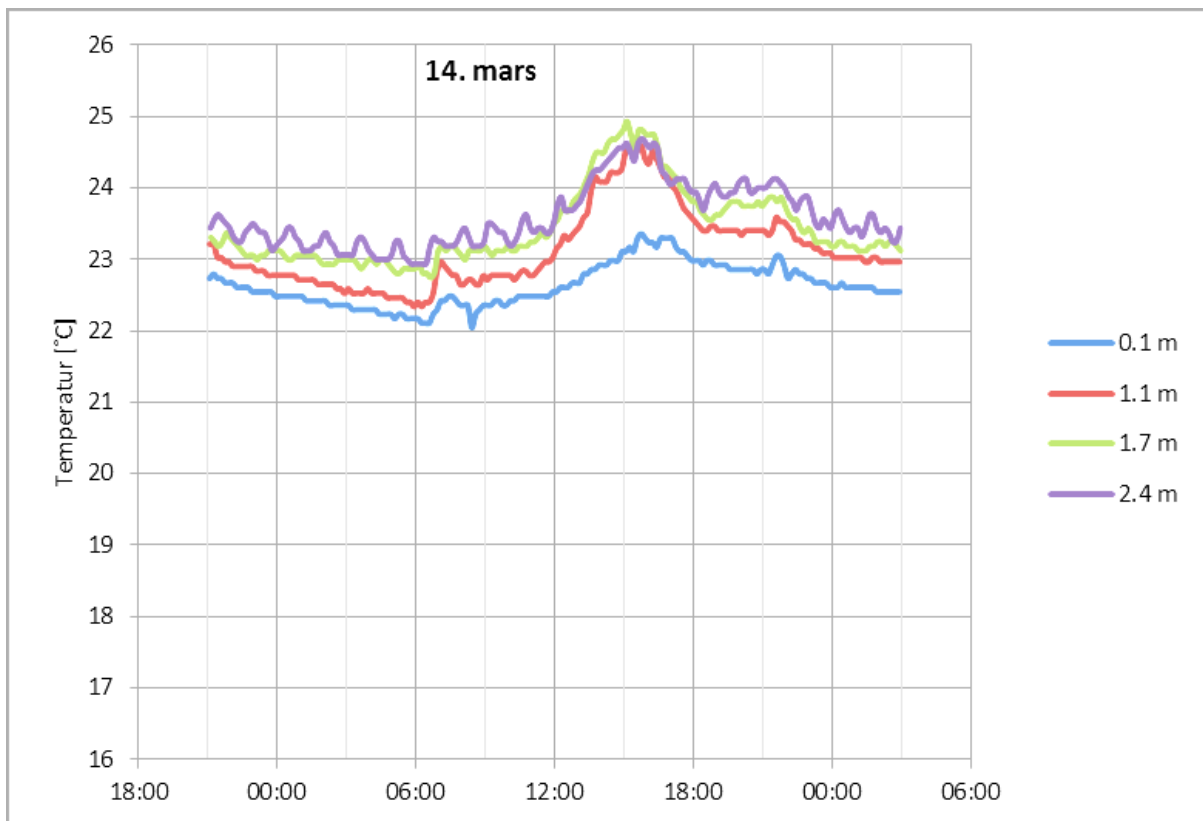
A. 43: Bolig 3 - Temperaturfordeling i stue 10. mars - temperatur(tid)



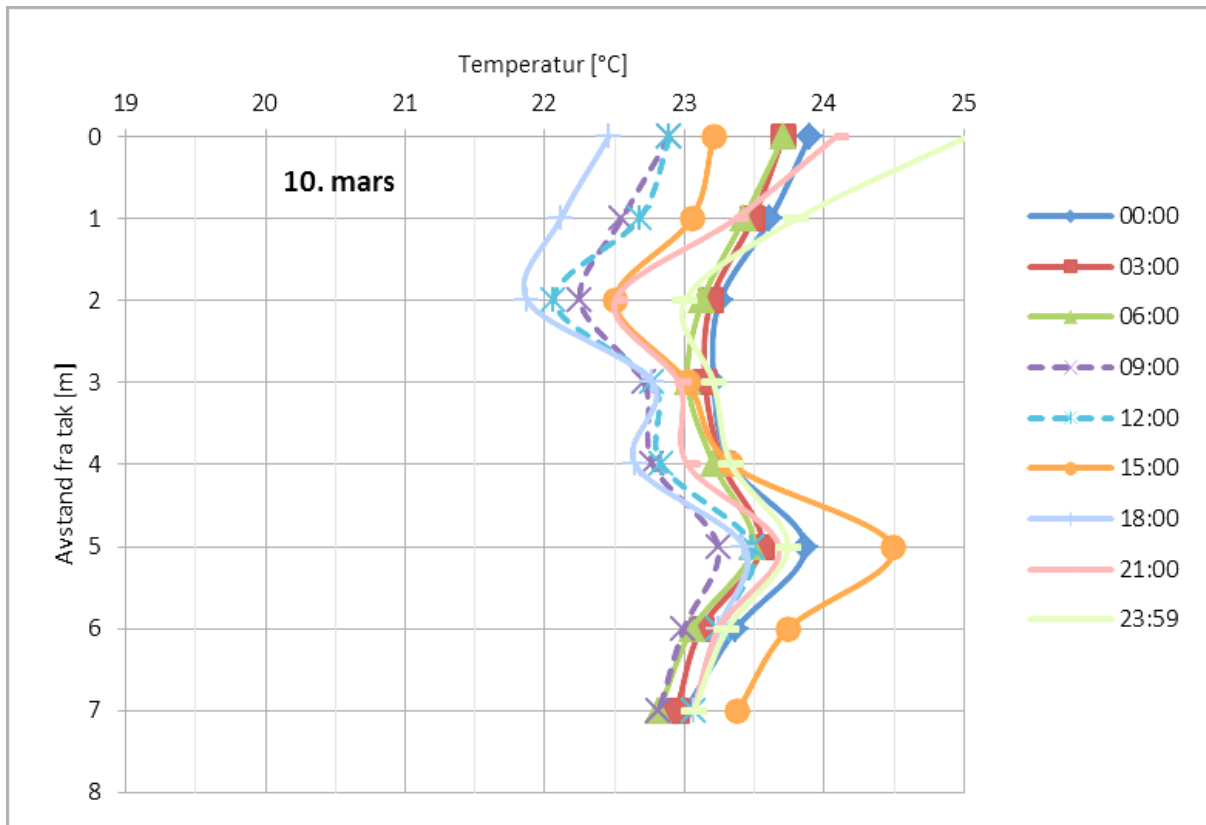
A. 44: Bolig 3 - Temperaturfordeling i stue 14. mars - høyde(temperatur)



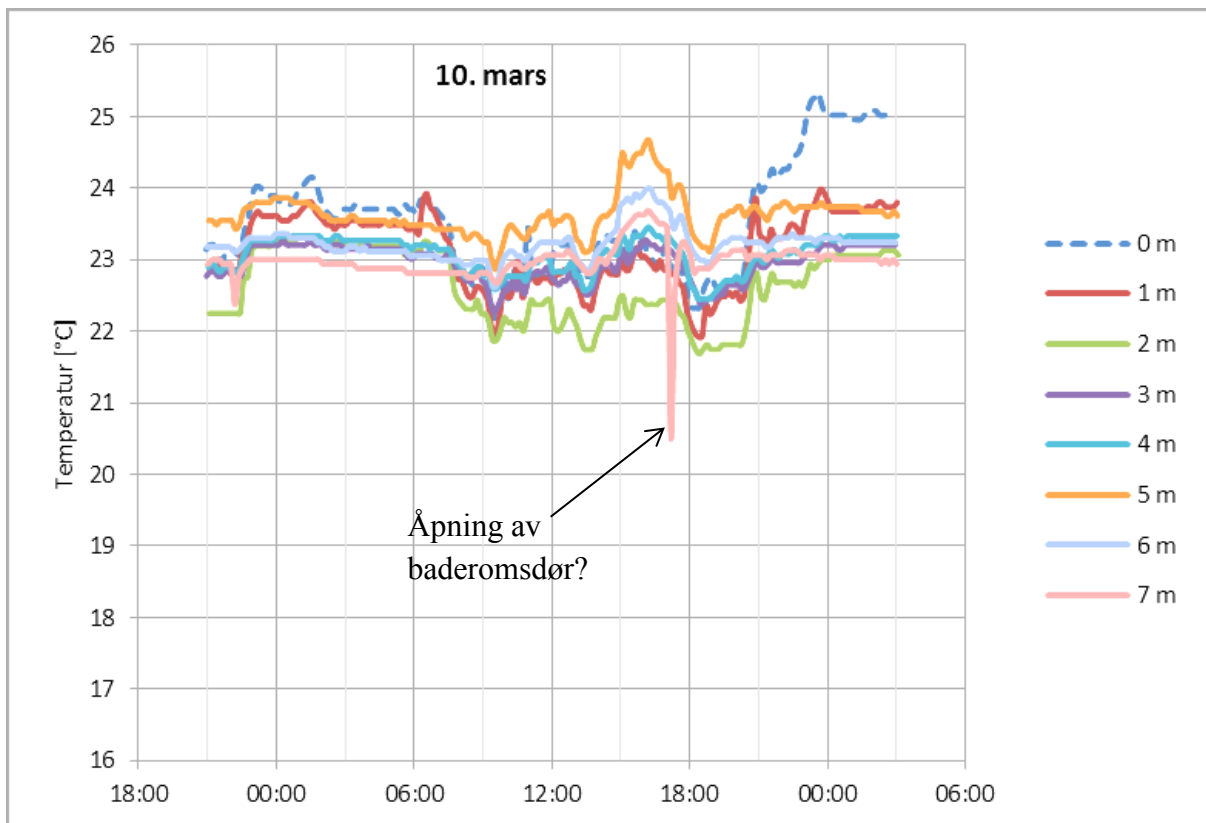
A. 45: Bolig 3 - Temperaturfordeling i stue 14. mars - temperatur(tid)



