

Måling og dokumentering av energiytelser ved passivhus kontorbygning

Tor Andreas Andersen

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Natasa Nord, EPT

Medveileder: Jens Petter Burud, Caverion

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for energi- og prosesseteknikk

EPT-M-2014-1

MASTEROPPGAVE

for

Student Tor Andreas Andersen

Våren 2014

Måling og dokumentering av energiytelser ved passivhus kontorbygning

*Measurement and documentation of energy performance of passive house office building***Bakgrunn og målsetting**

Passivhus standard stiller høy krav til både bygningskropp og bygningsenergiforsyningssystem. Strenge krav til prosjektering og utførelse har ført til at passivhus anerkjennes som moderne miljøvennlige bygninger med meget høy kvalitet, godt inn klima og ekstremt lavt energibehov. I Mandal er det bygd en kontorbygning etter passivhus standard. Kontorbygningen er utstyrt med en ny integrert løsning for oppvarming og ventilasjon, som var utprøvd i laboratoriet. I tillegg er bygningen utstyrt med oppfølgingssystem. Simuleringsresultater for kontorbygningen er tilgjengelig fra en tidligere masteroppgave og fra prosjekt. Student skal benytte informasjon om bygningen for å kalibrere simuleringsmodell mot reelt energibruk. Parameter studium og følsomhetsanalyse kan hjelpe i modell kalibrering. Videre skal studenten analysere energibruk da dette er bygningen med passivhus standard.

Dette prosjektarbeidet er nært knyttet til The Research Centre on Zero Emission Building ved NTNU og SINTEF (FME ZEB) som har som visjon å eliminere klimagassutslipp forårsaket av bygninger. Denne nasjonale forskningssenter vil plassere Norge i front med hensyn til forskning, innovasjon og implementering innen energieffektive nullutslippsbygg. Hovedmålet for FME ZEB er å utvikle konkurransedyktige produkter og løsninger for eksisterende og nye bygninger som vil føre til markedet penetrasjon av bygninger som har null utslipp av klimagasser relatert til deres produksjon, drift og avhending. Senteret omfatter både boliger og næringsbygg, samt offentlige bygninger.

Hensikten med oppgaven er å dokumentere energiytelser og inn klima i passivhus kontorbygningen i Mandal, samt verifisere integrert løsning for oppvarming og ventilasjon med hensyn til komfortkrav. Oppgaven skal også se på hva som mest kan påvirke energibruk i bygningen med passivhus standard.

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter

1. Litteraturstudium av lav energibygninger, passivhus og nullutslippsbygning (ZEB). Litteraturstudium skal omfatte også referanser om real energi bruk i bygninger samt med ytelsers dokumentering.
2. Under prosjektoppgave var det samlet en del av data om energibruk i bygningen. Studenten skal fortsette å samle mer data om energibruk.

3. Kalibrere simulerings modell i EnergyPlus mot målt energibruk. Dokumentere energisteler og inneklime. Gjør parameterstudium og følsomhetsanalyse.
4. Sammenligne resultater fra simulering og måling. Presentere og diskutere resultater. Presentere utfordring ved modell kalibrering. Definere noen av de mest viktige parameterne som kan påvirke energibruk.

” - ”

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

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

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

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

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, instituttnavn, 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, strømningsteknisk, varmeteknisk)
 Feltarbeid

NTNU, Institutt for energi- og prosesssteknikk, 16. januar 2014


Olav Bolland
Instituttleder


Natasa Nord
Faglig ansvarlig/veileder

Medveileder(e): Jens Petter Burud, Caverion, jens-petter.burud@caverion.no

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet i det tiende og avsluttende semesteret av sivilingeniørstudiet Energi og miljø ved Institutt for energi- og prosesssteknikk (EPT) ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), våren 2014. Oppgaven er en del av hovedprofil Energibruk i bygninger, og har en studiebelastning på 30 studiepoeng.

I masteroppgaven studeres energiytelser og inneklime i et kontorbygg bygd etter passivhusstandard. Varmeavgivning i bygget foretas fra takvarmepaneler integrert i Caverion KlimaTak.

Jeg vil benytte anledningen til å takke flere personer som har hjulpet meg med oppgaven når det har vært behov. Først og fremst Natasa Nord fra EPT, som har vært hovedveileder. Takk for all veiledning og innspill, og ikke minst raske svar når jeg lurte på noe. Stein Gerhard Johannessen fra Caverion for tilgang til energioppfølgingssystemet Energologi og SD-anlegg. Svein Hansen fra Caverion for tilsendelse av nødvendig dokumentasjon om bygget og for diskusjoner rundt målinger i Energologi. Takk også til Jens Petter Burud fra Caverion for nyttige innspill angående oppgaven.

Tilslutt ønsker jeg å takke familie, venner og bekjente for mange fine år i Trondheim.

Trondheim, 12.06.2014



Tor Andreas Andersen

Sammendrag

I Norge står bygningsmassen for nærmere 40 % av den totale energibruken og 40 % av materialbruken. Regjeringen har annonsert at de ønsker å skjerpe byggeteknisk forskrift til passivhusnivå i 2015 og nesten nullutslippsnivå i 2020. Passivhus anerkjennes i dag som moderne miljøvennlige bygninger med meget høy kvalitet, godt inneklima og ekstremt lavt energibehov.

Denne oppgaven har studert et kontorbygg i Mandal på ca. 3 000 m² bygd etter passivhusstandard. Varmeavgivning i bygget foretas fra takvarmepanener integrert i Caverion KlimaTak. Formålet med oppgaven er å dokumentere energiytelser og inneklima i bygget, samt også undersøke parametere som påvirker energibruk i passivhus. Dette ble utført ved å samle teknisk data om bygget, som ble implementert inn i simuleringsprogrammet EnergyPlus. Energikildene til oppvarmingssystemet består av en luft til vann varmepumpe med el-kjel som spisslast. Energibruk til oppvarming og elforbruk fra bygget ble målt fra energioppfølgingsystemet Energologi. Luftmengder og temperaturer fra bygget ble logget fra SD-anlegget (sentral driftskontroll).

Resultatene fra årssimulering med inndata fra NS 3701 og TEK 10 viste at spesifikk energibruk per år var 46,73 kWh/m² til oppvarming og 38,74 kWh/m² til elforbruk. Tilsvarende resultater for den graddagskorrigerte målingen var 19,92 kWh/m² og 50,47 kWh/m². Det viste seg at det målte lekkasjetallet for bygget var lavere enn kravet i NS 3701 og at ikke hele bygget var i drift. Ved å endre disse parameterne samt også endre snitt effektbehov for belysning og teknisk utstyr til NS 3031-nivå, ble resultatene for den kalibrerte simuleringsmodellen spesifikk energibruk per år til oppvarming på 21,87 kWh/m² og elforbruk på 54,71 kWh/m². Resultatene fra målingene viste at bygget tilfredsstilte NS 3701-kravet.

Ventilasjonsanlegget til bygget var prosjektert til luftmengder på 24 290 m³/h. Logging fra SD-anlegget viste at snittet lå på 14 000 m³/h. Tilsvarende tall fra simuleringsmodellen med NS 3701-verdier var 11 000 m³/h. Simuleringsmodellen ble kalibrert ved å endre belastningen i de ulike etasjene ut ifra hvilke rom som ikke var i bruk. I tillegg ble spesifikke luftmengder økt til NS 3031-nivå. Dette førte til at luftmengdene i simuleringen økte til 14 000 m³/h, samt at etasjefordelingen ble lik.

Inneklimasimuleringen viste at det oppstår overoppheting på varme sommerdager. Det var imidlertid ikke installert kjølebatteri i simuleringen. Inneklima ble i simuleringsmodellen evaluert ved Fanger komfortmodell og adaptiv komfortmodell basert på NS 15251 i tre soner. Kategori III, som regnes som akseptable forhold, var tilfredsstilt i 72-92 % av driftstiden ved Fanger og i 96,3-99,6 % av driftstiden ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251. De lave tallene ved Fanger skyldtes møterommet som var simulert med høy personbelastning og drift gjennom hele dagen, slik at resultatene er et worst-case-scenario. Dermed regnes inneklima som tilfredsstillende.

Lekkasjetallet hadde størst innvirkning på energibruken av de studerte parameterne i denne oppgaven. Ved å endre fra TEK 10- til NS 3701-nivå for lekkasjetall, sank spesifikk

energibruk per år med 37,03 kWh/m². Ekstra isolering for bedre U-verdier var mindre viktig hvis bygget allerede tilfredsstilte minimum TEK 10-kravet.

Abstract

Buildings in Norway are responsible for almost 40% of the total energy consumption and 40% of the material usage. The Norwegian Government has announced that they want stricter energy requirements in the building code; the goal is passive house level by 2015 and nearly-zero-emission-level by 2020. Passive houses are today recognized as modern environmentally friendly buildings with high quality, good indoor climate and extremely low energy use.

This master thesis has studied an office building of approximately 3 000 m², which fulfil the passive house standard. Space heating takes place from ceiling heat panels integrated in Caverion KlimaTak. The purpose of the thesis is to document energy performances and indoor climate as well as examine parameters that affects the energy use in passive houses. This was solved by collecting and implementing technical data about the building in the simulation software EnergyPlus. Energy sources in the heating system consists of an air to water heat pump with an electric boiler as peak load. Energy use for heating and electricity were measured by an energy monitoring system called Energologi. Airflows and temperatures were logged from the building management system.

The results from the initial simulation with data from NS 3701 and TEK 10 showed that the energy usage for one year was 46.73 kWh/m² for heating and 38.74 kWh/m² for electricity. Equivalent results from the degree-day corrected measurement were 19.92 kWh/m² and 50.47 kWh/m². It turned out that the office building's airtightness was lower than the requirement in NS 3701, and that some of the offices not were in use. Moreover, the average power requirements were changed for lighting and technical equipment to NS 3031 level. The results from the calibrated model was 21.87 kWh/m² for heating and 54.71 kWh/m² for electricity. The results of the measurements showed that the building meets the requirements of NS 3701.

The ventilation system is designed for airflows of 24 290 m³/h. Logged values from the building management system showed that the average airflows were 14 000 m³/h. The equivalent number from the simulation model with NS 3701 values was 11 000 m³/h. The model was calibrated by changing the load in the different floors in addition to changing specific airflows to NS 3031 values. This resulted in airflows of 14 000 m³/h and equal floor load.

Indoor climate simulation showed that overheating will occur on hot summer days. However, there was no cooling coil included in the simulation model. Indoor climate was evaluated in the simulation model by Fanger comfort model and adaptive comfort model based on NS 15251 in three different zones. Category III, which is considered as acceptable conditions, were satisfied in 72-92% of the operating time with Fanger and in 96.3-99.6% of the operating time by NS 15251. The lower result with Fanger was due to the meeting room, which was simulated with high occupation density through the entire operating time. Those results are therefore a worst-case scenario. Indoor climate was therefore considered as acceptable.

The building airtightness has the greatest impact on the energy use among the studied parameters. By reducing the airtightness number from TEK 10 to NS 3701 level, the energy

use was reduced by 37.03 kWh/m². Reduction of U-values are less important if the building already satisfies TEK 10 requirements.

Innholdsfortegnelse

1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Mål	1
1.3 Begrensninger og avgrensninger	2
1.4 Struktur på oppgaven.....	3
2 Passivhus og lavenergibygninger	5
2.1 Passivhus og lavenergibygge i Norge	5
2.2 Passivhusstandarden NS 3701	6
2.2.1 Oppvarmingsbehov.....	6
2.2.2 Kjølebehov	8
2.2.3 Bygningsdeler, komponenter, systemer og lekkasjetall	9
2.2.4 Energiforsyning	9
2.2.5 Øvrig.....	9
2.3 Sammenligning TEK 97, TEK 10, lavenergibygge og passivhus	10
2.4 Inneklima i lavenergibygninger og passivhus	11
3 Nullutslippsbygninger - ZEB	13
3.1 ZEB og nZEB definisjoner.....	13
3.2 Norske forhold.....	14
3.3 ZEB-senterets definisjon på ZEB	15
3.3.1 Minimumskrav til energieffektivitet.....	15
3.3.2 Krav til inneklima.....	15
3.4 Sammenligning av TEK 10, lavenergibygge, passivhus og ZEB	17
4 Energibruk i bygninger.....	19
4.1 Faktorer som påvirker energibruk i bygninger	19
4.2 Forklaring av faktorer som påvirker energibruk i bygninger	20
4.2.1 Klima	20
4.2.2 Bygningsrelaterte karakteristikk.....	20
4.2.3 Drift og vedlikehold	21
4.2.4 Tekniske installasjoner	21
4.2.5 Bruksmønster.....	21
4.2.6 Inneklima	22
4.2.7 Romoppvarming eksempel	22
5 Metode.....	23
5.1 Simuleringsprogram - EnergyPlus	23
5.2 SD-anlegg og energioppfølgingsystem.....	23
5.3 Modellkalibrering.....	24

5.4 Energiytelser.....	26
5.5 Klimakorrigerering av energibruk.....	26
5.5.1 Graddager.....	27
5.5.2 Normalårskorrigerering.....	27
5.6 Inneklima.....	28
5.6.1 Fanger komfortmodell.....	28
5.6.2 Adaptiv komfortmodell basert på NS 15251.....	30
6 Kontorbygget Havutsikt.....	33
6.1 Oppvarmingssystem i Havutsikt.....	33
6.2 Ventilasjonssystem i Havutsikt.....	35
6.3 Klimatak med takvarme i Havutsikt.....	36
7 Simuleringsmodell og energimåling.....	39
7.1 Simulering av bygningen i EnergyPlus.....	39
7.1.1 Sentral inndata i simuleringsmodellen.....	41
7.1.2 Temperaturkrav, internlaster, luftmengder og grunntemperatur i simuleringsmodellen.....	41
7.2 Inneklimasimulering.....	42
7.3 Energimåling.....	44
7.4 Usikkerheter.....	46
8 Resultater.....	47
8.1 Energimålinger fra Energologi.....	47
8.1.1 Diskusjon og justering av energimålinger fra Energologi.....	52
8.2 Simuleringsresultater fra EnergyPlus.....	55
8.3 Kalibrering av simuleringsmodell mot målt energibruk.....	57
8.3.1 Kalibreringsprosess.....	59
8.3.2 Kalibrering av konstruksjonsinnstillinger.....	60
8.3.3 Kalibrering av utstyr innstillinger.....	61
8.3.4 Kalibrering av driftsinnstillinger.....	63
8.4 Takvarmepanelene studert i Energologi og SD-anlegg.....	69
8.5 Nærmere studie av luftmengdene i ventilasjonssystemet.....	71
8.5.1 Kalibrering av simuleringsmodell mot luftmengder fra SD-anlegg.....	75
8.6 Inneklimaevaluering.....	79
8.6.1 Evaluering av inneklima ved Fanger komfortmodell.....	81
8.6.2 Evaluering av inneklima ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251.....	84
8.6.3 Diskusjon av inneklima.....	86
8.6.4 Logging av temperaturer fra SD-anlegg.....	87
9 Diskusjon.....	91
9.1 Energibruk til oppvarming evaluert mot NS 3701-krav.....	91