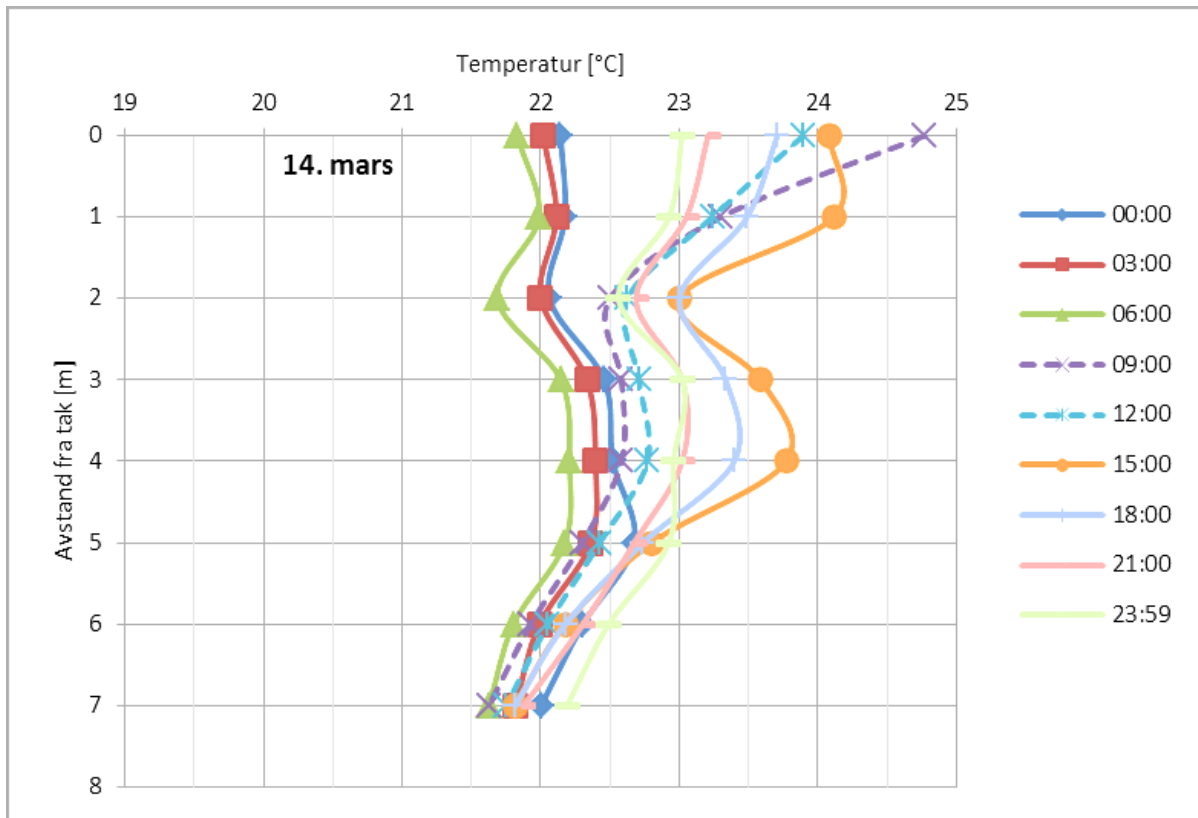
A. 46: Bolig 3 - Temperaturfordeling i trapp 10. mars



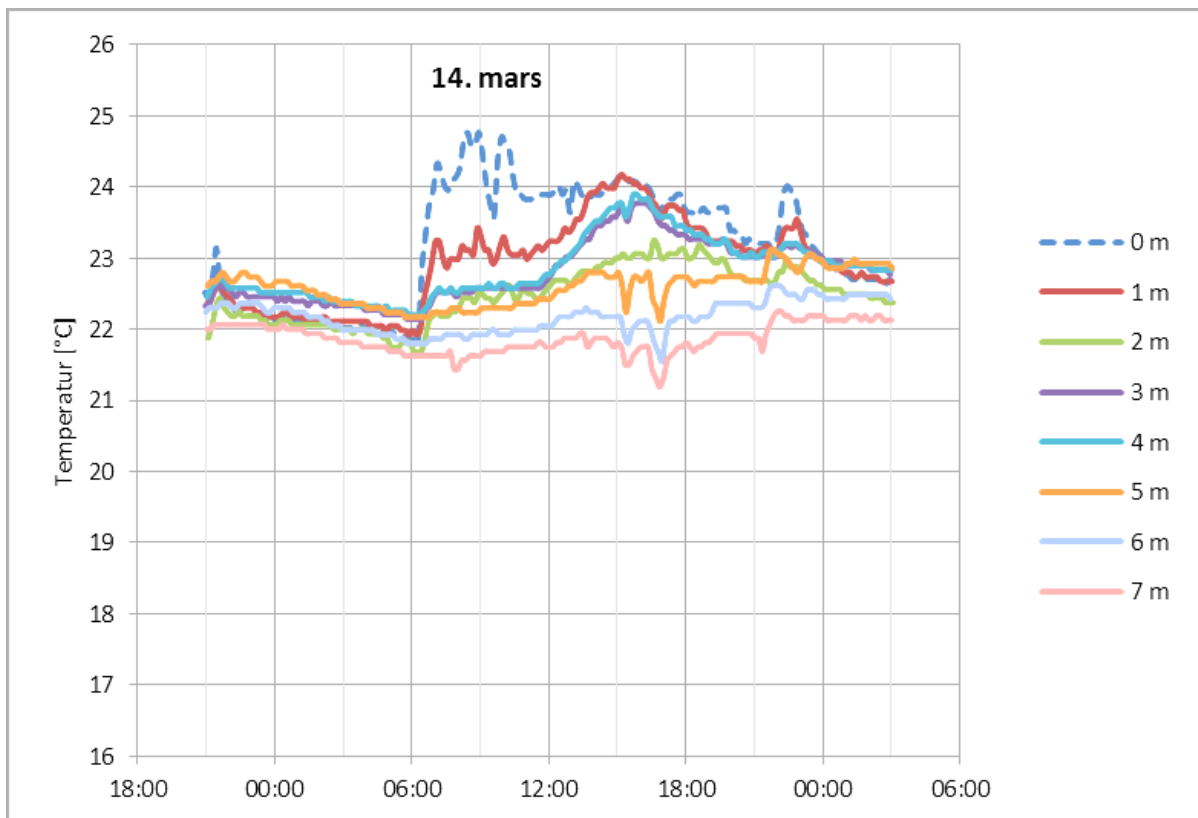
A. 47: Bolig 3 - Temperaturfordeling i trapp 10. mars



A. 48: Bolig 3 - Temperaturfordeling i trapp 14. mars

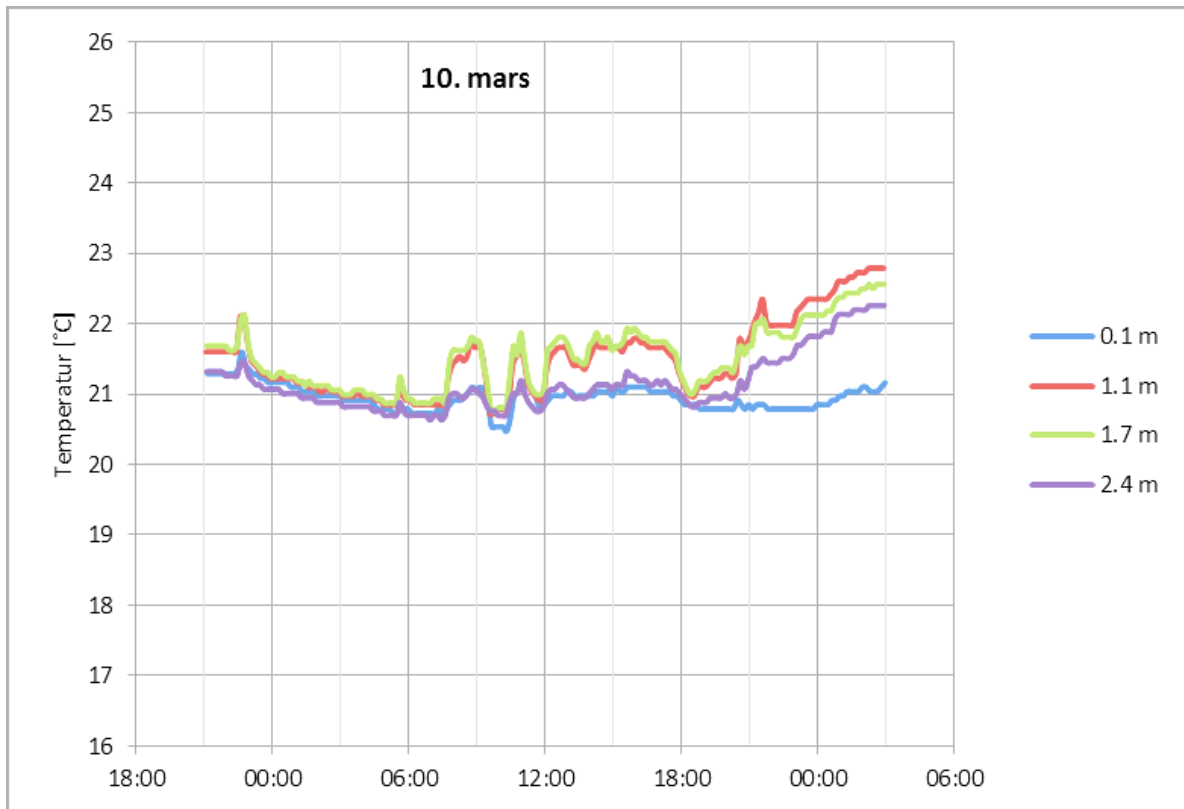


A. 49: Bolig 3 - Temperaturfordeling i trapp 14. mars

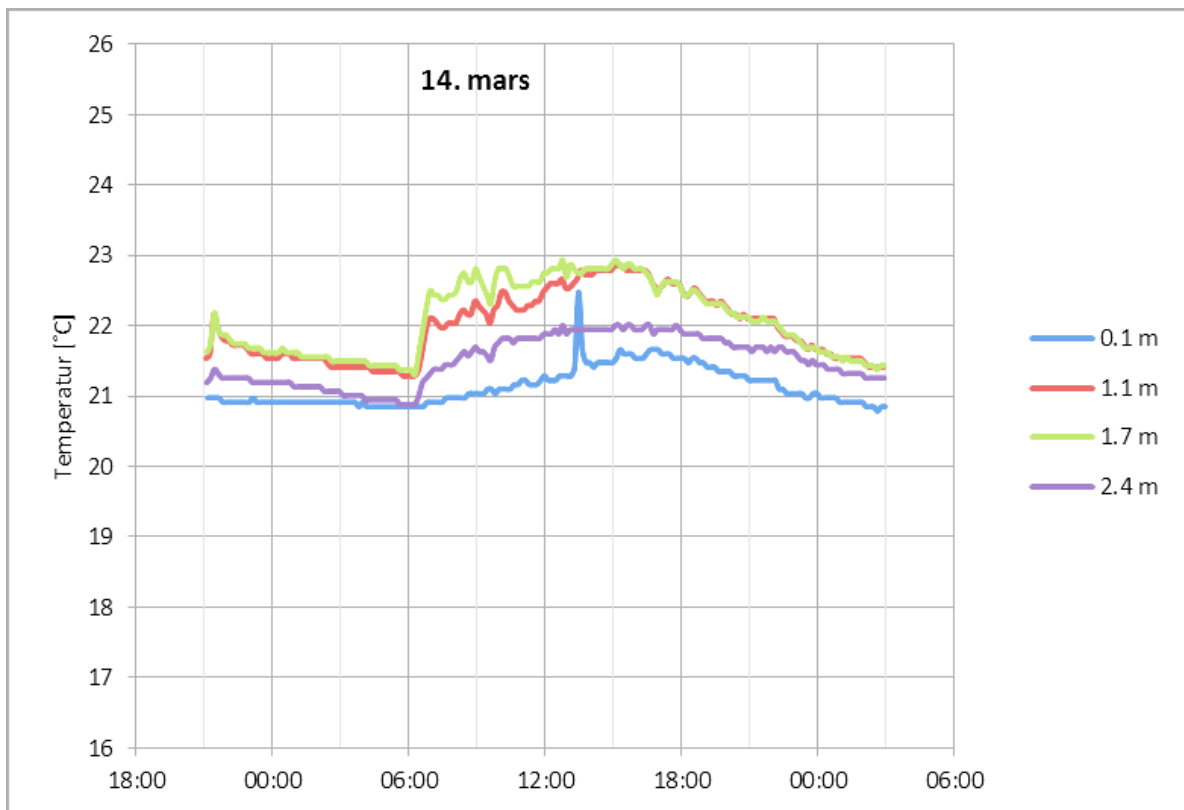




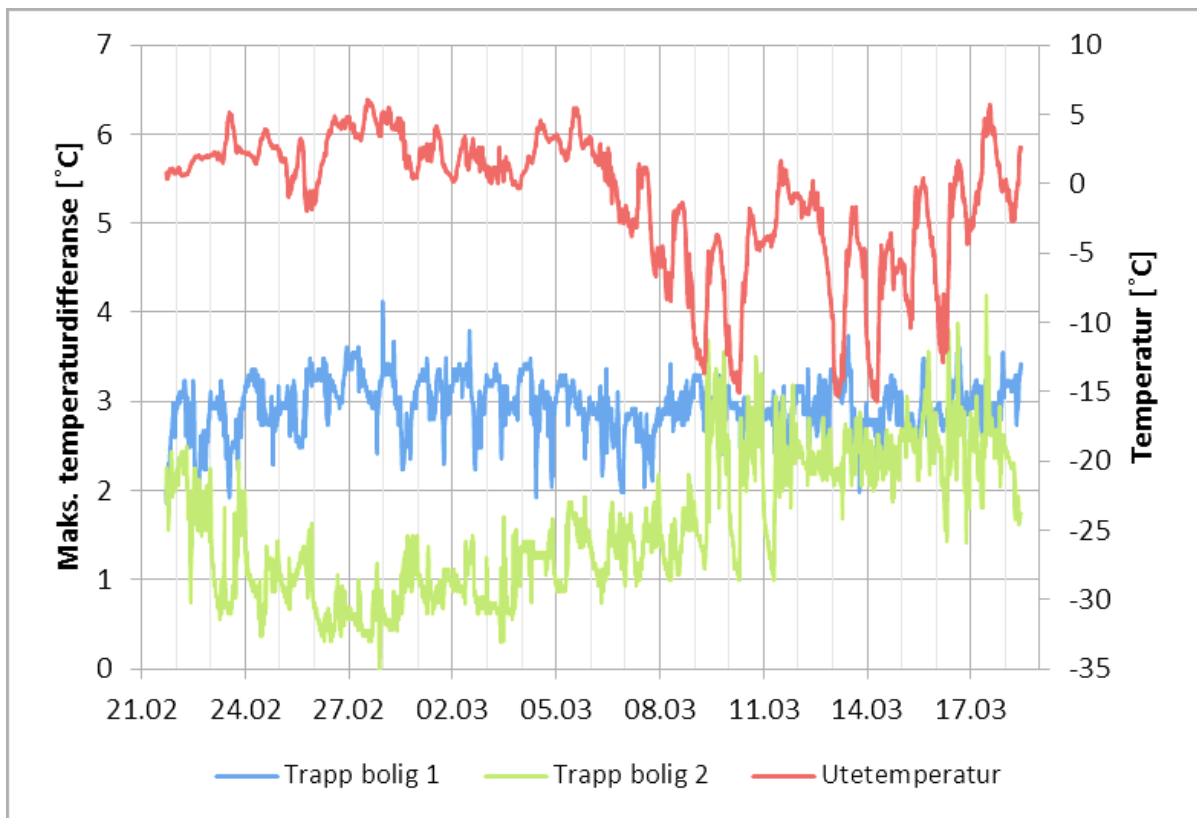
A. 50: Bolig 3 - Temperaturfordeling i soverom 10. mars



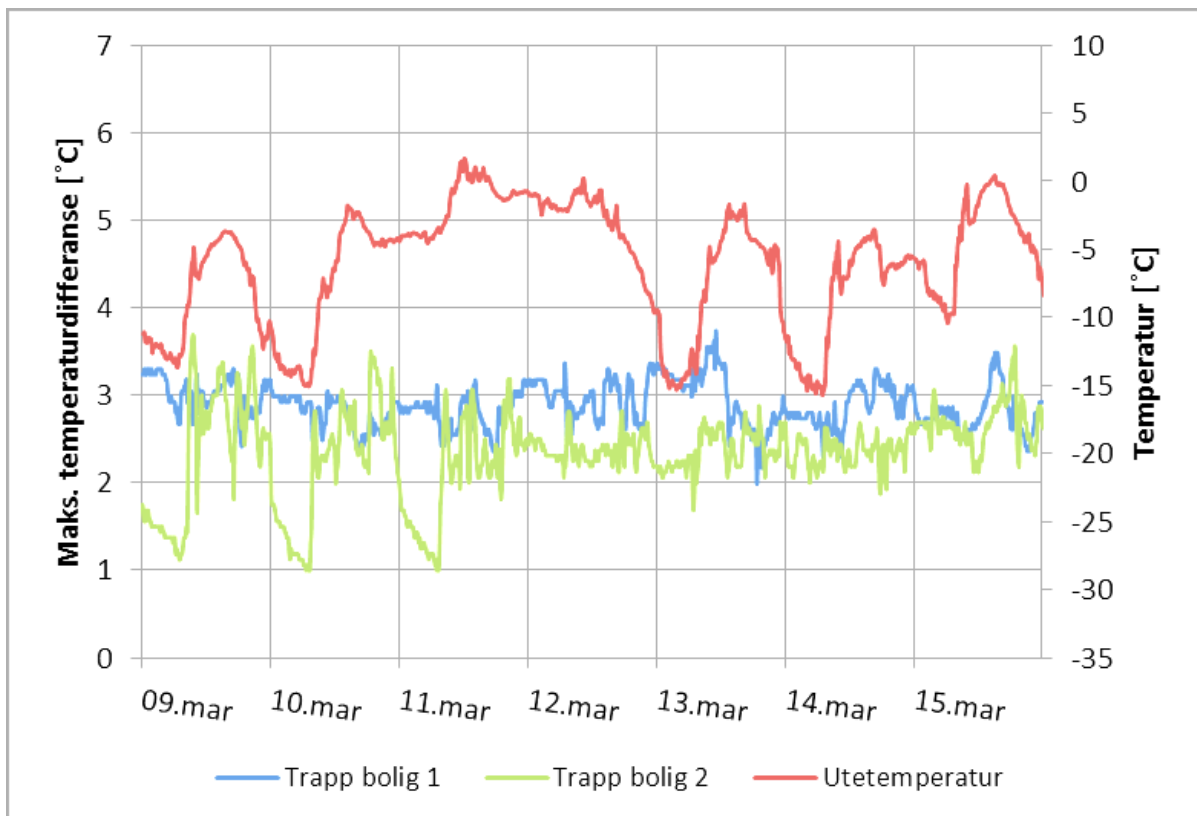
A. 51: Bolig 3 - Temperaturfordeling i soverom 14. mars