9.2 Følsomhetsanalyse av parametere som påvirker energibruk i bygninger.....	92
9.3 utfordringer ved modellkalibrering	96
10 Konklusjon	99
11 Videre arbeid	101

Vedlegg

Vedlegg 1: Plantegninger datert 29.01.2013

Vedlegg 2: Systemkjema VAV datert 29.01.2013

Vedlegg 3: Varmepumpe teknisk data

Vedlegg 4: El-kjel teknisk data

Vedlegg 5: SIMIEN-simulering datert 14.02.2012

Figurliste

Figur 1: Kyotopyramiden [10].....	5
Figur 2: Varmebehov for en bygning [6]	7
Figur 3: Typisk formålsdelt energibruk for kontorbygning for ulike forskrifter og standarder. Simulert for tungt kontorbygg og solavskjerming [18].....	11
Figur 4: De ulike faktorene som påvirker energibruken i bygninger [29].....	20
Figur 5: Flytskjema som viser faktorer som påvirker romoppvarming [34]	22
Figur 6: Anbefalt målestruktur for energimåling i nye yrkesbygg [7]	24
Figur 7: Flytskjema over modellkalibreringen	25
Figur 8: Systemgrenser for energiberegninger [37]	26
Figur 9: Sammenheng mellom PMV og PPD [41].....	29
Figur 10: Akseptable sommertemperaturer innendørs for bygninger uten mekanisk kjøling	31
Figur 11: Kontorbygget Havutiskt [43].....	33
Figur 12: Systemskisse av varmepumpe og el-kjel til kontorbygget.....	34
Figur 13: Systemskjema for oppvarmingssystemet til kontorbygget	34
Figur 14: Systemskjema for ett av to ventilasjonsaggregater til kontorbygget	35
Figur 15: Oversikt over det behovsstyrte ventilasjonsanlegget til kontorbygget	36
Figur 16: Skisse av varmepaneler integrert i Caverion KlimaTak som er montert i kontorbygget [46].....	37
Figur 17: Varmepaneler integrert i himlingen i kontorbygget [46].....	37
Figur 18: Simuleringsmodellen i EnergyPlus ble laget ut i fra plantegningene [8]	39
Figur 19: Simuleringsmodellen i EnergyPlus.....	41
Figur 20: Tidsplanene for internbelastningene i EnergyPlus	42
Figur 21: Oversikt over de studerte sonene i inneklimasimuleringen i EnergyPlus. Romfordeling fra SD-anlegg.....	43
Figur 22: Inndata i EnergyPlus for inneklimasimulering	44
Figur 23: Systemskisse over energimålerne	45
Figur 24: Oversikt over de ulike energimålerne og valg av tidsperiode i Energologi.....	47
Figur 25: Valg av tidsintervall i Energologi.....	48
Figur 26: Resultatene vist grafisk i Energologi for valgte energimålere og periode	48
Figur 27: Varmebehov – Måling fra Energologi.....	49
Figur 28: Kondensatorvarme fra varmepumpe og varme fra el-kjel – Måling fra Energologi	49
Figur 29: Kondensatorvarme og el til kompressor til varmepumpa - Måling fra Energologi	50
Figur 30: Energibruk til varmepaneler og varmebatteri - Måling fra Energologi	50
Figur 31: Energibruk varmebatteri i mai - Skjerm bilde fra Energologi	51
Figur 32: Oversikt over strømmålere i Energologi.....	51
Figur 33: Elektrisitetsforbruk - Måling fra Energologi	52

Figur 34: Energibruk til varmebatteri og varmepaneler - Justert måling fra Energologi	53
Figur 35: Varmebehov - Justert måling fra Energologi.....	53
Figur 36: Energibudsjett full drift av bygget - Resultater fra EnergyPlus.....	55
Figur 37: Kondensatorvarme fra varmepumpe og varme fra el-kjel - Resultater fra EnergyPlus.....	55
Figur 38: Elektrisitetsforbruk - Resultater fra EnergyPlus.....	56
Figur 39: Sammenligning av klimadata fra måling og simulering	57
Figur 40: Sammenligning av energibruk til oppvarming og elforbruk fra måling og simulering	58
Figur 41: Sammenligning av energibruk til oppvarming	58
Figur 42: Sammenligning av elektrisitetsforbruk.....	59
Figur 43: Energibruk til oppvarming inkludert konstruksjonsmessig kalibrering.....	60
Figur 44: Elektrisitetsforbruk inkludert kalibrering av utstyr innstillinger	62
Figur 45: Energibruk til oppvarming inkludert kalibrering av utstyr innstillinger.....	62
Figur 46: Oversikt over ledige lokaler i bygget [52].....	63
Figur 47: Energibruk til oppvarming inkludert kalibrering av drift	65
Figur 48: Elektrisitetsforbruket inkludert kalibrering av drift.....	65
Figur 49: Sammenligning energibruk til oppvarming for måling og kalibrert modell.....	67
Figur 50: Sammenligning av elforbruk for måling og kalibrert modell	67
Figur 51: Varighetsdiagram oppvarming for måling.....	68
Figur 52: Varighetsdiagram oppvarming for kalibrert modell	68
Figur 53: Energibruk til varmepanelene for ett år - Skjerm bilde fra Energologi	69
Figur 54: Oversikt over det vannbårne varmesystemet til bygget - Skjerm bilde fra SD-anlegg.....	70
Figur 55: Logging av tur- og returtemperaturer - Skjerm bilde fra SD-anlegg	70
Figur 56: Energibruk til varmepanel samt tur- og returtemperatur til varmepanelene for uke 11	71
Figur 57: Logging av luftmengder - Skjerm bilde fra SD-anlegg	72
Figur 58: Sammenligning av luftmengder for hele bygget fra SD-anlegg og simulering	73
Figur 59: Sammenligning av luftmengder for 1. etasje fra SD-anlegg og simulering	73
Figur 60: Sammenligning av luftmengder for 2. etasje fra SD-anlegg og simulering	74
Figur 61: Sammenligning av luftmengdene for 3. etasje fra SD-anlegg og simulering.....	75
Figur 62: Sammenligning av luftmengder for hele bygget fra SD-anlegg, 6. simulering og lufts simulering 1	76
Figur 63: Sammenligning av luftmengder for hver etasje fra SD-anlegg, 6. simulering og lufts simulering 1	77
Figur 64: Sammenligning av luftmengder for hele bygget fra SD-anlegg, lufts simulering 1 og lufts simulering 2	78
Figur 65: Sammenligning av luftmengder per etasje fra SD-anlegg og lufts simulering 2.....	78
Figur 66: Operativ temperatur vinterforhold	79
Figur 67: Operativ temperatur sommerforhold	80

Figur 68: Operativ temperatur ved varme sommerdager.....	81
Figur 69: Inneklima for kontor 1. etasje ved Fanger.....	82
Figur 70: Inneklima for kontorlandskap i 2. etasje ved Fanger.....	83
Figur 71: Inneklima for møterom i 3. etasje ved Fanger.....	83
Figur 72: Inneklima for kontor i 1. etasje ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251.....	85
Figur 73: Operativ temperatur 3. august med grenser for de ulike kategoriene for kontor i 1. etasje...	85
Figur 74: Inneklima for kontorlandskap i 2. etasje ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251 ...	86
Figur 75: Inneklima for møterommet i 3. etasje ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251.....	86
Figur 76: Oversikt over romregulering i 1. etasje - Skjermbilde fra SD-anlegg.....	88
Figur 77: Loggede temperaturer fra SD-anlegg for uke 2 i utvalgte rom.....	88
Figur 78: Loggede temperaturer fra SD-anlegg for uke 12 i utvalgte rom.....	89
Figur 79: Følsomhetsanalyse av total energibruk.....	94
Figur 80: Levert energi for TEK 10-, passivhus- og ZEB-nivå.....	95
Figur 81: Skjermbilde fra SD-anlegg som viser at loggede luftmengder mangler for nesten hele april 98	

Tabelliste

Tabell 1: Krav til høyeste beregnede spesifikt energibehov til oppvarming i NS 3701 [6]	7
Tabell 2: Verdier for å bestemme kravet til netto spesifikt energibehov til oppvarming for passivhus og lavenergibygg i NS 3701 [6]	8
Tabell 3: Krav til høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til kjøling i NS 3701 [6]	8
Tabell 4: Kjølebehovskoeffisient i NS 3701 [6].....	9
Tabell 5: Minstekrav til bygningsdeler, komponenter, systemer og lekkasjetall i NS 3701 [6]	9
Tabell 6: Sammenligning av viktige krav fra byggeforskriftene TEK 97 og TEK 10 med lavenergibygg og passivhus [6, 14].....	10
Tabell 7: Krav til inneklime for ZEB [14].....	16
Tabell 8: Generelle krav til bygningskropp, ventilasjonsanlegg og oppvarming ved TEK 10, lavenergibygg, passivhus og ZEB [14]	17
Tabell 9: Beskrivelse av anvendelsesmuligheter for de ulike kategoriene fra NS 15251 [40].....	28
Tabell 10: Eksempel på kategorier for dimensjonering av bygninger med mekanisk oppvarming og kjøling fra NS 15251 [40]	29
Tabell 11: Oversikt over de ulike sonene i simuleringsmodellen i EnergyPlus	40
Tabell 12: Oversikt over inneklimasimulering med verdier fra EnergyPlus	43
Tabell 13: Oversikt over energimålere i Energologi	45
Tabell 14: Avvik fra energimåling i Energologi	54
Tabell 15: Endring av U-verdier og lekkasjetall i simulering 2 og 3	60
Tabell 16: Endring av utstyr innstillinger i simulering 4 og 5.....	61
Tabell 17: Endring av driftsinnstillinger og lekkasjetall fra simulering 5 til 6	64
Tabell 18: Oversikt over kalibreringsprosessen med alle resultater.....	66
Tabell 19: Inndata for luftmengder fra kalibrert simuleringsmodell	72
Tabell 20: Endring av parametere fra 6. simulering til luftsimulering 1	76
Tabell 21: Endring av parametere fra luftsimulering 1 til luftsimulering 2	77
Tabell 22: Oversikt over driftstimer per år i sonene ved evaluering av inneklime med Fanger	81
Tabell 23: Oversikt over de ulike kategoriene ved Fanger.....	82
Tabell 24: Oversikt over driftstimer per år i sonene ved evaluering av inneklime med adaptiv komfortmodell basert på NS 15251.....	84
Tabell 25: Oversikt over de ulike kategoriene ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251.....	84
Tabell 26: Evaluering av energibruk til oppvarming mot NS 3701	92
Tabell 27: Oversikt over inndata brukt i følsomhetsanalysen	93

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Energibruk og energiforsyning er høyt oppe på den politiske agendaen i de fleste land. Dette på grunn av stadig økende energipriser, økende bekymring angående forsyningssikkerhet og ikke minst global oppvarming. Beregninger gjort av det internasjonale energibyrådet (International Energy Agency - IEA), viser at verdens CO₂-utslipp vil øke fra dagens 27Gt til 40 Gt i 2030 hvis man ikke setter inn tiltak for å redusere utslippet. Dette vil få katastrofale følger for klimaet på grunn av temperaturøkning [1].

I Norge står bygningsmassen for nærmere 40 % av energibruken og 40 % av materialbruken. Globalt sett bidrar bygninger med 30 % av verdens energibruk og 21 % av klimagassutslippene [2]. Med innføringen av TEK 10 (gjeldene byggeteknisk forskrift), ble kravene til nye bygg ytterligere skjerpet. Nå er det ikke lenger tillatt å installere olje-kjel for fossilt brensel som grunnlast. I tillegg skal minst 60 % av netto varmebehov for bygninger over 500 m² dekkes av andre energikilder enn direktevirkende elektrisitet eller fossilt brensel hos sluttbruker [3]. Samtidig har kravene til bedre bygningskomponenter blitt ytterligere skjerpet siden TEK 97 og delvis TEK 07. Det er imidlertid viktig å være klar over at inneklimate ikke skal komme i skyggen av energiytelser. Vi bygger bygninger for å beskytte oss mot vær og vind, men også for å sikre effektive arbeidsforhold gjennom et tilfredsstillende inneklimate i for eksempel arbeidslokaler [4].

Gjennom klimameldingen annonserte regjeringen at de ønsker å skjerpe byggeteknisk forskrift til passivhusnivå i 2015 og nesten nullenerginivå i 2020. Regjeringen vil senere fastsette nærmere bestemmelser på hva som skal definere passivhusnivå og nesten nullenerginivå. Det overordnede målet er å bli karbonnøytral innen 2050 [5].

Passivhus anerkjennes i dag som moderne miljøvennlige bygninger med meget høy kvalitet, godt inneklimate og ekstremt lavt energibehov. Energibehovet reduseres ved bedre isolering av vegg, tak og gulv, energieffektive 3-lags vinduer, reduserte luftlekkasjer, balansert ventilasjon med varmegjenvinning og styresystemer for energibruken av de tekniske installasjonene [6].