A. 52: Bolig 1 og 2 - Temperaturdifferanse i trapp - hele måleperiode



A. 53: Bolig 1 og 2 - Temperaturdifferanse i trapp - kald periode

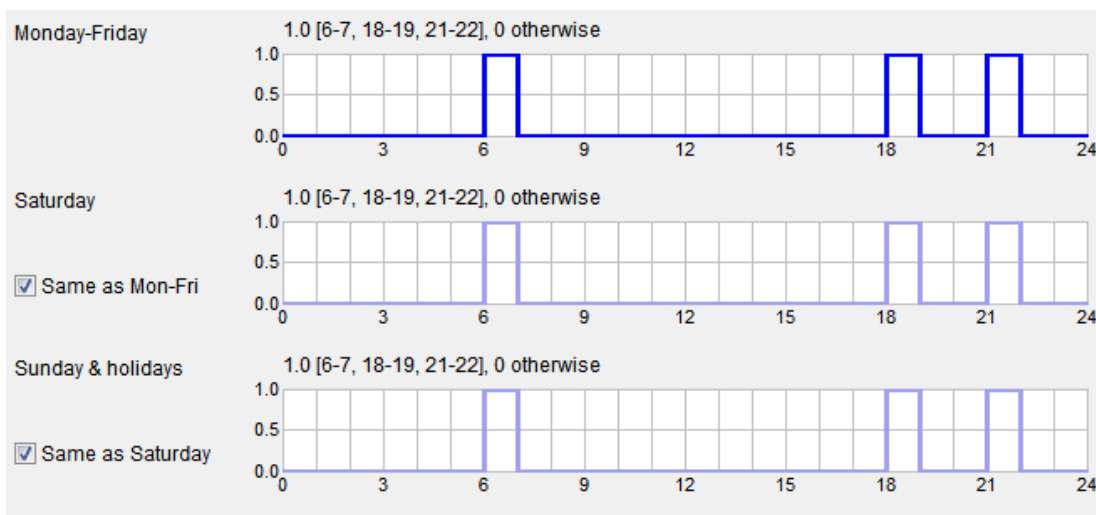


## Vedlegg B

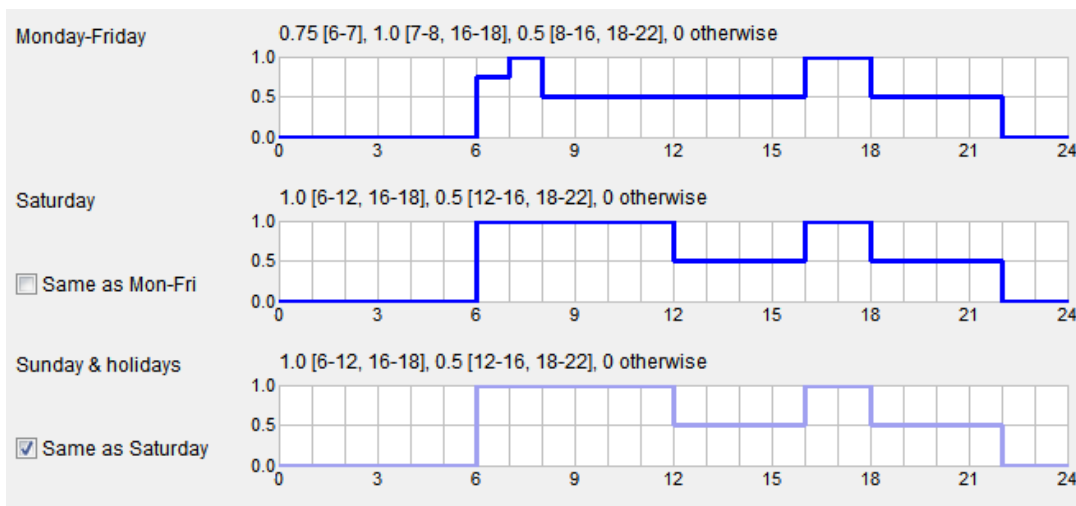
### B. 1: Driftstid belysning og utstyr



### B. 2: Tilstedeværelse bad (Antall personer totalt = 1)



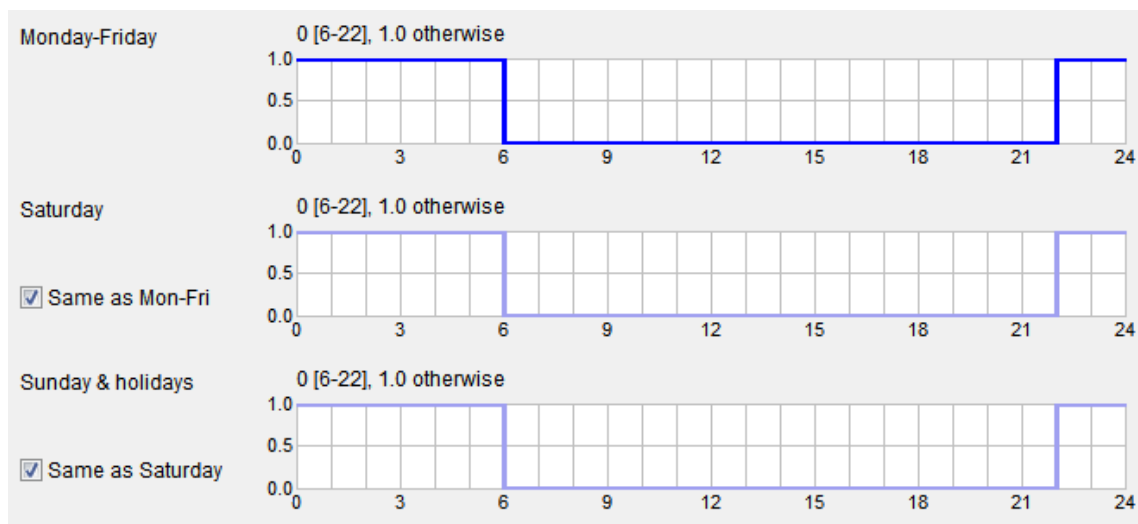
### B. 3: Tilstedeværelse i stue på dagtid (Antall personer totalt = 4)



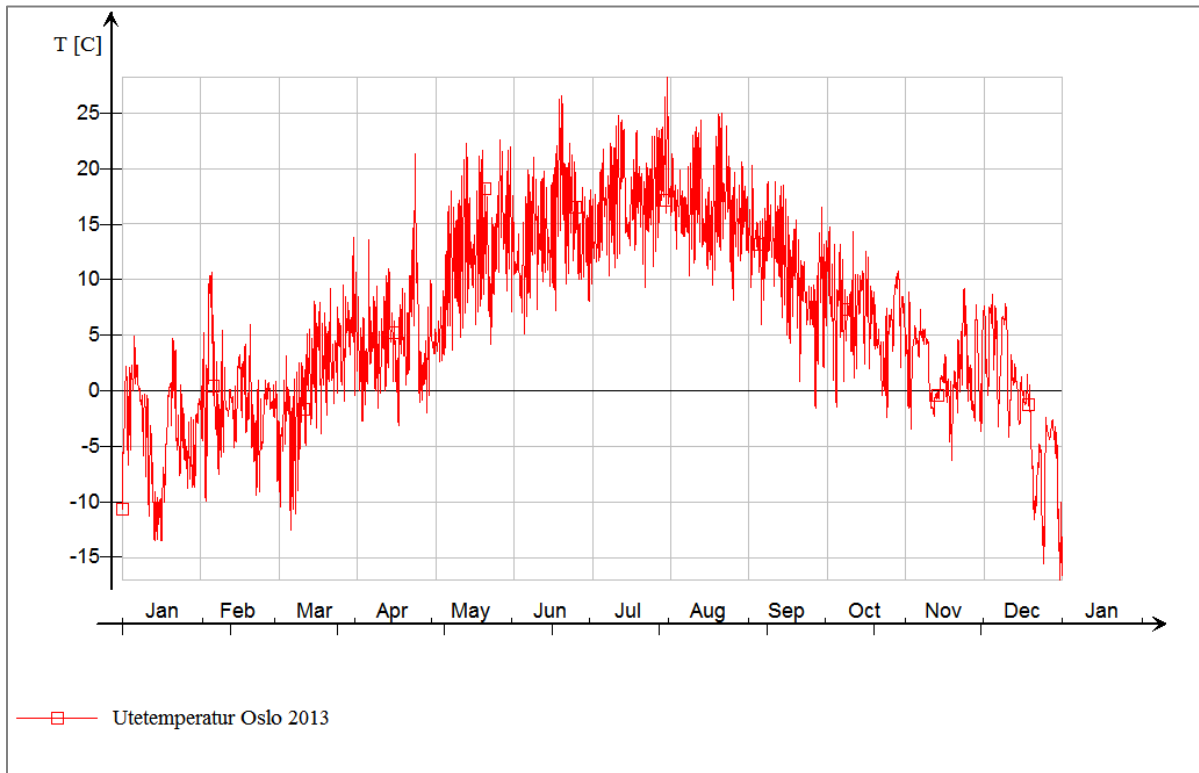
*B. 4: Tilstedeværelse på små soverom (barn) (Antall personer totalt = 1 per rom)*



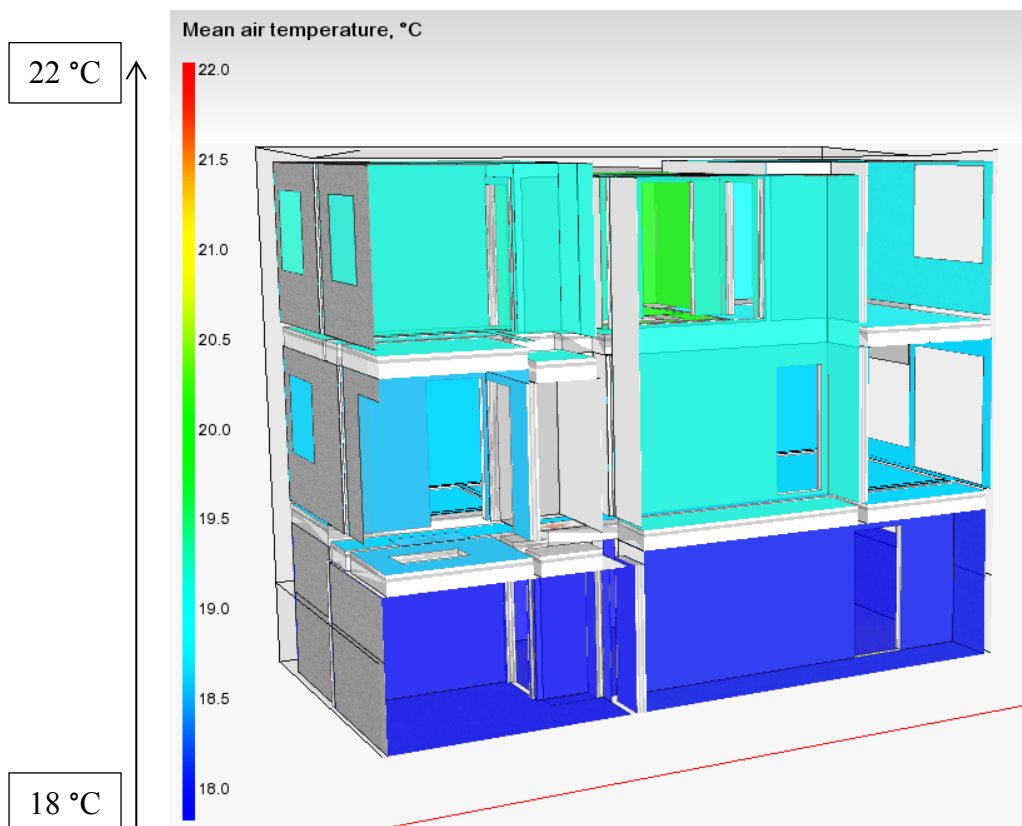
*B. 5: Tilstedeværelse på stort soverom (voksen) (Antall personer totalt = 2)*



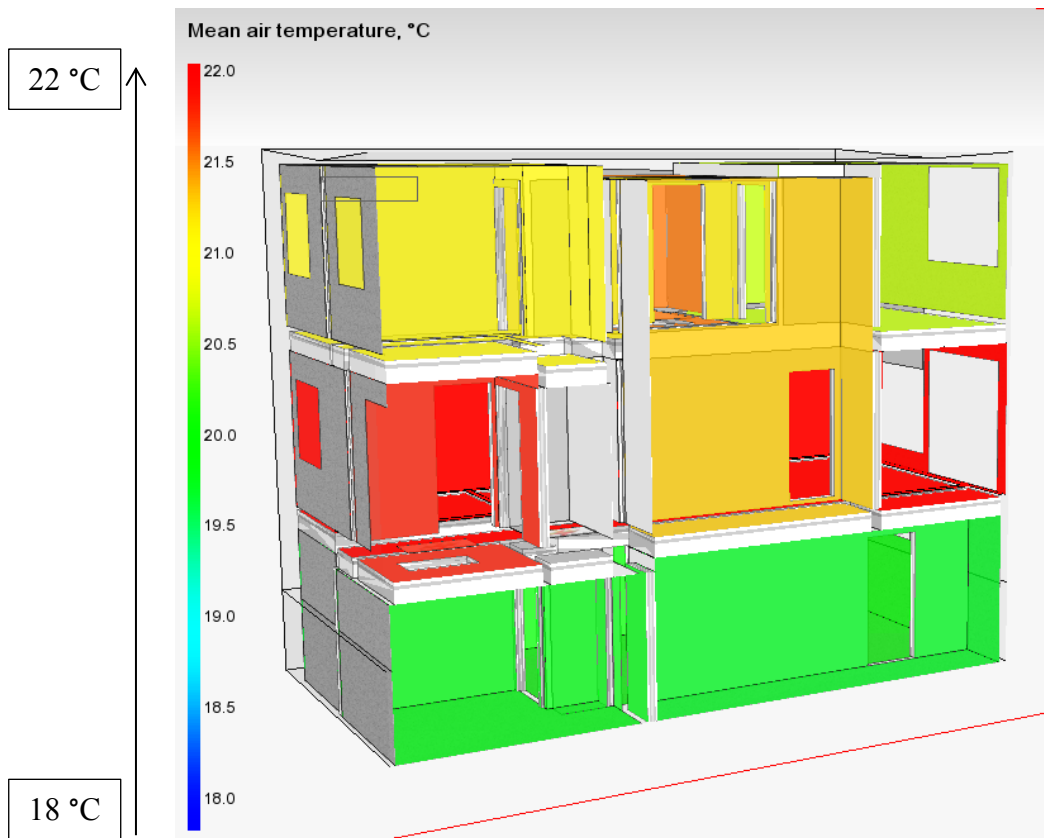
B. 6: Helårs utetemperatur, Oslo



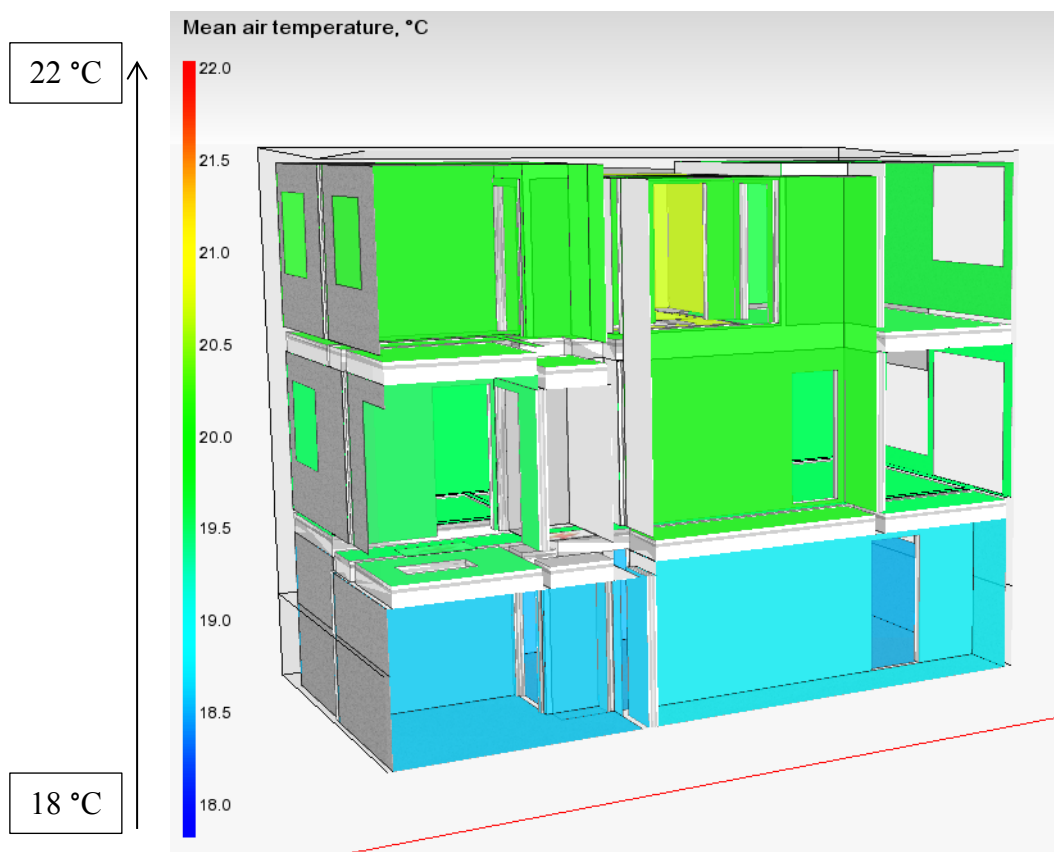
B. 7: Gjennomsnittlig lufttemperatur kl. 06:00



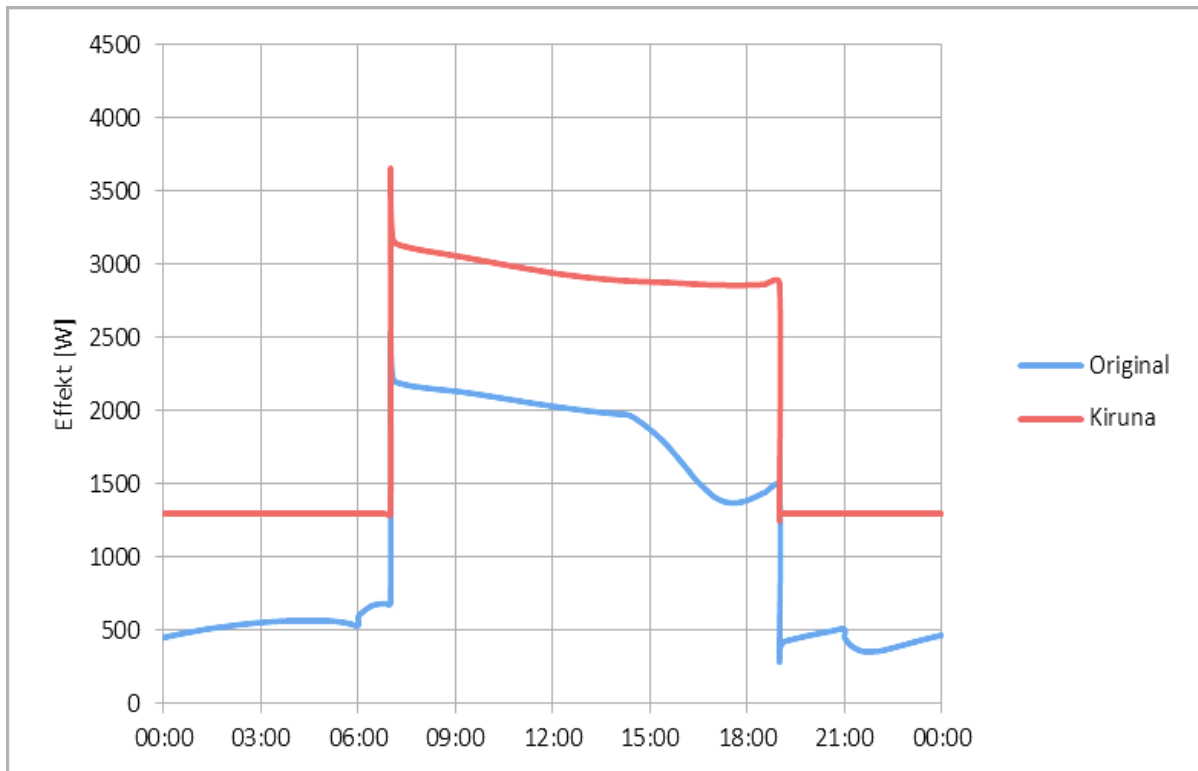
B. 8: Gjennomsnittlig lufttemperatur kl. 18:00



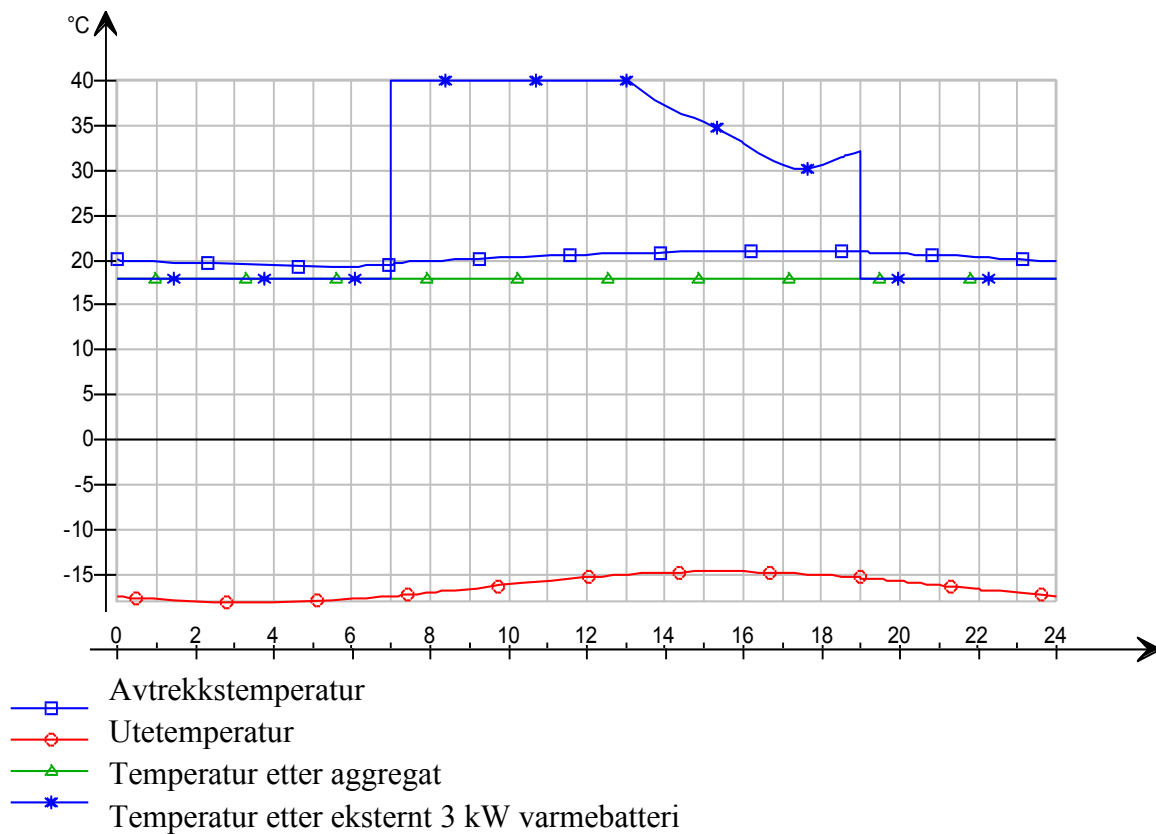
B. 9: Gjennomsnittlig lufttemperatur kl. 22:00