Det er i dag ingen fast metode for oppfølging av energibruk i passivhus. Både målinger og sammenligninger mot prosjekterte og simulerte resultater praktiseres ulikt. Dette fører til usikkerhet rundt målt energibruk i forhold til ambisjoner under prosjektering. I tillegg er selve energioppfølgingen ulikt utført. Energioppfølgingen utføres både med og uten formålsdeling, samt også med felles eller individuell avlesning. Samtidig må målt energibruk klimakorrigeres for og sammenlignes med andre år. Dette er heller ikke alltid utført. Det vil si at den målte energibruken sammenlignes både med og uten klimakorrigerings med ulike beregningsstandarder [7].

1.2 Mål

Målet med oppgaven er å dokumentere energiytelser og inneklimate i et passivhus kontorbygg i Mandal, samt verifisere integrert løsning for oppvarming og ventilasjon med hensyn til komfortkrav. Dette løses ved måling av energibruken gjennom energioppfølgingssystemet

Energologi, som er installert i bygget. I tillegg vil luftmengder og temperaturer bli undersøkt og logget fra SD-anlegget (sentral driftskontroll). Simuleringen av bygget blir utført i simuleringssystemet EnergyPlus. Simuleringsmodellen vil bli kalibrert ved hjelp av energimålingene og loggingen av luftmengder. Oppgaven skal også se på hvilke parametere som påvirker energibruken i et passivhus. Punkter for å utarbeide oppgaven

1. Litteraturstudium av lavenergibygninger, passivhus og nullutslippsbygning (ZEB). Litteraturstudium omfatter også referanser om total energibruk i bygninger samt med ytelsers dokumentering.
2. Samle data om energibruk i bygningen ved hjelp av energioppfølgningssystemet Energologi.
3. Kalibrere simuleringssystemet i EnergyPlus mot målt energibruk. Dokumentere energiytelser og inneklime. Utføre parameterstudium og følsomhetsanalyse.
4. Sammenligne resultater fra simulering og måling. Presentere og diskutere resultater.
5. Definere noen av de mest viktige parametere som kan påvirke energibruk og presentere utfordringer ved modellkalibrering.

1.3 Begrensninger og avgrensninger

Det er i simuleringssystemet brukt standardverdier for belastning av bygningen fra NS 3701 og TEK 10. Det er i tillegg simulert uten behov for varmt tappevann eller kjøleaggregat. Dette fordi kontorbygninger vanligvis har et lavt behov for varmt tappevann. Kjølebehovet for bygget ble beregnet til 1 469 kWh per år i Jostein Wall sin masteroppgave om det samme bygget, noe som er lavt for et kontorbygg på 3 000 m². Det er derfor antatt at kjølebehovet kan elimineres ved passive tiltak som økt infiltrasjon (åpning av vinduer) og døgnkontinuerlig ventilasjon på varme sommerdager [8].

Det eksisterer energimålinger for kontorbygget fra 25.02.2013. På grunn av at mars 2013 inneholder en del små feil, er det bestemt å studere perioden fra 01.04.2013-31.03.2014. Altså ett år. Simuleringen er kjørt i samme periode.

Varmebehov og oppvarmingsbehov er i denne oppgaven antatt å være det samme. Dette fordi oppvarming av varmt tappevann verken er inkludert i simuleringssystemet eller i energioppfølgningssystemet til bygget. Videre er bidraget til de ulike energikildene til oppvarming, det vil si kondensatorvarme fra varmepumpe og varmen fra el-kjelen, slått sammen til en post. Dette fordi samspeillet mellom varmepumpe og el-kjel er svært variabelt i energimålingene. Elektrisitet til kompressor er ikke studert videre i denne oppgaven, da energimålingene var svært uforutsigbare. Varmepanelene integrert i Caverion KlimaTak er studert i begrenset form. Dette fordi det var begrensede muligheter i energioppfølgningssystemet og SD-anlegget.

1.4 Struktur på oppgaven

Innledningsvis i denne masteroppgaven blir det i kapittel 2-4 gjennomført et litteraturstudie. Litteraturstudiet starter med beskrivelse av lavenergibygninger, passivhus og nullutslippsbygg (ZEB). Disse bygg typene blir så sammenlignet med gjeldene (juni 2014) byggeforskrift, TEK 10. Til slutt i litteraturstudiet, blir faktorer som påvirker energibruk i bygninger beskrevet.

I kapittel 5 beskrives metoden for denne oppgaven. Her blir simuleringsprogrammet, energimåling, SD-anlegg, modellkalibrering, energiytelser, klimakorrigering av energibruk og inneklimamodeller som er brukt i oppgaven beskrevet.

Kapittel 6 omhandler generelt om kontorbygget Havutsikt, som er studert i denne oppgaven.

I kapittel 7 blir simuleringsmodellen i EnergyPlus presentert. Videre blir målepunkter for energimålingen fra energioppfølgingsystemet Energologi presentert. Tilslutt blir usikkerheter angående simuleringsmodell og energimålinger nevnt.

I kapittel 8 blir resultatene fra energimålingene, simuleringene og modellkalibreringen presentert. Videre blir det gjennomført en nærmere studie av varmepanelene. Deretter studeres luftmengdene i ventilasjonen, før inneklima blir evaluert i simuleringsmodellen. Til slutt blir temperaturer fra utvalgte rom kort studert.

I kapittel 9 diskuteres det hvordan målingene og resultatene samsvarer med NS 3701. Deretter blir det gjennomført følsomhetsanalyse av parametere som påvirker energibruk. Tilslutt nevnes utfordringer ved modellkalibrering.

2 Passivhus og lavenergibygninger

Passivhuskonseptet ble utviklet av Dr. Wolfgang Feist og Passivhusinstituttet i Tyskland på begynnelsen av 1990-tallet [9]. Passivhus har etter vært opplevd en stor vekst i Tyskland, Østerrike og Sveits, og i dag har mange andre land har tatt i bruk konseptene, deriblant de nordiske landene. På grunn av de strengere kravene til både prosjektering og utførelse av, betraktes passivhus i dag som svært miljøvennlige bygninger med ekstremt lavt energibehov, samtidig som inneklime er godt [6].

Generelt kjennetegnes lavenergibygg og passivhus med at de har et veldig lavt oppvarmingsbehov, ofte er dette energibehovet redusert til en fjerdedel av et ordinært bygg [1]. Metodene for å oppnå dette lave oppvarmingsbehovet er illustrert i Kyotopyramiden i figur 1. I grove trekk består Kyotopyramiden av å kraftig redusere varmetapet fra bygget. Dette oppnås med en ekstra godt isolert bygningskropp med deretter reduserte luftlekkasjer, godt isolerte vinduer og varmegjenvinning av ventilasjonsluft. Deretter installeres det energieffektiv belysning og øvrig teknisk utstyr samt også styringssystemer for å optimalisere driften. Videre utnytter man passiv solvarme på en mest mulig hensiktsmessig måte. Det vil si orientering av bygningen og spesielt vinduer med hensyn på best utnyttelse av solstråling. Avslutningsvis velges energikilde og oppvarmingsløsning som er tilpasset bygningens behov på en best mulig måte [1].

Denne strategien er skissert grafisk i kyotopyramiden i figur 1.



Figur 1: Kyotopyramiden [10]

2.1 Passivhus og lavenergibygg i Norge

Passivhus og lavenergibygg i Norge er definert ut i fra to standarder. *NS 3700 Kriterier for passivhus og lavenergibygninger – Boligbygninger* for boliger [11]. *NS 3701 Kriterier for passivhus og lavenergibygninger – Yrkesbygninger* gjelder for yrkesbygninger [6]. Der passivhus har de strengeste kravene. Disse standardene avviker fra det tyske passivhus-

instituttet på grunn av forskjeller i klima, konstruksjonsløsninger og byggeskikk. Videre er det også ønsket å ha en offisiell norsk definisjon på passivhus og lavenergibygninger, fordi begrepene da blir enklere å forstå samtidig som de også kan brukes i søknader om offentlig tilskudd. Samtidig blir det enklere for myndighetene å påvirke etterspørselen av bygninger med lavt energibruk når bygningstypene er tydelig definert. Dette vil også gjelde fremtidige forskrifter og standarder [6].

Begge standardene setter krav til blant annet minstekrav til energibehov til oppvarming, beregningskriterier og minstekrav til bygningsdeler og installasjoner. Begge bygger på energibehovsberegninger med standardisert inndata etter *NS 3031 Beregning av bygningers energiytelse – Metode og data* [12].

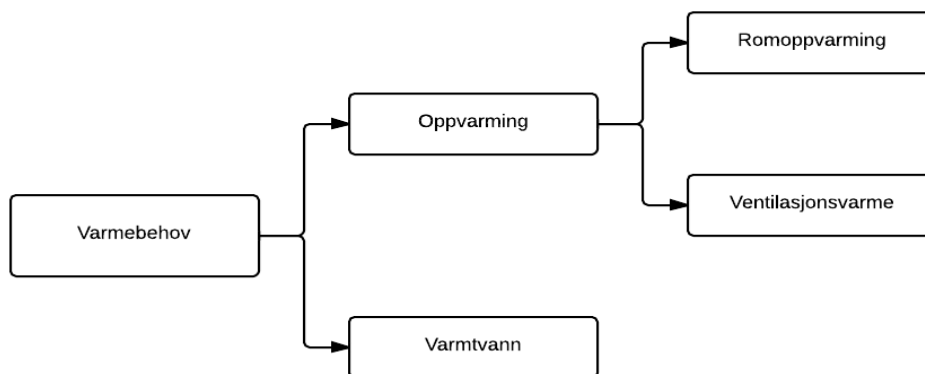
I denne oppgaven sees det nærmere på et kontorbygg bygd etter passivhusstandard. Det vil derfor i denne teoridelen bli lagt hovedvekt på NS 3701. Det understrekes at NS 3700 og NS 3701 er bygd opp likt, og dermed har mange fellestrekk. Den største forskjellen er at NS 3701 har standardverdier for ulike typer yrkesbygg (sykehus, kontorbygg, barnehage osv.) og dermed andre standardverdier for blant annet varmtvannsbehov, som igjen fører til at oppvarmingskravet blir annerledes.

2.2 Passivhusstandarden NS 3701

NS 3701 ble fastsatt i september 2012 og er per i dag fortsatt gjeldene. Denne standarden omfatter «definisjoner, krav til varmetap, oppvarmingsbehov, kjølebehov, energibehov til belysning og energiforsyning samt minstekrav til enkelte bygningskomponenter for lavenergibygninger og passivhus. Standarden gir også krav til lekkasjetall, prøvingsprosedyrer, målemetoder og rapportering av energiytelsen ved ferdigstillelse av yrkesbygninger». Det er videre i dette kapitlet kun fokusert på kontorbygg, da bygningen som studeres i denne oppgaven er et kontorbygg. Gjennomgangen gir også en oversiktlig gjennomgang av viktige og nødvendige parametere man må ta hensyn til når man skal simulere/beregne energibruk i bygninger [6].

2.2.1 Oppvarmingsbehov

Varmebehov vil si netto energibehov til romoppvarming, ventilasjonsvarme og varmtvann. Sammenhengen er illustrert i figur 2.



Figur 2: Varmebehov for en bygning [6]

Som vist i figur 2, dekker oppvarmingsbehovet både romoppvarming og ventilasjonsvarme.

Romoppvarming er varmebehov for å opprettholde ønsket innelufttemperatur, som regel 20-24 °C. Romoppvarming bestemmes av transmisjons-, infiltrasjons- og eksfiltrasjonstapene gjennom vegger, tak, vinduer osv. samt også tilført varme fra blant annet solinnstråling og interne varmetilskudd [13].

Ventilasjonsvarme er varmebehov for å varme opp tilført friskluft til ønsket temperatur, som regel 18-20 °C. Ved balansert ventilasjon med varmegjenvinning vil behovet for ettervarming av ventilasjonsluften avhengig av både varmegjenvinnerens temperaturvirkningsgrad og eventuell forvarming av uteluft ved lav utetemperatur [13].

Varmtvann er varmebehov til oppvarming av vann til sanitære forhold og vasking. Vannet blir typisk oppvarmet til 60-80 °C [13].

Krav til høyeste spesifikke energibehov til oppvarming er avhengig av oppvarmet bruksareal (BRA) og klimatiske forhold, samt at det igjen er avhengig av bygningskategori. Bygningen deles inn etter om oppvarmet del av BRA (A_{fl}) er større eller mindre enn 1000 m². I tillegg spiller klimatiske forhold inn, og kravet er definert ut i fra årsmiddeltemperatur, θ_{ym} . Her går grensen ved θ_{ym} større eller mindre enn 6,3 °C. Oversikten over kravene til høyeste beregnede spesifikt energibehov til oppvarming er gitt i tabell 1.

Tabell 1: Krav til høyeste beregnede spesifikt energibehov til oppvarming i NS 3701 [6]

Årsmiddeltemperatur θ_{ym}	Høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til oppvarming [kWh/(m ² ·år)]	
	Bygning der $A_{fl} < 1\,000\text{ m}^2$	Bygning der $A_{fl} \geq 1\,000\text{ m}^2$
$\geq 6,3\text{ °C}$	$EP_{H,0} + X \frac{(1000 - A_{fl})}{100}$	$EP_{H,0}$
$< 6,3\text{ °C}$	$EP_{H,0} + X \frac{(1000 - A_{fl})}{100} + (K_1 + K_2 \frac{(1000 - A_{fl})}{1000}) \cdot (6,3 - \theta_{ym})$	$EP_{H,0} + K_1(6,3 - \theta_{ym})$

Der

$EP_{H,0}$ er basis netto spesifikt oppvarmingsbehov gitt i tabell 2 [kWh/(m²·år)]

X er en koeffisient for oppvarmingsbehov gitt i tabell 2 [kWh/(m²·år)]

K_1, K_2 er klimakoeffisienter for oppvarmingsbehov gitt i tabell 2

A_{fl} er oppvarmet BRA [m²]

θ_{ym} er årsmiddeltemperatur [°C]

$EP_{H,0}$, X , K_1 , K_2 , A_{fl} og θ_{ym} bestemmes ut i fra bygningskategori. For kontorbygning gjelder for henholdsvis passivhus og lavenergibygning verdiene gitt i tabell 2.