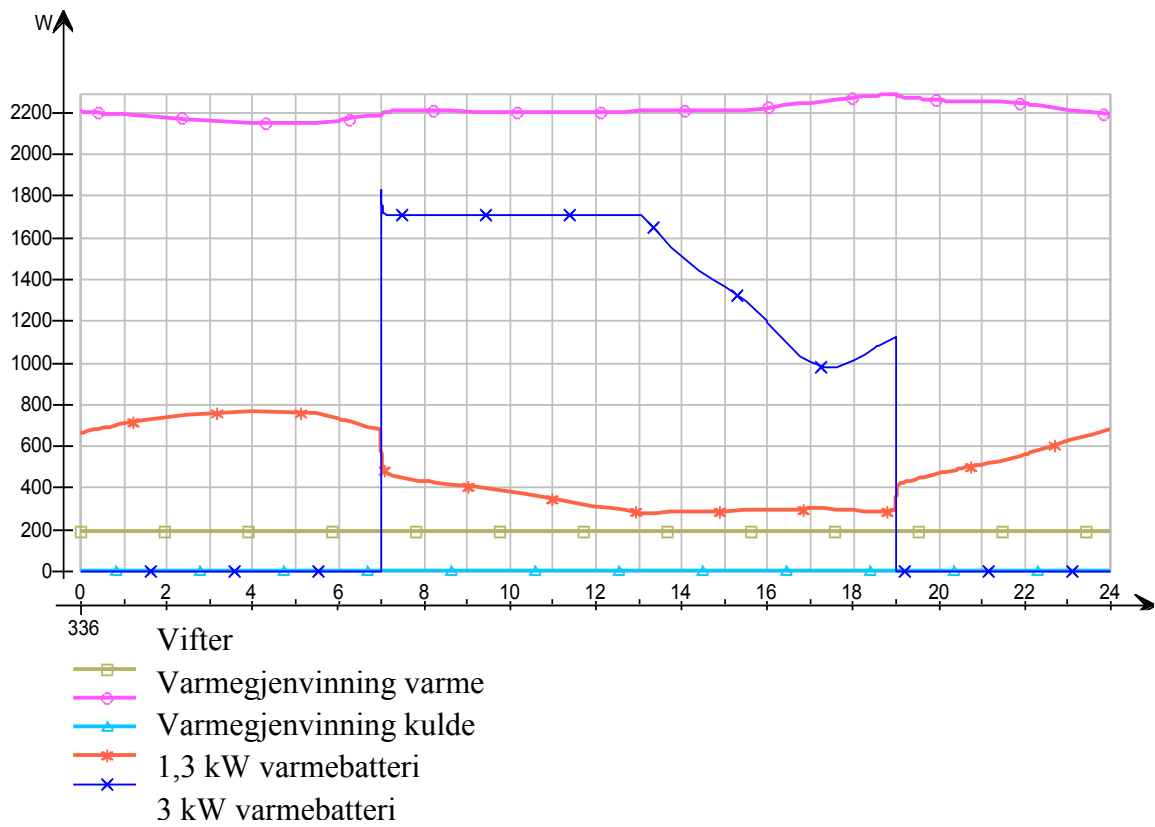
B. 10: Effektforløp for Trondheim og Kiruna



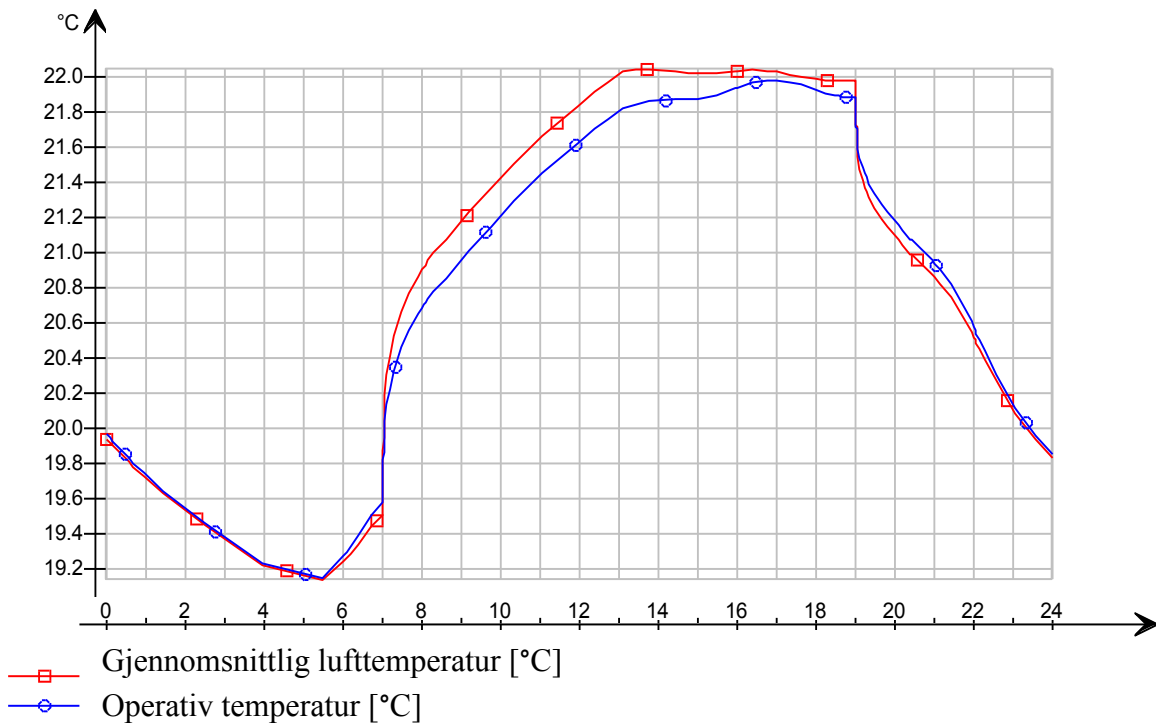
B. 11: Tilluftstemperatur DUT, endret nattsenkning