Tabell 2: Verdier for å bestemme kravet til netto spesifikt energibehov til oppvarming for passivhus og lavenergibygg i NS 3701 [6]

Bygningskategori	Passivhus				Lavenergibygning			
	$EP_{H,0}$	X	K_1	K_2	$EP_{H,0}$	X	K_1	K_2
Kontorbygning	20	0,85	3,6	0,10	35	1,3	4,9	0,13

Netto spesifikt energibehov skal beregnes etter NS 3031 med klimadata fra stedet der bygningen oppføres [6].

2.2.2 Kjølebehov

Et viktig poeng med passivhus og lavenergibygning er at bygningen skal ha svært lavt energibehov til kjøling av romluft og tilluft samtidig som termisk komfort tilfredsstilles. Krav til høyeste beregnede netto spesifikke energibehov til kjøling bestemmes ut i fra dimensjonerende utetemperatur ved sommerforhold (DUT_s), som i et normal år ikke overskrider mer enn 50 timer, og bygningskategori. For kontorbygning er sammenhengen gitt i tabell 3. Netto spesifikt energibehov til kjøling skal beregnes etter NS 3031 [6].

Tabell 3: Krav til høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til kjøling i NS 3701 [6]

DUT_s	Høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til kjøling [kWh/(m ² ·år)]
> 20 °C	$\beta(DUT_s - 20)$
≤ 20 °C	0

Der

β er en kjølebehovskoeffisient avhengig av bygningskategorien, gitt i tabell 4.

DUT_s er dimensjonerende utetemperatur ved sommerforhold som i et normal år ikke overskrider mer enn 50 timer per år [°C]

β verdier for passivhus og lavenergibygninger for kontorbygning er gitt i tabell 4.

Tabell 4: Kjølebehovskoeffisient i NS 3701 [6]

Bygningskategori	Passivhus	Lavenergibygning
	β	β
Kontorbygning	1,4	2,1

2.2.3 Bygningsdeler, komponenter, systemer og lekkasjetall

I tabell 5 følger en oversikt over minstekrav til bygningsdeler, komponenter, systemer og lekkasjetall. U-verdien beregnes som gjennomsnittverdi i den enkelte bygningsdelen.

Tabell 5: Minstekrav til bygningsdeler, komponenter, systemer og lekkasjetall i NS 3701 [6]

Egenskap	Passivhus	Lavenergibygning
U-verdi, dør/vindu	$\leq 0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$\leq 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Normalisert kuldebroverdi, Ψ''^b	$\leq 0,03 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$\leq 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Årsgjennomsnittlig virkningsgrad for varmegjenvinner	$\geq 80 \%$	$\geq 70 \%$
SPF-faktor for ventilasjonsanlegg	$\leq 1,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$	$\leq 2,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$
Lekkasjetall 50 Pa, n_{50}	$\leq 0,60 \text{ h}^{-1}$	$\leq 1,5 \text{ h}^{-1}$

2.2.4 Energiforsyning

Energiforsyning til både passivhus og lavenergibyg skal oppfylle TEK 10 kravene. Hovedregelen i TEK 10 er at bygg over 500 m^2 skal minimum 60 % av netto varmebehov dekkes av andre energikilder enn direktevirkende elektrisitet eller fossilt brensel. For bygg under 500 m^2 er denne andelen 40 %. I tillegg er det ikke lenger tillatt å benytte oljekjel som grunnlast. Tillatte energikilder til grunnlast er for eksempel ulike varmpumpealternativer (vann, grunnvann, luft, jord osv.), fjernvarme (ulike energikilder, for eksempel avfallsforbrenning) og bioenergi [3].

2.2.5 Øvrig

I tillegg stilles det egne krav for minste tillatte gjennomsnittlige luftmengder. For kontorbygning er denne verdien $6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ i driftstiden til bygget og gjennomsnittlig $1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ utenfor driftstiden. I tillegg er der standard verdier for interne varmetilskudd, da fra utstyr, personer og belysning. Det forutsettes energieffektive komponenter [6].

2.3 Sammenligning TEK 97, TEK 10, lavenergibygging og passivhus

For å lettere illustrere forskjellen og utviklingen mellom de ulike byggeforskriftene og standardene, er det i tabell 6 laget en sammenligning av U-verdier i vegg, gulv, tak og vinduer, samt lekkasjetall, SPF (spesifikk vifteeffekt) og virkningsgrad på varmegjenvinneren i ventilasjonsanlegget med de ulike forskriftene og standardene. Det gjøres oppmerksom at U-verdiene for lavenergibygginger og passivhus er hentet fra Tillegg B fra NS 3701, og er kun eksempler på U-verdier. I tabellen er den høyeste (dårligste) verdien på eksempelet valgt.

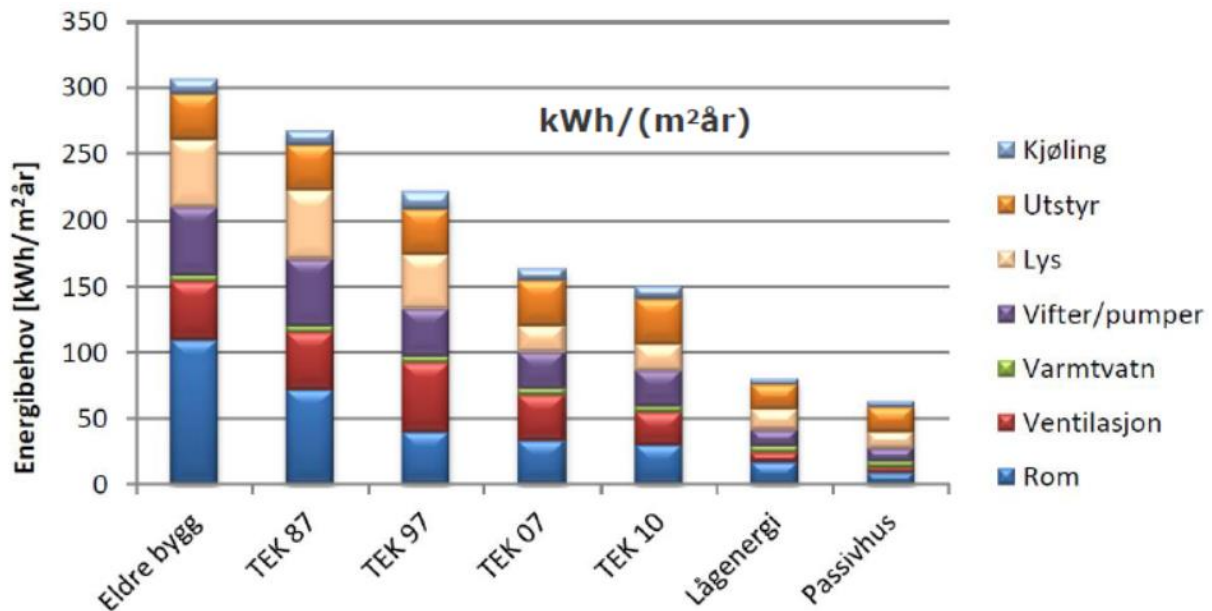
Tabell 6: Sammenligning av viktige krav fra byggeforskriftene TEK 97 og TEK 10 med lavenergibygging og passivhus [6, 14]

	TEK 97	TEK 10	Lavenergi -bygning	Passivhus
U-verdi – vegg W/(m²·K)	0,22	0,18	0,16	0,12
U-verdi – tak W/(m²·K)	0,15	0,13	0,12	0,09
U-verdi – gulv W/(m²·K)	0,15	0,15	0,12	0,08
U-verdi – vindu W/(m²·K)	1,60	1,20	1,20	0,80
Luftlekkasjer h⁻¹	4 (bolig) 3 (to-etasje) 1,5 (tre-etasje)	1,5	1,5	0,6
SFP, ventilasjon kW/(m³/s)	-	2,5 (bolig) 2 (yrkesbygg)	≤2,0	≤1,5
Virkningsgrad, varmegjenvinner ventilasjonsanlegg	- (bolig) 60 % (yrkesbygg)	70 %	70 %	80 %

Som tabellen indikerer har kravene til de ulike komponentene blitt ytterligere skjerpet de siste årene, spesielt på vindusfronten. Vinduer i passivhus består typisk av en trelagsisolertrute med to belagte glass, argongass, varmekant, isolert ramme og karm. Dette har ført til at kaldras fra vinduer i passivhus er nærmest eliminert. Kaldras oppstår når nedkjølt luft synker mot gulvet, og dermed oppleves som trekk [15].

U-verdiene i vegg, tak og gulv er også ytterligere redusert. Vanligvis fra 5-20 cm ekstra isolasjon i forhold til et vanlig hus (TEK 10). Reduserte luftlekkasjer reduserer varmetapet gjennom konstruksjonen, samtidig som det er viktig for å oppnå balansert ventilasjon. Varmegjenvinning av avtrekksluft reduserer varmebehovet betraktelig, ettersom friskluft varmer opp den gamle luften som er på vei ut. Samtidig som korte luftføringer med lite trykkfall og energieffektive vifter reduserer spesifikk vifteeffekt (SFP). Mange av disse forbedringene gjør i tillegg at varmen fra personer og teknisk utstyr blir bedre utnyttet til å redusere oppvarmingsbehovet [16].

Figur 3 viser energibruken til de ulike energipostene for et kontorbygg. Figuren er basert på simuleringer i programmet SIMIEN og viser verdier for et termisk tungt kontorbygg med solavskjerming [17]. Figuren er kun ment for å illustrere forskjellen på det årlige energibehovet med de ulike forskriftene, samt også lavenergibygg og passivhus.



Figur 3: Typisk formålsdelt energibruk for kontorbygning for ulike forskrifter og standarder. Simulert for tungt kontorbygg og solavskjerming [18]

Figur 3 viser tydelig at romoppvarmingen er blitt redusert betraktelig ettersom nye forskrifter er blitt tatt i bruk. Dette er på grunn av blant annet bedre isolering og tettere bygg. Legger også merke til at det er et stort hopp fra TEK 10 til lavenergibygg (lågenergi) og passivhus i forhold til TEK 10 og eldre på de øvrige energipostene, utenom varmtvann. Dette skyldes blant annet av innføring av mer energieffektive vifter (lavere SFP), balansert ventilasjon og energieffektivt lys og utstyr som forklart i tabell 6.

2.4 Inneklima i lavenergibygninger og passivhus

Inneklima er et viktig emne angående energieffektive bygninger på grunn av at byggene nå er mye mer lufttette. Thomsen et al. har gjennomført en omfattende litteraturstudie om inneklima i lavenergibygninger og passivhus. Det ble i studiet fokusert på termisk-, atmosfærisk- og akustisk miljø i boliger [19].

I det *termiske miljøet* ble komfort, målt og opplevd temperatur studert. Brukerne opplever økt termisk komfort om vinteren på grunn av varmere overflater på yttervegger, yttertak, gulv og vinduer. Studien viser at det er få timer i året med overoppheting (over 26 °C innetemperatur) om sommeren. Disse relativt få timene oppleves likevel som plagsomme. Samtidig viser også studien at brukerne kan oppleve temperatur innenfor settpunkt (20-26 °C), som ukomfortable. Dette trenger nødvendigvis ikke være relatert til bygget, da dette kan forklares gjennom ulike teorier angående termisk komfort [20]. De viktigste faktorene for et godt inneklima i passivhus om sommeren er effektiv vindusutlufting, solskjerming, helst lite termisk masse

(varmelagrede konstruksjoner/materialer) og et oppvarmingssystem som responderer hurtig og presist ved ulik belastning [21].

I det *atmosfæriske miljøet* ble blant annet luftkvalitet, luftfuktighet, luftskifte og CO₂-konsentrasjonen undersøkt. Det er lavere risiko for at det oppstår kondens og muggvekst på de innvendige flatene. Dette på grunn av varmere innvendige flater. Det balanserte ventilasjonsanlegget fører til økt uttynning av forurensninger og lukt, samt også redusert støv og pollen gjennom filtrering av uteluft. Det rapporteres også om reduserte fuktskader i konstruksjonen på grunn av gjennomgang av vanndamp i luftlekkasjer. Redusert fuktskader fører til redusert husstøvmidd vekst. Målingene viser at CO₂-konsentrasjonen holdes under 1000 ppm i hus med mekanisk balansert ventilasjon. Dette er regnet som akseptabelt nivå [20]. Samtidig viser studier at de økte konstruksjonstykkelene fører til økt sårbarhet når det gjelder uttørking av bygningsmaterialer. Mikrobiologisk vekst kan oppstå i blant annet ventilasjonsanlegget ved feil eller manglende vedlikehold [19].

I det *akustiske miljøet* ble lyd/støy studert. Her viser flere studier at mange brukere blir forstyrret av støy fra ventilasjonsanlegget. Det er i ingen av studiene gjennomført lydmålinger [19].

3 Nullutslippsbygninger - ZEB

I dette kapittelet blir ulike definisjoner kort forklart. Samtidig blir det kort forklart om norske forhold og inneklima. ZEB, det vil si nullenergibygging (Zero Energy Buildings) eller nullutslippsbygg (Zero Emission Buildings) har i dag blitt introdusert i mange land. Likevel er det per i dag fortsatt mangel på felles forståelse og dermed enda ikke blitt enighet om en felles definisjon på ZEB mellom de ulike landene. Det som likevel går igjen er at oppvarmingsbehovet bør dekkes av fornybare energikilder. Eksempler på dette er vindkraft, solenergi og bioenergi.

3.1 ZEB og nZEB definsjoner

Definisjonene bedrer forståelsen på ZEB og hvordan kjente teknologier kan tas i bruk for å oppnå ZEB-status, som for eksempel solenergi. Torcellini et al. definerer blant annet ZEB ut fra følgende to definisjoner [22].

Net Zero Site Energy Building

Dette kan oversettes til norsk som «på stedet netto nullenergibygning», og betyr at bygget skal produsere like mye fornybar energi i løpet av et år som det selv bruker i løpet av et år. På stedet menes her for eksempel med solceller på taket eller på en parkingsplass eller små skala vindmøller i tilknytning til bygget. Felles er at energikilden er direkte koblet til bygningen [22].

Net Zero Source Building

Dette kan oversettes til norsk som «fra kilden netto nullenergibygning, og betyr at bygget skal produsere like mye fornybar energi i løpet av et år som det forbruker. Forskjellen er her at kilden til den fornybare ressursen, kan være tilgjengelig utenfor byggets eiendom, men energien må produseres ved bygget. Videre er det likt som «på stedet» ved at energi er direkte koblet til bygningen. Et sentralt poeng her er at for nullenergi skal oppnås må energiforbruket i bygningen også dekke energien som går med på å frakte energien fra kilden og til den produseres [22].