B. 12: Effekt i aggregat DUT, endret nattsenking

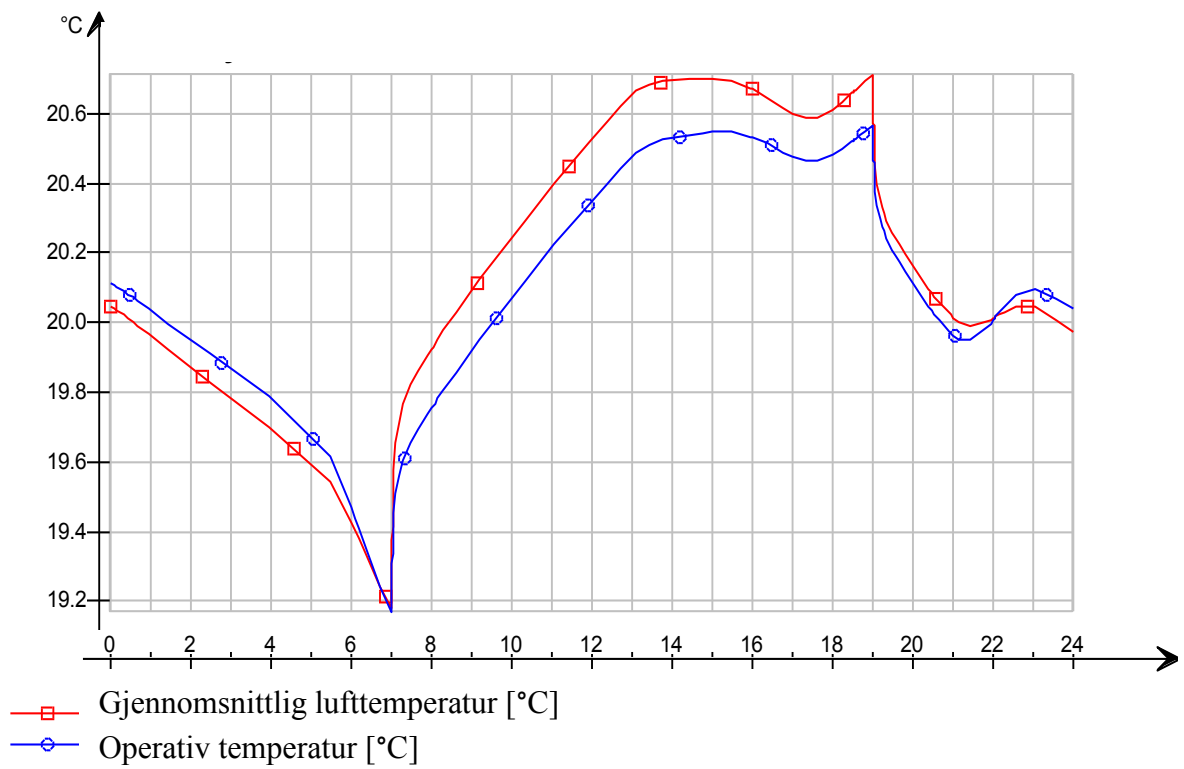


B. 13: Stuetemperatur DUT, endret nattsenking

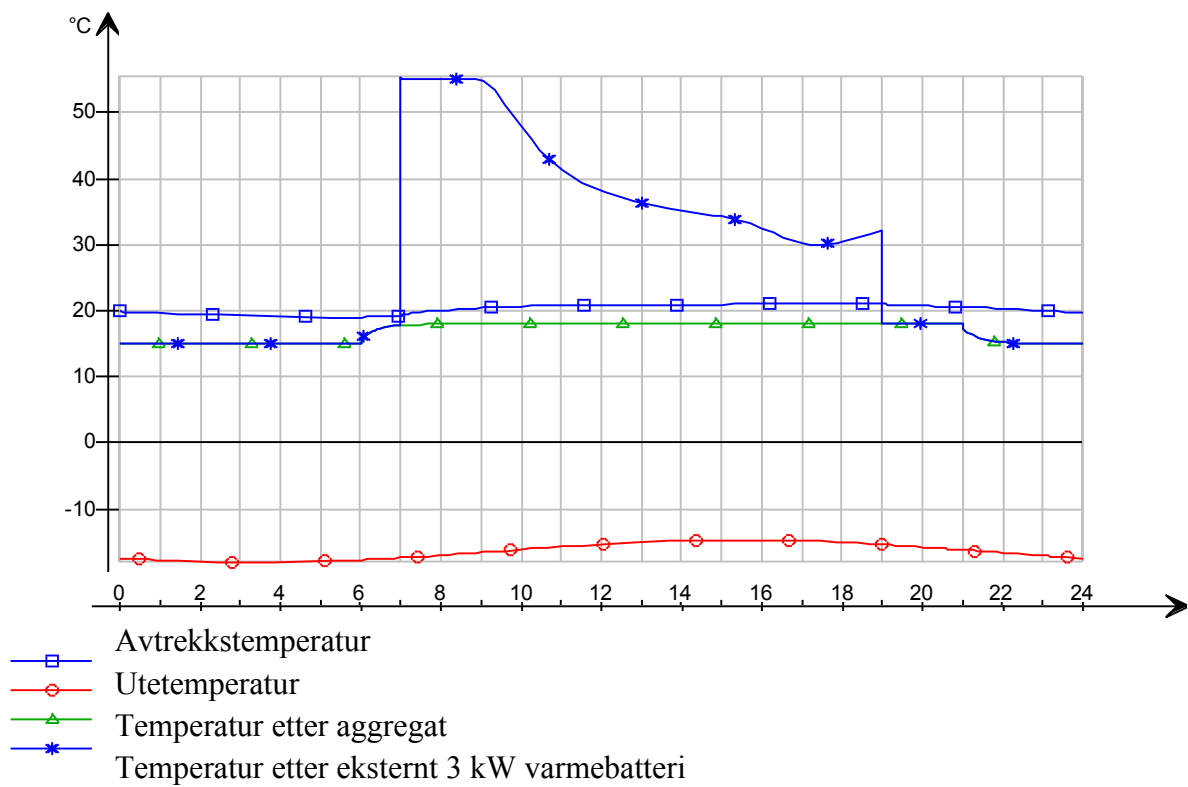




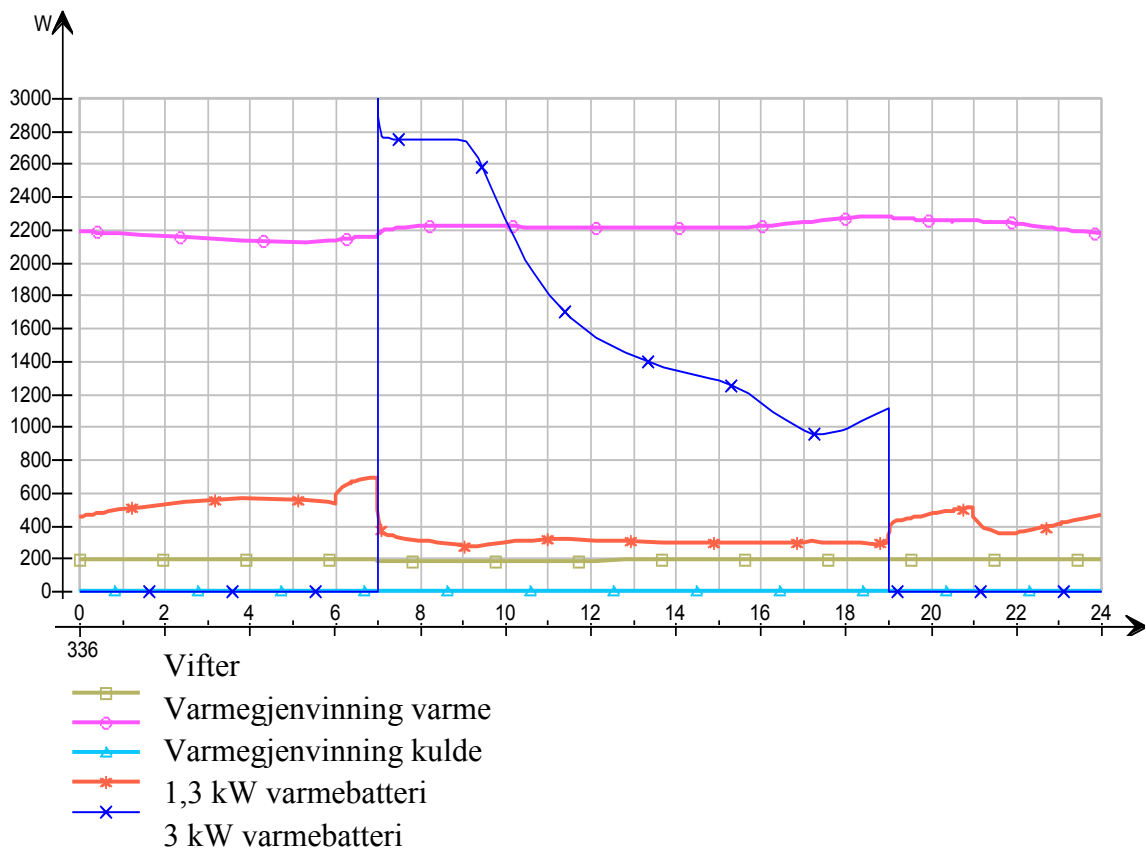
B. 14: Soveromstemperatur DUT, endret nattsenkning



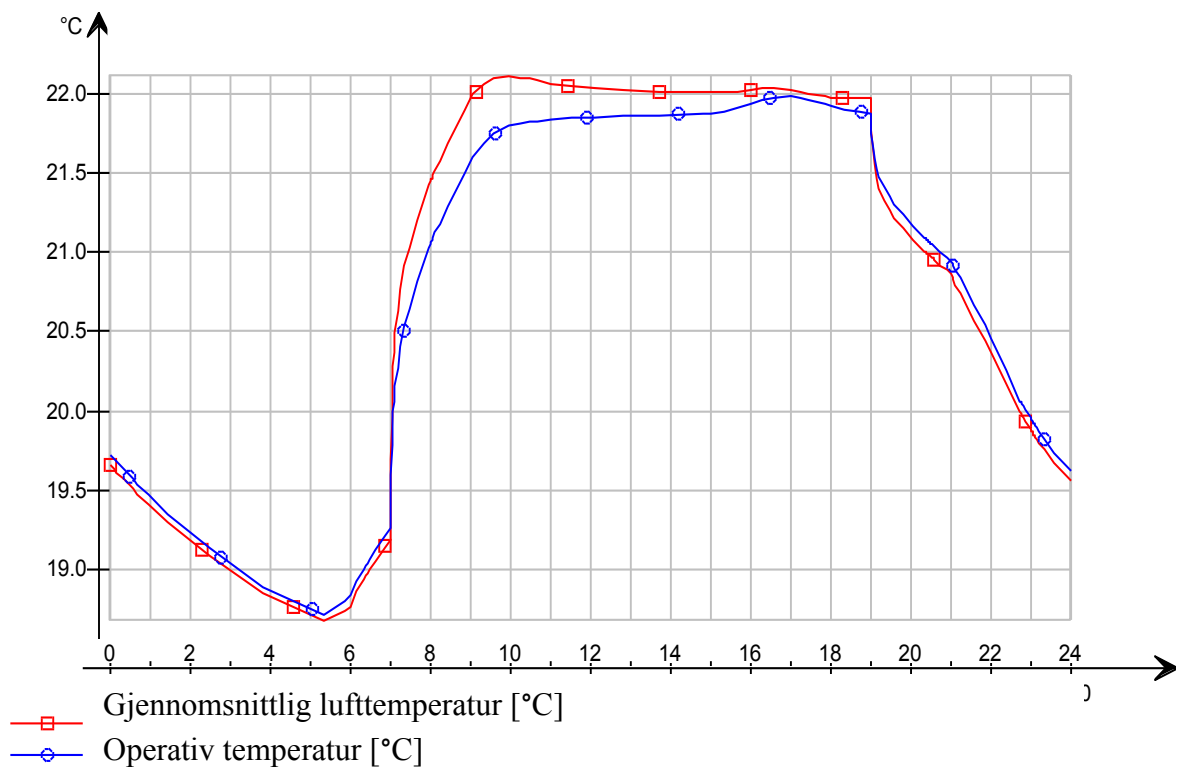
B. 15: Tilluftstemperatur DUT, 55 °C tilluft



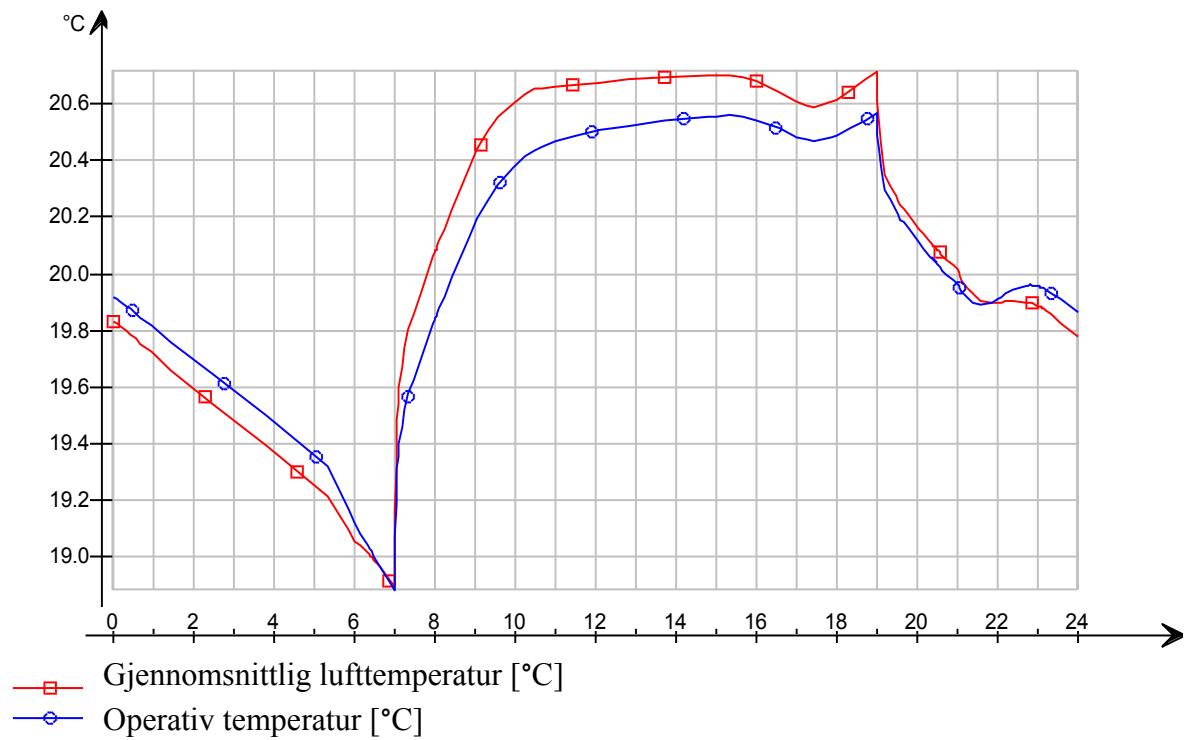
B. 16: Effekt i aggregat 15.01, 55 °C tilluftstemperatur