IEA varmpumpeprogram (Heat Pump Programme, HPP) Annex 40 «Heat Pump Concepts for Nearly Zero Energy Buildings» studerer mulighetene for varmpumpe som hovedkomponent for ZEB. Videre defineres ZEB her som en energieffektivbygning som er koblet til elektrisitetsnettet, og som samtidig balanserer det årlige energiforbruket med en på stedet energikilde og tilførsel forbundet til bygget. Videre defineres både ZEB og nZEB, der ZEB defineres som netto nullenergibygging (net Zero Energy Building), og nZEB som nesten nullenergibygging (Nearly Zero Energy Building). Med netto menes det at det er et balanse konsept mellom energiforbruk til bygningen og egenprodusert energi på stedet [14].

Net zero energy building (ZEB)

En netto nullenergibygning er her definert som en bygning som har primærenergibruk lavere eller lik 0 kWh/m^2 per år. Netto betyr her at det er årlig balanse av primærenergi beregnet basert på levert energi til bygningen og energi eksportert fra bygningen (egenprodusert). Et

netto nullenergibygg er vanligvis definert som et bygg som er koblet til elektrisitetsnettet med veldig høye energiytelser. I tillegg oppnår en ZEB balanse mellom byggets primærenergibruk. Altså at primærenergi inn på elektrisitetsnettet eller andre tilsvarende nett, er lik primærenergien levert fra ZEB tilbake til elektrisitetsnettet. Dette vil si at et ZEB produserer energi og leverer til elektrisitetsnettet når det er muligheter for det og bruker levert energi fra elektrisitetsnettet ellers [14].

Nearly zero energy building (nZEB)

Et nesten netto nullenergibygg (nZEB) har betydningen at primærenergibruken er teknisk og gjennomførbart, men høyere enn 0 kWh/m² per år. Dette oppnås ved en kombinasjon av beste mulig energieffektivitet og fornybare energiteknologier. Energiteknologiene trenger ikke å være optimale kostnadsmessig. Dette er EU målet innen 2020 [14].

3.2 Norske forhold

Som nevnt eksisterer det ikke noe felles definisjon på tvers av landegrensene på hva et ZEB bygg er. Heretter vil det bli fokusert på den norske definisjonen av ZEB.

Fra Marszal et al. blir de ulike nordiske landenes oppfattelse av ZEB studert [23]. Norge får en stor del av elektrisitetsforbruket fra vannkraft, klimaet er kaldt og vått mange steder samt at solinnstrålingen varierer stort med årstidene. På bakgrunn av disse utfordringene med tanke på utvikling av nullutslippsbygninger, startet Norge i 2009 å finansiere forskningscenteret The Research Centre on Zero Emission Buildings (ZEB-senteret). Mer om ZEB-senteret i kapittel 3.3.

I Norge blir ZEB betraktet som nullutslippsbygg og ikke nullenergibygg, det vill si at fokuset er å redusere drivhusgassutslippene. Med nullutslippsbygg menes her nullutslipp gjennom hele livssyklusen til bygget, det vil si alle fasene i byggets levetid (bygging, drift og rivning) [23].

Vannkraft forsyner de fleste norske bygninger med en ren fornybar miks av energi. I noen land oppnår man ZEB status ved å balansere ikke-fornybare energikildene forbrukt i løpet av driftsfasen. Hadde det gjeldt Norge, ville dette dermed bare krevd at en relativ liten del av energien ble balansert. For at et bygg skal nå ZEB-status over hele livssyklusen, må man ta hensyn til utslipp fra materialene brukt og utslipp knyttet til rivning og nedbrytning. En utfordring i denne sammenhengen er hvordan CO₂-utslippene fra elektrisitetsbruken skal regnes inn, ettersom det er så mye vannkraft i Norge. Konklusjonen er her blitt at i det lange løp vil det norske kraftmarkedet bli en del av det europeiske energisystemet. Dermed regnes det med at Norge har samme gjennomsnittsutslipp av CO₂ som i Europa. CO₂-utslippet skal drastisk reduseres frem mot 2050 i trå med EUs veikart. Dette blir også tatt hensyn til i beregningsmodellene [23, 24].

Den norske tilnærmingen til ZEB-status legger stor vekt på energieffektivitet i bygningen. Å forbedre energieffektiviteten i bygget er det meste effektive tiltaket for å redusere utslippet av drivhusgasser i byggesektoren. Energieffektivisering er en del av flere viktige krav som må oppfylles for å omsette energiforbruk fra på stedet energi produksjon [23].

3.3 ZEB-senterets definisjon på ZEB

Visjonen til ZEB-senteret er å eliminere drivhusgassutslippene forårsaket av bygninger. Dette nasjonale forskningscenteret vil plassere Norge i teten når det gjelder forskning, innovasjon og implementering innen området energieffektiverende nullutslippsbygninger.

Hovedmålet med ZEB-senteret er å utvikle konkurransedyktige produkter og løsninger for både eksisterende og nye bygninger, dette gjelder boliger, yrkesbygg og offentlige bygninger, for å oppnå et gjennombrudd for nullutslippsbygninger relatert til produksjon, drift og rivning [25].

ZEB-senteret sitt mål er å utvikle nullutslippsbygninger hvor absolutt alt CO₂-utslipp er tatt med. Det vil si at byggets egen produksjon av energi må oppveie utslippene og energibruken gjennom hele livssyklusen til bygget. Det vil si fra produksjon av byggematerialer, 60 års drift av bygget og til slutt rivningen av bygget [26].

Videre kommer ZEB-senteret med ni kriterier de mener bør vurderes for å oppnå ZEB definisjon [14].

- Ambisjonsnivå
- Beregningsforutsetning
- Systemgrenser
- CO₂-faktorer
- Energikvalitet
- Feil forhold (mismatch) produksjon og behov
- Minimumskrav energieffektivitet
- Krav til inneklime
- Verifisering

De enkelte kriteriene blir ikke videre beskrevet i denne oppgaven, men foreslåtte krav til minimumskrav til energieffektivitet og inneklime nevnes.

3.3.1 Minimumskrav til energieffektivitet

Foreløpig minimumskrav til energieffektivitet for ZEB er passivhusstandard [14]. For enebolig refereres det til NS 3700 og for yrkesbygg NS 3701.

3.3.2 Krav til inneklime

ZEB bygninger stiller også krav til inneklime i bygningen, i tillegg til øvrige energikrav/komponentkrav fra NS 3700 og NS 3701.

Kravene til inneklima er oppsummert i tabell 7.

Tabell 7: *Krav til inneklima for ZEB [14]*

Krav til inneklima	
Maks lufthastighet vinter	15 m/s
Maks dimensjonerende driftstemperatur sommer	26 °C
Min dimensjonerende driftstemperatur vinter	20 °C
Maks CO ₂ -nivå vinter (temperatur under 22°C)	1000 ppm
Min gulvtemperatur	19 °C
Min gjennomsnittlige dagslysfaktor	2 %

3.4 Sammenligning av TEK 10, lavenergibygg, passivhus og ZEB

For å enklere illustrere forskjellen mellom TEK 10, lavenergibygg, passivhus og ZEB (ZEB-senterets definisjon), er sentrale data oppsummert i tabell 8. Tabellen inneholder data for en enebolig på 150 m², dermed er NS 3700 benyttet for lavenergibygg og passivhus.

Tabell 8: Generelle krav til bygningskropp, ventilasjonsanlegg og oppvarming ved TEK 10, lavenergibygg, passivhus og ZEB [14]

Generelle krav	Normalt hus	Lavenergibolig	Passivhus	Nullutslippsbygg (ZEB-senteret)
Bygningskropp – isolering	TEK 10	Strengere enn TEK 10	NS 3700	Bedre enn NS 3700
Bygningskropp – lufttetthet	TEK 10	4 ganger bedre enn TEK 10	8 ganger bedre enn normalt hus	Bedre enn NS 3700
Ventilasjon – virkningsgrad varmegjenvinner	70-80 %	70-80 %	80-90 %	90 %
Oppvarmingseffektbehov	Normalt hus	Lavenergibolig	Passivhus	Nullutslippsbygg (ZEB-senteret)
Romoppvarming	55 W/m ²	38 W/m ²	22 W/m ²	Maks 18 W/m ²
Romoppvarming (bolig 150 m ²)	8,3 kW	5,7 kW	3,3 kW	Maks 2,7 kW
Varmt tappevann (gjennomsnitt)	500 W	500 W	500 W	500 W
Total oppvarmingsbehov (bolig 150 m ²)	8,8 kW	6,2 kW	3,8 kW	Maks 3,2 kW
Årlig oppvarmingsbehov	Normalt hus	Lavenergibolig	Passivhus	Nullutslippsbygg (ZEB-senteret)
Romoppvarming (RO)	80 kWh/m ²	58 kWh/m ²	22 kWh/m ²	18 kWh/m ²
Varmt tappevann oppvarming (VM)	25-35 kWh/m ²	25-35 kWh/m ²	25-35 kWh/m ²	25-35 kWh/m ²
Forhold mellom VM og RO	0,27	0,34	0,58	0,63
Totalt årlig energibehov	110 kWh/m ²	88 kWh/m ²	52 kWh/m ²	48 kWh/m ²

Som det fremgår av tabell 8, bygger ZEB på passivhusstandarden, bare at teknologiene er tatt et steg videre. ZEB utnytter ulike teknologier for å redusere energibehovet mest mulig.

4 Energibruk i bygninger

En av de mest betydningsfulle utfordringene for å forbedre energieffektiviteten i bygninger, er mangel på forståelse av hvilke faktorer som utgjør det totale energiforbruket. De direkte faktorene som påvirker energibruken er klima, bygningskropp og bygningsutstyr.

Energibruken blir også i stor grad påvirket av drift og vedlikehold av bygningen, bruksmønster og oppførsel til brukerne av bygget. I tillegg kommer også krav om inn klima. Ofte er det store avvik mellom prosjektert/simulert energibruk og det virkelige energibruken til bygningen etter at den er blitt tatt i bruk. Også på dette området er det lite kjennskap til hvor avvikene oppstår, og ofte er avvikene størst på området som omhandler brukerne av bygget og deres oppførsel i stedet for selve bygget [27].

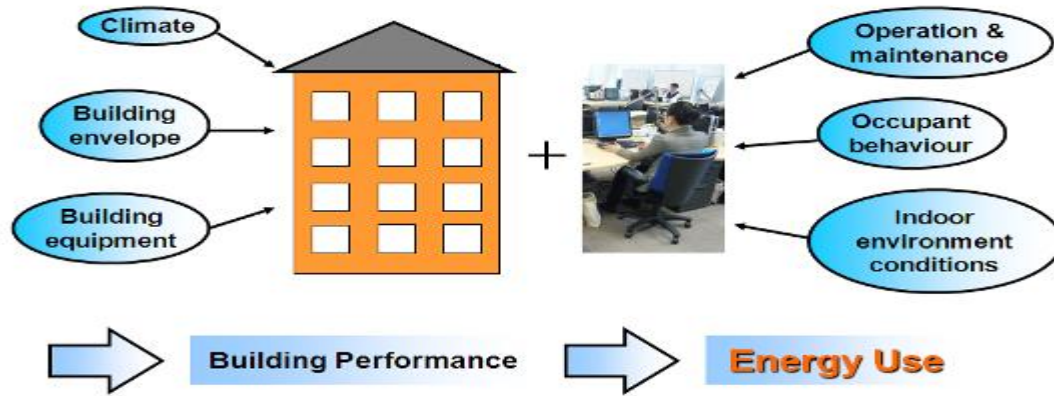
Byggeforskriftene har i de fleste land blitt strengere de siste årene med hensyn på energisparing. Likevel minker ikke den totale energibruken like mye som beregnet, og i noen tilfeller øker forbruket. Selve bygningene og de tekniske installasjonene blir forbedret, men likevel kan bruken av bygningen og aktiviteter i bygningen føre til at energibruken øker. Standarder og byggeforskrifter som introduserer nye krav til energieffektivitet, bruker gjennomsnittsverdier av brukerne og deres aktiviteter, og utelukker ikke-bygnings relaterte problemstillinger. Dermed er ikke alltid gevinsten av sparetiltaket like stort [27].

4.1 Faktorer som påvirker energibruk i bygninger

Det er totalt seks faktorer som direkte påvirker den totale energibruken i bygninger, og disse er [28]

- Klima (utetemperatur, solinnstråling, vindhastighet osv.)
- Bygningsrelaterte karakteristikk (type bygg, areal orientering osv.)
- Drift og vedlikehold
- Tekniske bygningsinstallasjoner og utstyr (romoppvarming/eventuelt kjøling, varmt tappevann osv.)
- Bruksmønster (oppførsel, aktiviteter osv.)
- Krav til inn klima

I tillegg nevner Yu et al. de indirekte sosiale- og økonomiske faktorene, som legger vekt på blant annet energikostnad og utdannelsesnivået til brukerne [28]. De seks innvirkede faktorene er illustrert i figur 4.



Figur 4: De ulike faktorene som påvirker energibruken i bygninger [29]

4.2 Forklaring av faktorer som påvirker energibruk i bygninger

I dette kapittelet blir de seks ulike faktorene kort forklart, før kapittelet avsluttes med at romoppvarming blir illustrert i et flytskjema.

4.2.1 Klima

Energibruken deles gjerne opp i to hovedgrupper, en temperaturavhengig og en temperaturuavhengig. Der den temperaturavhengige er avhengig av klima, altså utetemperatur, solinnstråling, vindhastighet. Det er imidlertid viktig å velge riktig klima når man skal prosjektere/simulere bygget. Dette gjøres ved å hente klimadata fra det aktuelle stedet bygget skal oppføres, eventuelt bruke klimadata fra et sted med likt klima. Den temperaturuavhengige-delen dekker elektrisk utstyr, belysning og varmt tappevann, det vil si grunnlasten av energiforbruket [30].

4.2.2 Bygningsrelaterte karakteristikk

Strengere krav i bygningsforskriftene har gjort at dagens bygg er bedre isolert enn eldre bygg, altså lavere U-verdi og dermed også mindre varmetap til omgivelsene. Dette gjelder også tak, gulv og vinduer. I tillegg er nyere bygg mer lufttette, som igjen gir mindre varmetap. Dette ble oppsummert i tabell 6. Et paradoks er at ofte har moderne bygg høyere energibruk enn eldre bygg [27]. En årsak her kan være at dagens bygg har større andel glassfasade enn eldre bygg. Andre årsaker kan imidlertid være økt bruk av ventilasjon, kjøling og elektrisk utstyr. Vinduer har mye høyere U-verdi enn øvrig fasade. I TEK 10 er for eksempel U-verdikravet for vinduer $1,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, mens kravet for yttervegg er $0,18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Høyere vindusareal fører også til økt behov til kjøling om sommeren, og økt behov for oppvarming om vinteren.

4.2.3 Drift og vedlikehold

De fleste yrkesbygg kan selv med enkle investeringer redusere energiforbruket betraktelig. Ofte fra 20-30 % selv ved små investeringer [31]. Små investeringer er innføring av energieffektiv belysning og generelt energieffektivt teknisk utstyr. Mer komplekse investeringer er å innføre behovsstyrt ventilasjon med variabel luftmengde (variable air volume, VAV) i stedet for konstant luftmengde ventilasjon (constant air volume, CAV). Med VAV styres luftmengdene etter behovet i sonene, gjerne ved hjelp av CO₂-og temperatursensorer. Dette fører til redusert energiforbruk ettersom luftmengdene reduseres ved lav belastning [30].

Videre gir Energioppfølgingsystem og SD-anlegg en god oversikt over driften av bygget. Energioppfølgingsystemet ved at man får oversikt over energiforbruket ved de ulike energimålerne. Dermed er det mulig å måle de ulike energipostene som oppvarming, teknisk utstyr osv. Det er også mulig å måle energiforbruket til ulike rom ved hjelp av energimålerne [32].

Et SD-anlegg er en installasjon i bygget som har til funksjon å overvåke, styre, regulere, drifte, vedlikeholde og optimalisere driften av de tekniske installasjonen i bygget [4]. Dette gir driftspersonalet mulighet til å overvåke forbruket og samtidig regulerer de ulike tekniske systemene.

4.2.4 Tekniske installasjoner

Med tekniske installasjoner i bygg menes utstyr som er fast integrert i bygningen, og som samtidig har som formål å opprettholde et tilfredsstillende inneklima og yte teknisk service i forbindelse med bruken av bygget. Sanitær-, oppvarmings- og ventilasjonsanlegg er alle eksempler på tekniske installasjoner [30].

4.2.5 Bruksmønstre

Klein et al. definerer bruksmønstre som handlinger og avgjørelser tatt av brukerne av bygget som har innvirkning på energibruken til bygget. Dette inkluderer handlinger utført på objekter som er under brukernes kontroll, for eksempel bruk av datamaskiner, åpning og lukking av dører og vinduer. Videre inkluderer dette også handlinger brukerne utfører på seg selv, for eksempel bytting av klær eller rom. Når man tar hensyn til bruksmønstre fører dette til at optimalisering av energibruk og komfort krav er et svært komplekst problem [33].

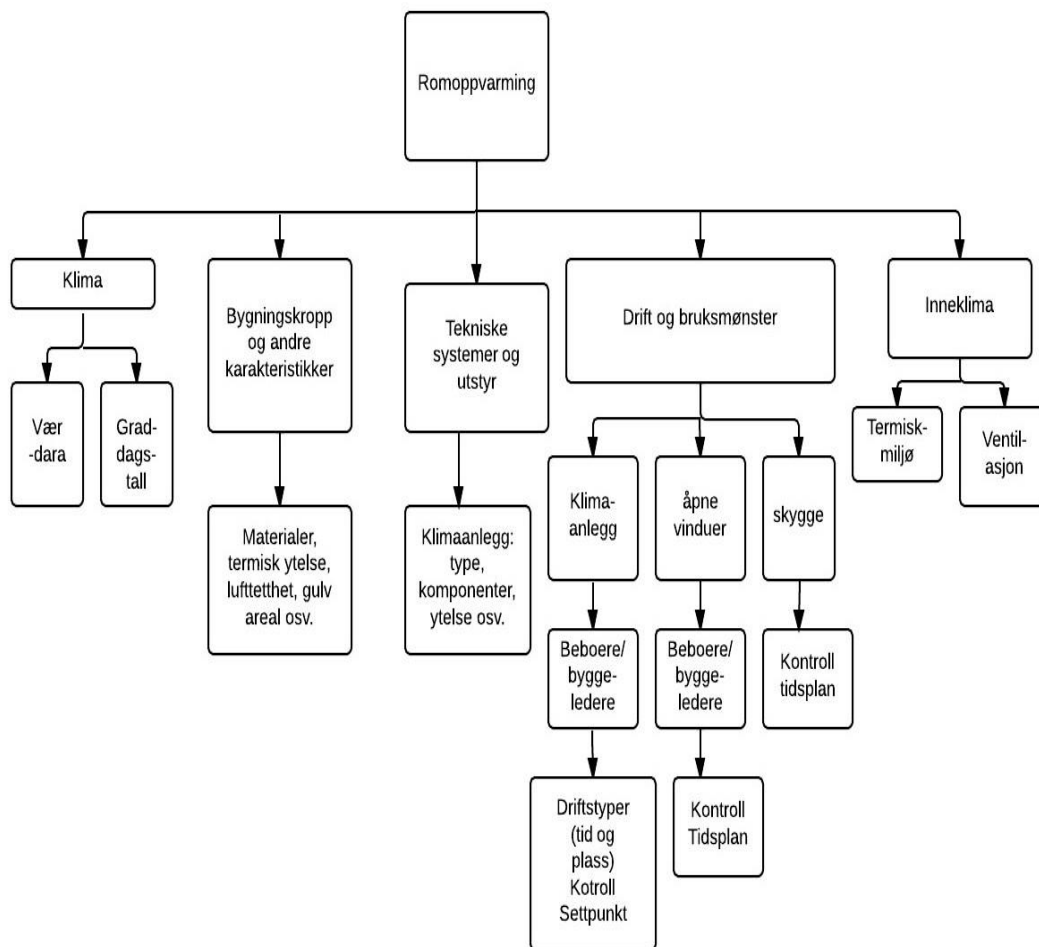
4.2.6 Inneklima

Vi tilbringer over 90 % av livet innendørs i stadig mer forurenset innemiljø. Inneklima består av følgende punkter:

- Termisk miljø (temperatur, lufthastighet, luftfuktighet)
- Atmosfærisk miljø (luftforurensinger, opplevd luftkvalitet)
- Akustisk miljø (lydtrykk, frekvens, etterklangstid)
- Aktinisk miljø (lys, stråling, feltfenomener)
- Mekanisk miljø (geometri, møbler osv.) [20]

4.2.7 Romoppvarming eksempel

I figur 5 viser et flytskjema over romoppvarming for et bygg. Flytskjema illustrerer hovedfaktorene (her er bruksmønster slått sammen med drift) som påvirker energibruken til romoppvarmingen av et bygg. Figuren er et godt eksempel på å illustrere hvor komplekst oppvarming av en bygningen kan være når man går i dybden og studerer de ulike parameterne som virker inn.



Figur 5: Flytskjema som viser faktorer som påvirker romoppvarming [34]

5 Metode

I denne masteroppgaven undersøkes energiytelser og inn klima til et kontorbygg på ca. 3 000 m² ved kysten i Mandal. Da bygget ble prosjektert og bygd var enda ikke NS 3701 kommet, dermed ble prosjektrapport 42 lagt til grunn i prosjekteringen. Energisimulering av bygget vil bli gjort i simuleringsprogrammet EnergyPlus, mens energimålingene leses av i energioppfølgingsystemet Energologi, som er installert i bygget. I tillegg vil også SD-anlegget benyttes til å dokumentere luftmengder og temperaturer.

5.1 Simuleringsprogram - EnergyPlus

EnergyPlus er et simuleringsprogram for energianalyse og termisk simulering, og er utviklet av US Department of Energy [35]. I programmet beskrives bygningen svært detaljert. Dette er alt fra bygningens konstruksjon, det vil si materialer, fasadeareal osv., alle mekaniske systemene bygningen inneholder (oppvarmingsystemer, ventilasjonssystemer osv.) til bruksmønster og driftstider. Basert på denne beskrivelsen, beregner EnergyPlus blant annet oppvarmings- og kjølebehov for å tilfredsstille termiske krav som er satt, for eksempel at sonen skal holde 21 °C. EnergyPlus modellerer også belysning, teknisk utstyr, ventilasjonskrav, varmtvannsbehov og andre energiposter. Programmet er så detaljert at man kan lese av data for de ulike komponentene. For eksempel temperaturen på isolasjon på yttervegg med timesverdier gjennom hele året.

EnergyPlus er et tekst basert program uten noen form for grafisk grensesnitt, det vil si at programmet leser inndata og skriver utdata som tekstfiler. Det gjør at programmet virker lite brukervennlig i starten. EnergyPlus støtter imidlertid mange tredjepartsprogrammer. Simuleringsmodellen i denne oppgaven er laget i SketchUp sammen med Legacy OpenStudio Plug-in for SketchUp. SketchUp er et 3D tegneprogram og med OpenStudio legges inndataen i EnergyPlus inn i 3D-modellen [35]. De tekstfilbaserte resultatene ble importert til Microsoft Excel, for videre bearbeidelse.

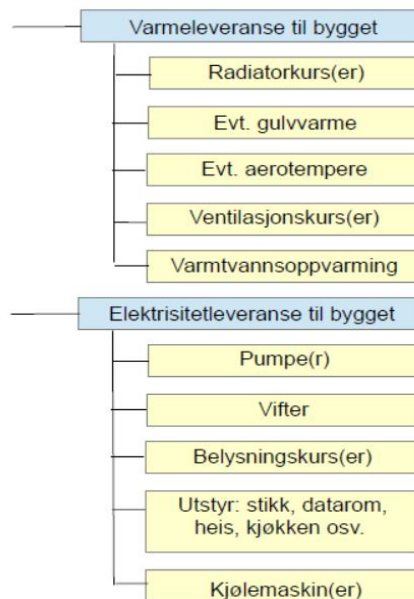
5.2 SD-anlegg og energioppfølgingsystem

Et SD-anlegg er en installasjon i bygget som har til funksjon å overvåke, styre, regulere, drifte, vedlikeholde og optimalisere driften av de tekniske installasjonene i bygget [4]. Dette gjelder de tekniske installasjonene i bygget som for eksempel varme-, kjøle-, lys- og ventilasjonssystem.

Energioppfølgingsystem viser en systematisk og oversiktlig kontroll over energibruken til de ulike strømmålerne i bygget. Dette systemet gir dermed brukeren en enkel måte å følge med og kontrollere energiforbruket i bygget. Analysemetodene av et energioppfølgingsystem er mange. En kan føre systematisk oversikt over forbruket, og dermed blir det enklere å avdekke uregelmessigheter og dermed utbedre eventuelle feil i en tidlig fase [32].

I et nytt kontorbygg bygd etter passivhusstandard, er det ønskelig at målestrukturen til energipostene til bygget har samme inndeling som det beregnede energibudsjettet definert i NS 3031. Det vil si egne energiposter for *romoppvarming*, *ventilasjonsvarme*, *varmtvann*, *vifter*, *pumper*, *belysning*, *teknisk utstyr* og *eventuell kjøling* [12]. Store energiposter som ikke

er definert i NS 3031, eksempel serverrom, bør også instrumenters [7]. Figur 6 viser anbefalt målestruktur for energimåling i nye yrkesbygg. Hovedmåler vises med blå bakgrunn, mens undermålere vises med gul bakgrunn.



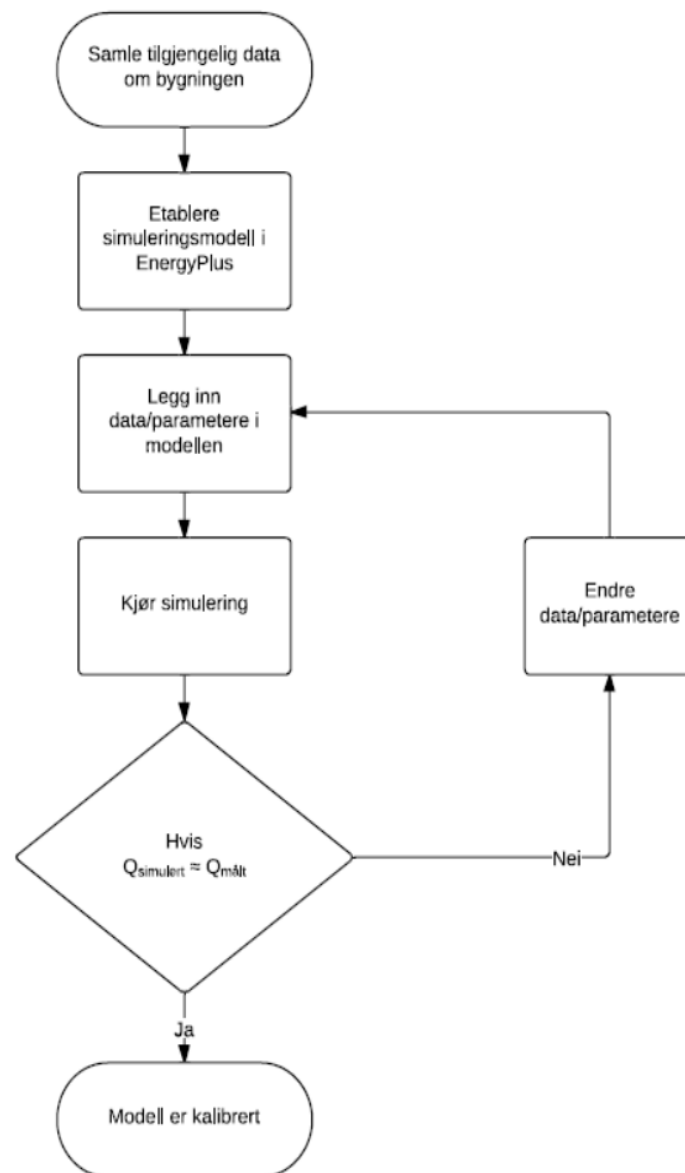
Figur 6: Anbefalt målestruktur for energimåling i nye yrkesbygg [7]

5.3 Modellkalibrering

Simulering av bygninger regnes per dags dato som den beste måten for å beregne og analysere energiytelser i bygninger. Likevel er det ofte store avvik mellom simulerte resultater og reelle energimålinger fra samme bygg. En metode for å minimere avviket mellom simulerte resultater og målte verdier, er å kalibrere simuleringsmodellen i forhold til virkelige målinger [36].