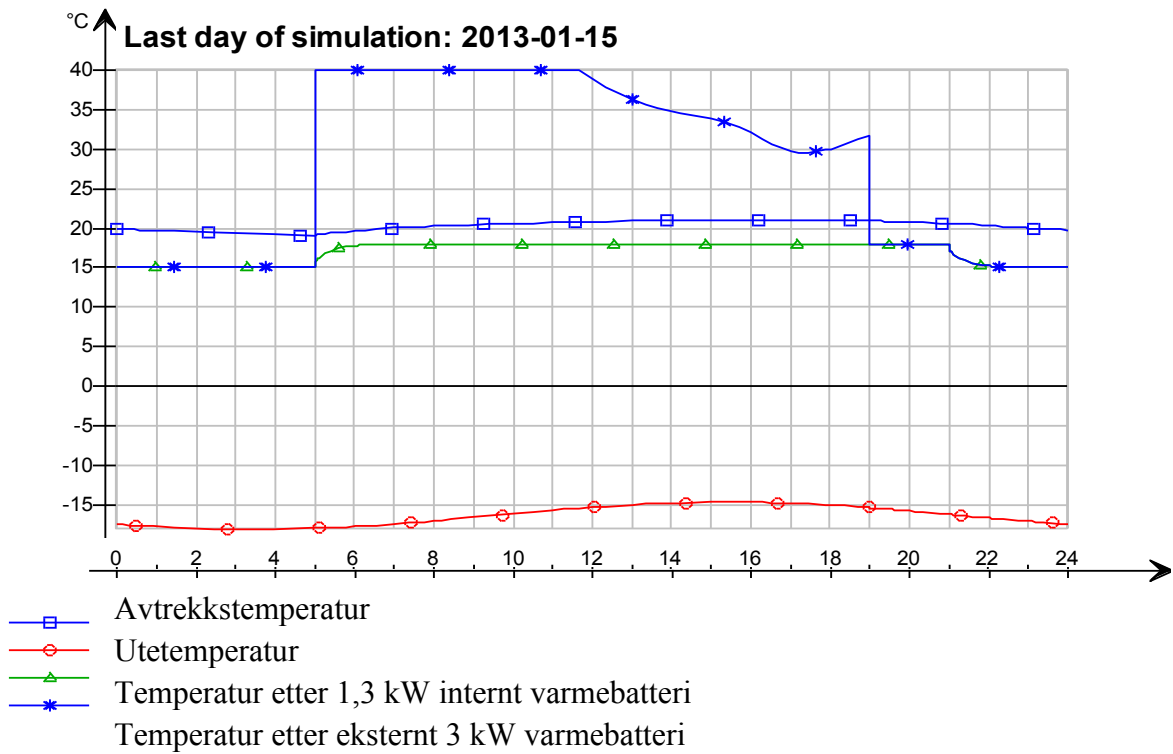
B. 17: Stuetemperatur DUT, 55 °C tilluftstemperatur



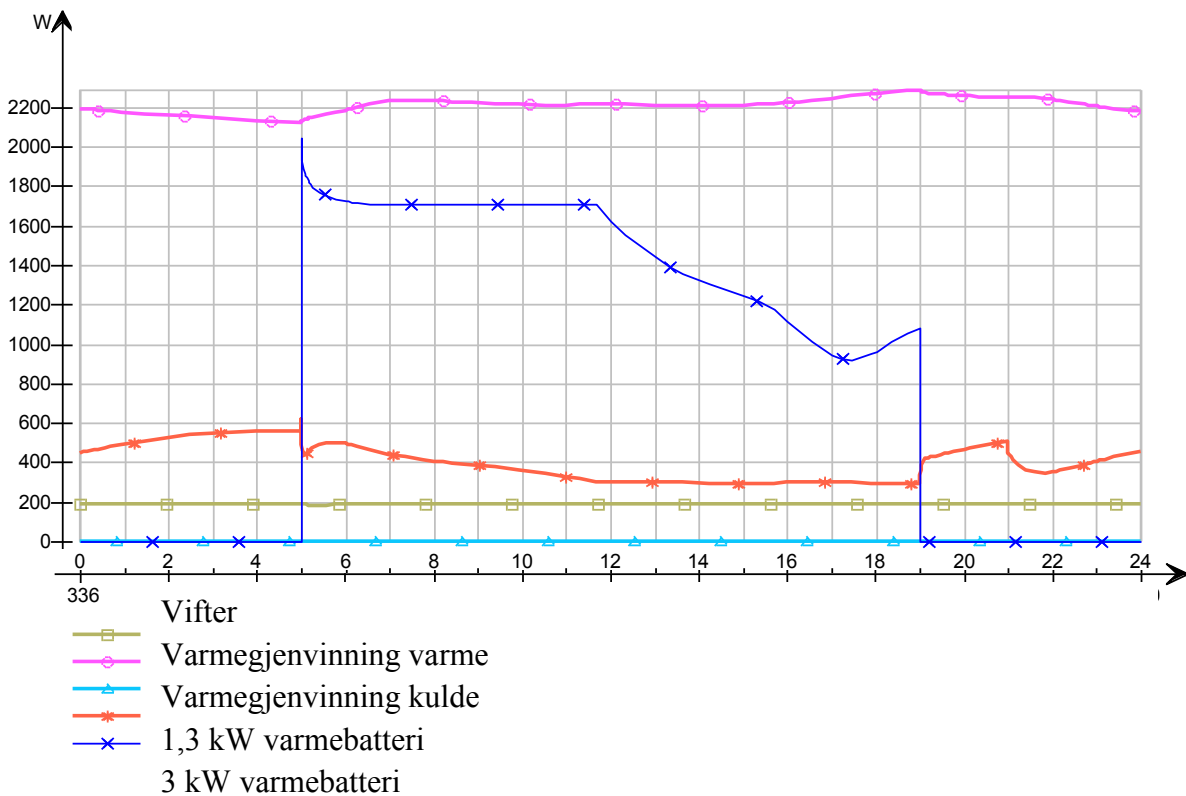
B. 18: Soveromstemperatur DUT, 55 °C tilluftstemperatur



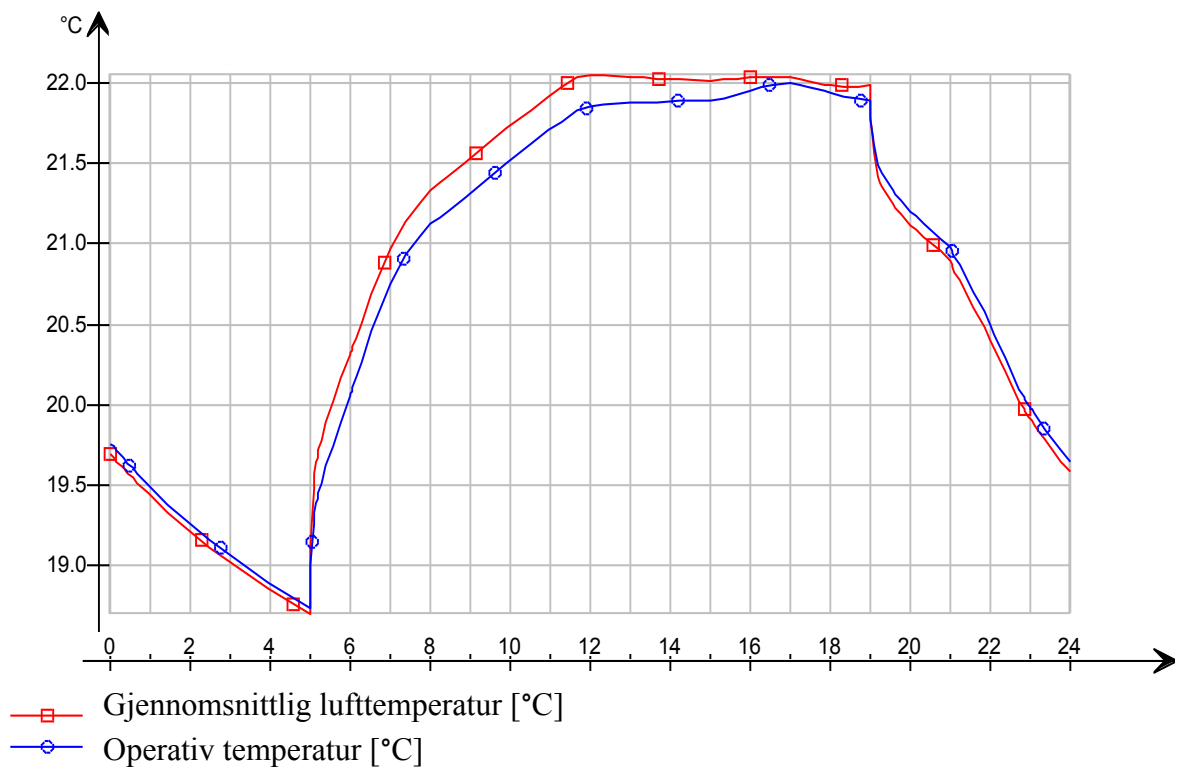
B. 19: Temperaturer i aggregat DUT, utvidet driftstid for varmebatterier



B. 20: Effekt i aggregat DUT, utvidet driftstid for varmebatterier



B. 21: Stuetemperatur DUT, utvidet driftstid for varmebatterier



B. 22: Soveromstemperatur 15.01, utvidet driftstid for varmebatterier