Simuleringsmodellen i denne oppgaven ble først laget på grunnlag av tilgjengelig bygningsdata, tidligere simuleringsdata og standarder. Deretter ble det kjørt en årssimulering i EnergyPlus. Resultatene for energibruk til oppvarming og elforbruk fra simuleringen ble så sammenlignet med tilsvarende målinger fra energioppfølgingssystemet Energologi. Etter sammenligningen starter kalibreringsprosessen. Kalibreringen ble utført ved å endre på konstruksjonsmessige-, utstys- og driftstidparametere. Etter endring av en eller flere parameter(e) ble det kjørt en ny årssimulering for å undersøke effekten av endringene. Dette ble gjentatt helt til resultatene fra simuleringen var på et tilfredsstillende nivå i forhold til de målte verdiene.

Kalibreringsprosessen er skissert i flytskjema i figur 7.



Figur 7: Flytskjema over modellkalibreringen

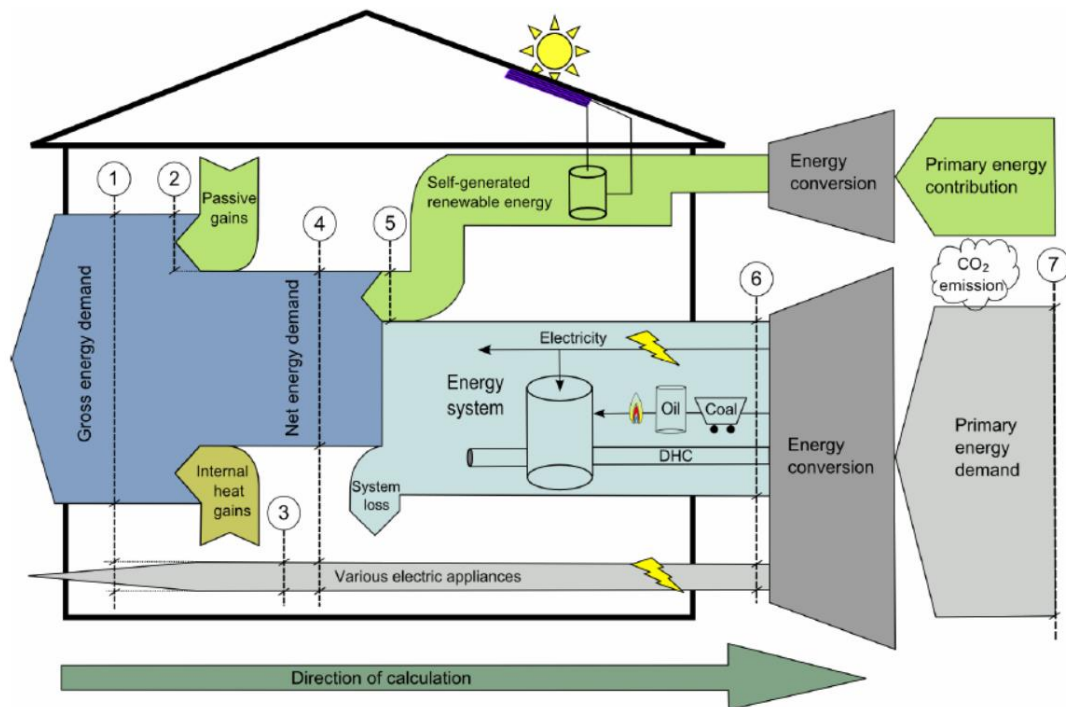
Flytskjema viser kalibreringsprosessen, der de første stegene handler om å samle nok data til å etablere modellen i EnergyPlus. Videre utvides simuleringsmodellen ved å legge inn alle parametere slik at årssimulering kan kjøres. Hvis resultatene fra simuleringen avviker fra de målte verdiene, endres parametere i modellen, og årssimulering blir kjørt på nytt. Dette utføres til modellen er tilstrekkelig kalibrert. Modellkalibreringen utføres som et parameterstudium.

Bygningen er mer beskrevet i kapittel 6. Oppbyggingen av simuleringsmodellen er mer beskrevet i kapittel 7.

5.4 Energiytelser

Energiytelser er et mål på hvor effektiv energien produseres, distribueres, lagres, omformes og brukes. Dette kan også omfatte miljøbelastninger og kostnader [12]. Når man skal vurdere energiytelser i bygninger, er det nødvendig å være klar over hvilke faktorer og resultater man skal ta hensyn til. Samtidig er det viktig å få en oversikt over de ulike begrepene og hvordan de henger sammen.

Figur 8 viser en bygningskropp og tilhørende systemgrenser for de ulike begrepene angående energibruk i bygninger.



Figur 8: Systemgrenser for energiberegninger [37]

Ved å lese figuren fra venstre mot høyre leser man hvordan energiberegningen skal utføres, det vil si følge pilen (direction of calculation). Energiberegningene starter med varmetap til bygningskroppen, og utvides siden med passive tilskudd og interne varmetilskudd, energisystemer, egen produsert fornybar energi, energikonvertering, energitap og ender til slutt med byggets primærenergibehov. Det vil si at jo lenger ut til høyre man kommer i figuren, desto flere faktorer må man ta hensyn til for å komme frem til et resultat.

TEK 10 stiller krav til netto energibehov (punkt nr. 4), mens passivhustandarden NS 3701 oppgir krav til maksimalt netto oppvarmings- og kjølebehov, samt krav om varmetapstall. NS 3031 er standarden som brukes for beregning av netto energibehov.

5.5 Klimakorrigering av energibruk

Som nevnt i kapittel 4.2.1, er oppvarmingsbehovet til et bygg avhengig av klima. I denne oppgaven blir energibruken klimakorrigert etter *graddagsmetoden*.

5.5.1 Graddager

Prinsippet med graddagsmetoden er at utetemperatur lavere enn en gitt basistemperatur, medfører behov for oppvarming. I Norden er basistemperaturen ved graddagskorrigering ofte satt til 17 °C. Bakgrunnen for denne temperaturen er at når varmetilskudd fra interne tilskudd (PCer, belysning, personer osv.) er inkludert, vil ønsket innnetemperatur oppnås.

Graddagstallet (GDT) for et døgn er definert som differansen mellom basistemperatur og døgnmiddeltemperaturen for den aktuelle dagen, som vist i likning (1) [38].

$$GDT \text{ (for et døgn)} = \text{Basistemperatur} - \text{Døgnmiddeltemperatur} \quad (1)$$

Graddagstallet for et år er gitt av summen for alle årets døgn. Døgnmiddeltemperatur høyere enn 17 °C medfører at GDT for den aktuelle dagen er 0, det vil si ikke behov for oppvarming [38].

5.5.2 Normalårskorrigering

Ved normalkorrigering blir det beregnet hva dagens energibruk ville vært i et normalår, altså et år med normale værforhold. Ved bruk av graddagsmetoden er det kun den temperaturavhengige delen av energibruken som korrigeres. Den vanligste formelen for graddagskorrigering er gitt ved likning (2) [38].

$$E_{\text{korr}} = E_{\text{målt}} \left[\left(k \cdot \frac{GDT_{\text{normalår}}}{GDT_{\text{målt år}}} \right) + (1 - k) \right] \quad (2)$$

Der

E_{korr}	er temperaturkorrigert energibruk
$E_{\text{målt}}$	er målt energibruk i det aktuelle året
k	er temperaturavhengig energibruksandel av målt energibruk
$GDT_{\text{normalår}}$	er graddagstall i normalår
$GDT_{\text{målt år}}$	er graddagstall i det aktuelle året

Denne formelen blir benyttet av blant annet Enova og NVE [38].

En fordel ved denne metoden er at den er enkel å bruke. Nødvendig informasjon som graddagstall eller døgnmiddeltemperatur er enkelt å skaffe. Metoden kan brukes på alle bygg, uavhengig av målestruktur og tilgang til bygningsinformasjon. Utfordring ved denne metoden er at det er en årsstasjonær beregning som kun tar hensyn til døgnmiddeltemperatur. Det vil si at effekter av sol- og vindvariasjoner, som kan påvirke energibruken, ikke tas hensyn til. I tillegg inngår sommermånedene i beregningen av graddagstallet selv om det ikke er oppvarmingsbehov da. Metoden regnes som unøyaktig for energieffektive bygg der varmebehovet er redusert. Tilslutt nevnes det at basistemperaturen på 17 °C er unøyaktig for

mange bygg og at feil i temperaturavhengigandel i bygget fører til feil graddagskorrigert forbruk [7].

5.6 Inneklima

Inneklima verifiseres i EnergyPlus med Fanger sin komfortmodell og adaptiv komfortmodell basert på europeisk standard CEN 152521. CEN 15251 er heretter referert som NS 15251, da komfortmodellen er den samme i begge standardene. De to ulike metodene blir forklart i kapittel 5.6.1 og 5.6.2. Termisk komfort er definert som [39]:

«Termisk komfort er en sinnstilstand der vi uttrykker full tilfredshet med de termiske omgivelsene.»

NS 15251 definerer 4 kategorier som gir en beskrivelse av anvendelsesmulighetene til rommet.

Tabell 9: Beskrivelse av anvendelsesmuligheter for de ulike kategoriene fra NS 15251 [40]

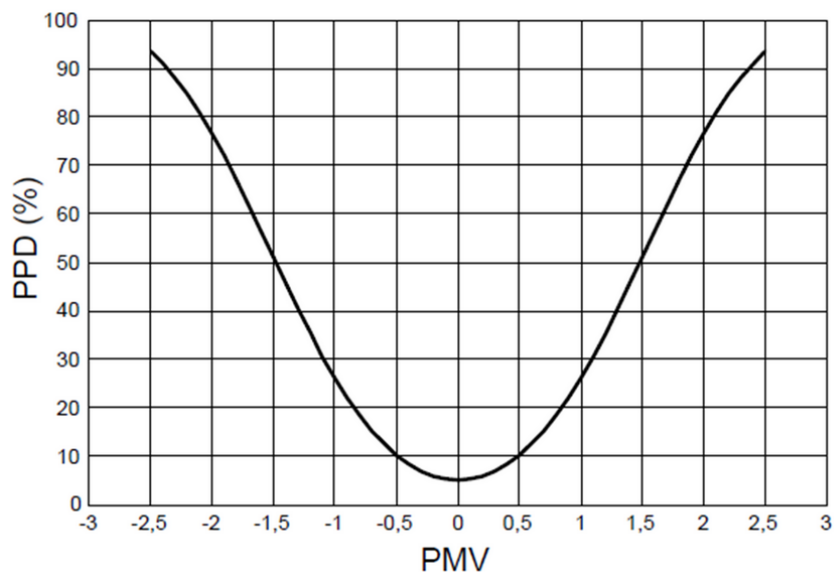
Kategori	Forklaring
I	Høyt forventningsnivå. Anbefalt i rom der svært sensitive og sårbare personer med spesielle behov oppholder seg.
II	Normalt forventningsnivå. Bør brukes i nye og rehabiliterte bygninger.
III	Akseptabelt, moderat forventningsnivå. Kan brukes i eksisterende bygninger
IV	Verdier utenfor kriteriene i kategori I-III. Bør godtas kun en begrenset tid av året

5.6.1 Fanger komfortmodell

Fanger sin komfortmodell baserer seg på at omgivelsene gir termisk nøytralitet for kroppen som helhet. Komfort i denne sammenhengen innebærer at personen ønsker verken høyere eller lavere omgivelsestemperatur. Dette uttrykkes med PMV (Predicted Mean Vote) og PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), som uttrykker et kvantifisert mål på kroppens tilstand. PMV-skalaen er bygd opp etter en psykofysisk 7-punkt skala for å angi hvordan personen føler seg i et termisk komfort perspektiv [39].

+3	Hett
+2	Varmt
+1	Lett varm
0	Nøytral
-1	Lett kjølig
-2	Kjølig
-3	Kaldt

Ut i fra forsøk med over 1300 personer har professor P.O. Fanger utviklet en matematisk sammenheng mellom romklima- og personparametere. Sammenhengen mellom PMV og PPD er skissert grafisk i figur 9.



Figur 9: Sammenheng mellom PMV og PPD [41]

PPD er her et kvantitativt anslag på hvor mange prosent av brukere som vil være misfornøyde med de termiske omgivelsene. Både PMV og PPD baserer seg på en times middelværdier, det vil si at blant annet aktivitetsnivået midles over en time. Sammenhengen matematisk mellom PMV og PPD er gitt av likning (3):

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad (\%) \quad (3)$$

En PMV-verdi på 0 betyr at personen verken ønsker omgivelsene varmere eller kaldere, altså termisk nøytralitet. Dette tilsvarer en PPD-verdi på 5 %, og betyr dermed at vi maksimalt kan oppnå 95 % tilfredshet av alle brukerne i rommet [30].

Tabell 10 viser anbefalte verdier for PMV og PPD for bygninger med mekanisk oppvarming og kjøling.

Tabell 10: Eksempel på kategorier for dimensjonering av bygninger med mekanisk oppvarming og kjøling fra NS 15251 [40]

Kategori	Termisk tilstand for bygningen	
	PPD %	PMV
I	< 6	-0,2 < PMV < +0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < +0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < +0,7
IV	> 15	PMV < -0,7 eller +0,7 < PMV

5.6.2 Adaptiv komfortmodell basert på NS 15251.

Komfortmodellen tar utgangspunkt i den operative temperaturen i rommet basert på en kontinuerlig middelværdi av utetemperaturen, Θ_{mm} . Den kontinuerlige middelværdien av utetemperaturen tar hensyn til utetemperaturen den siste uka. Videre er det forutsatt i modellen at det ikke er installert mekanisk kjøling, men at de termiske forholdene hovedsakelig reguleres av at brukerne åpner eller lukker vinduene. Mekanisk ventilasjon med ukondisjonert luft om sommeren kan brukes. Metoden gjelder for stillesittende arbeid, tilsvarende fra 1 til 1,3 met, og brukeren kan regulere bekledding etter behov.

Den operative temperaturen i rommet for de ulike kategoriene er definert som:

Kategori I: 90 % aksepterer forholdene

Kategori II: 80 % aksepterer forholdene

Kategori III: 65 % aksepterer forholdene

Kategori IV: ≥ 65 % aksepterer forholdene

Den operative temperaturen er gitt matematisk ved likning (4) og (5)

Øvre grense:

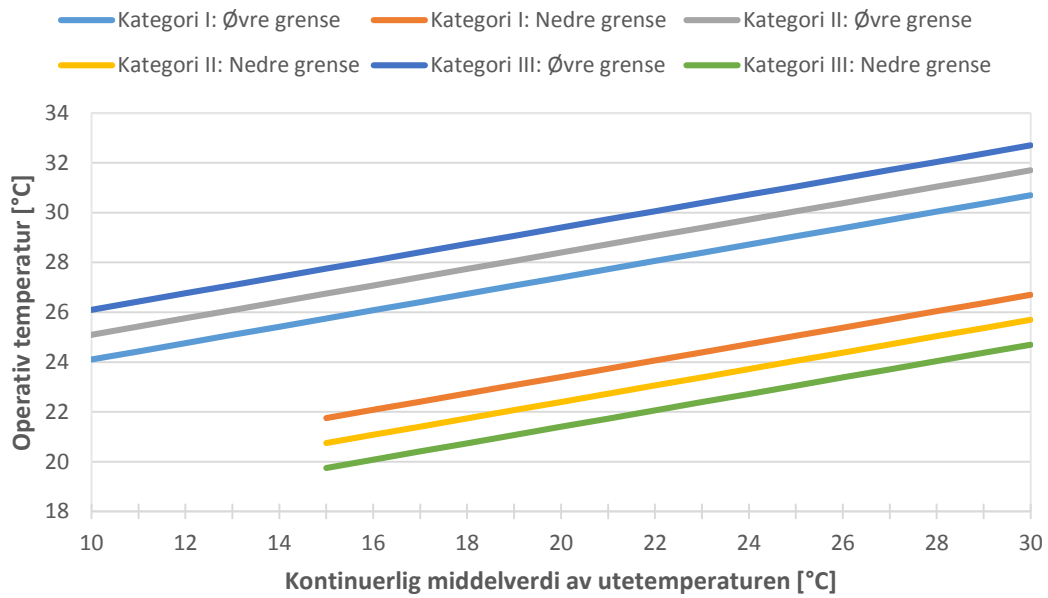
$$\Theta_{imax} = 0,33 \cdot \Theta_{mm} + 18,8 + n \quad (4)$$

Nedre grense:

$$\Theta_{imin} = 0,33 \cdot \Theta_{mm} + 18,8 - n \quad (5)$$

Der $n = 2,3,4$ for henholdsvis kategori I, II og III. For øvre grenser gjelder $10 \text{ °C} < \Theta_{mm} < 30 \text{ °C}$ og $15 \text{ °C} < \Theta_{mm} < 30 \text{ °C}$ for nedre grense. Denne modellen gjelder dermed ved sommerforhold.

De ulike kategoriene er skissert grafisk i figur 10.



Figur 10: Akseptable sommertemperaturer innendørs for bygninger uten mekanisk kjøling

Figuren viser akseptable sommertemperaturer innendørs for bygninger uten mekanisk kjøling [40, 42].

6 Kontorbygget Havutsikt

I denne oppgaven er kontorbygningen Havutsikt studert. Bygningen ligger ved kysten i Mandal, 35 km sør-vest for Kristiansand, og stod ferdig i 2012. Generell info om bygget, byggherre, leietakere, kontaktinfo osv. finnes på nettsiden www.havutsikt.no.

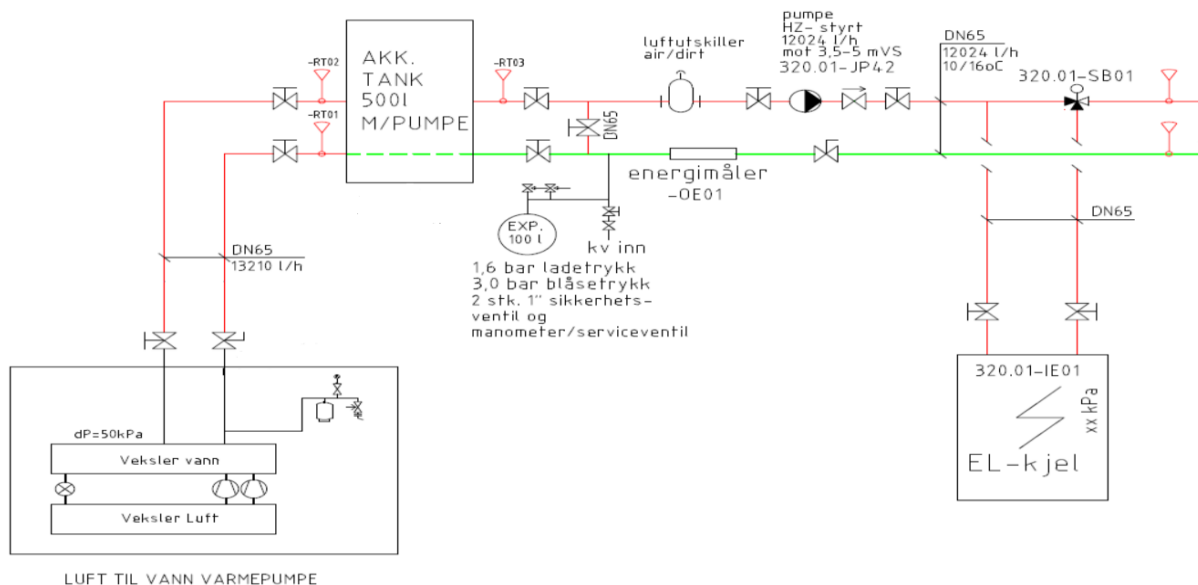


Figur 11: Kontorbygget Havutsikt [43]

I bygningen er det installert både SD-anlegg og energioppfølgingsystem. Energioppfølgingsystemet som er brukt er utviklet av Caverion og heter Energologi [44]. Bruksareal er på 3 265 m².

6.1 Oppvarmingssystem i Havutsikt

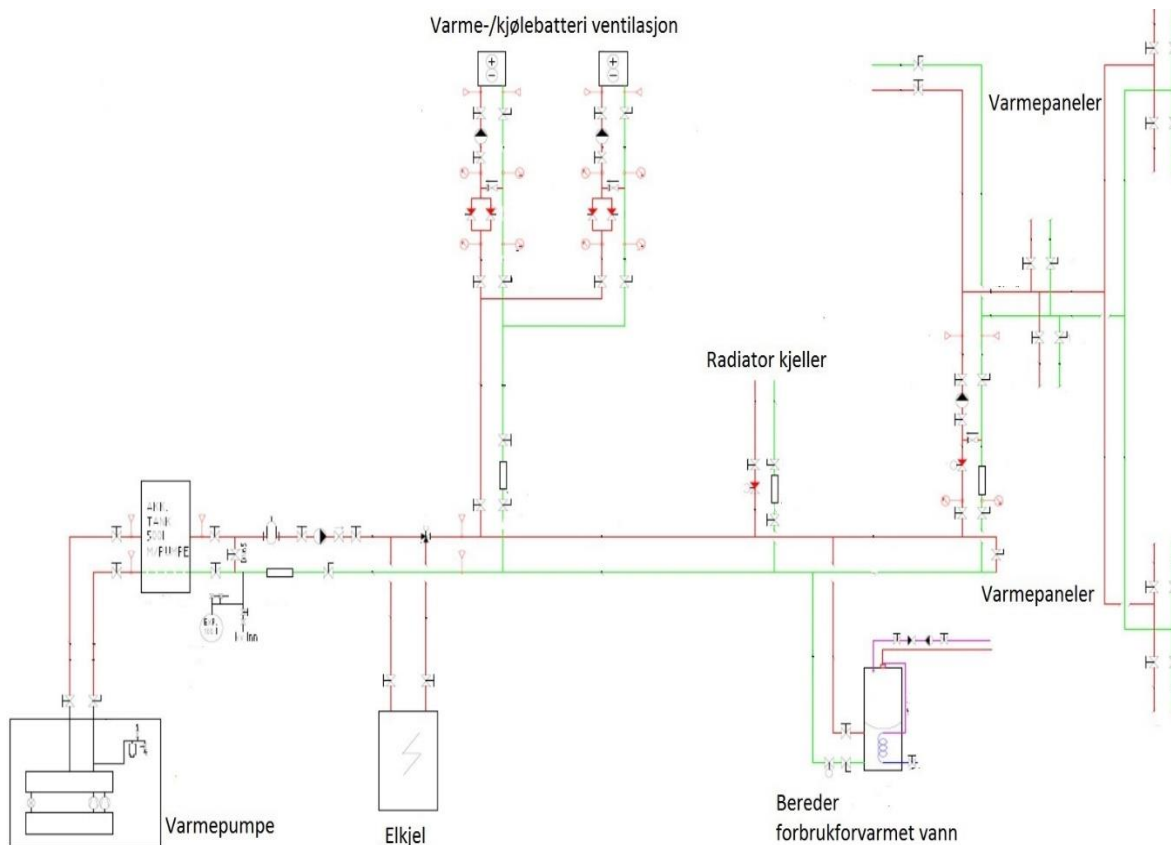
Energiforsyningen til bygget består av en luft til vann varmepumpe og en el-kjel som spisslast. En forenklet skisse av oppvarmingssystemet som viser sammenkoblingen av varmepumpa og el-kjelen er vist i figur 12.



Figur 12: Systemskisse av varmepumpe og el-kjel til kontorbygget

Varmepumpa er av typen luft til vann og har en varmeeffekt fra kondensatoren på 65 kW. Tilført effekt (kompressoreffekt) er på 25,1 kW. Ved 100 % dellast varme er COP til varmepumpa oppgitt til å være 3,15. El-kjelen har en installert effekt på 96 kW. Teknisk data om varmepumpe og el-kjel finnes som vedlegg 3 og 4.

I figur 13 er en grov oversikt over hele oppvarmingssystemet.



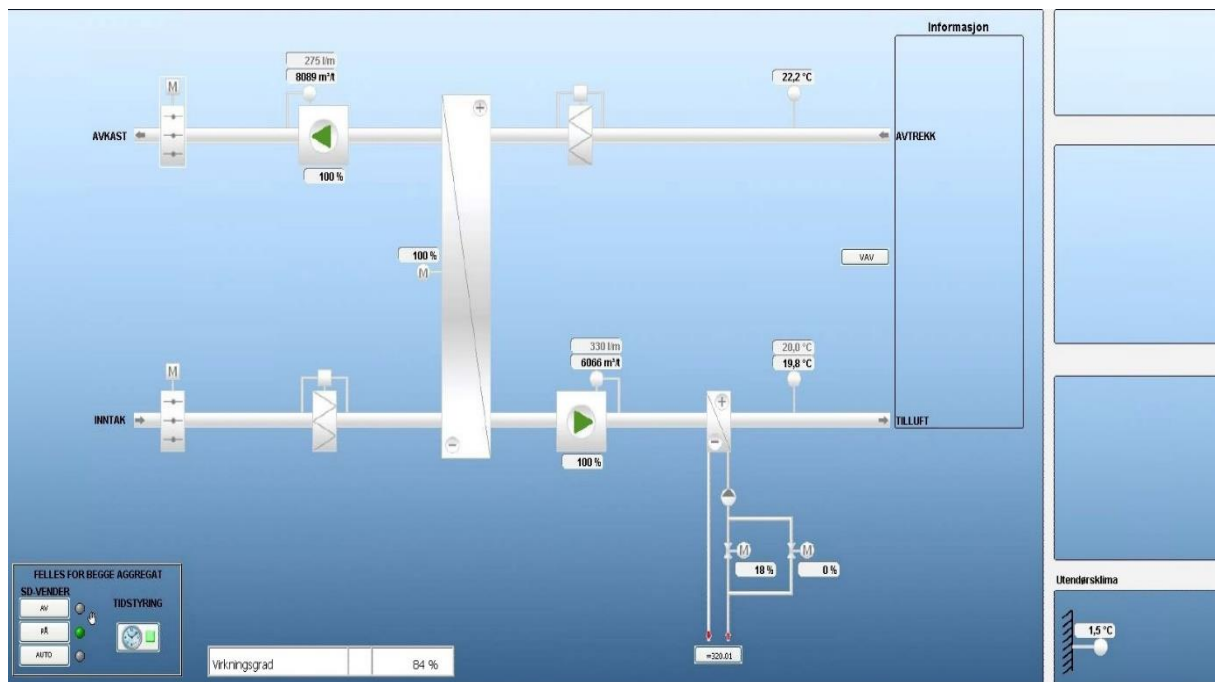
Figur 13: Systemskjema for oppvarmingssystemet til kontorbygget

Figur 13 viser hvordan varmepumpa og el-kjelen, det vil si energiforsyningene, er koblet til varme-/kjølebatteriet i ventilasjonen, radiatorer til kjelleren, bereder for forbruksforvarmet vann og varmepanelene (Caverion Klimatak), det vil si forbrukssiden.

Vannforsyningssystemet i bygget er et lavtemperaturanlegg, det vil si at det vannbårne systemet leverer vann med temperaturer typisk rundt 40-45 °C. Rød ledning er turledning, og grønn er returledning. Figuren viser at både radiator kjeller og varmtvannsberederen er koblet til det vannbårne systemet. Radiator kjeller og bereder for forbruksforvarmet vann er derimot ikke studert videre i denne oppgaven, ettersom de ikke er inkludert i energioppfølgingssystemet Energiologi.

6.2 Ventilasjonssystem i Havutsikt

Havutsikt ventilert av to ventilasjonsaggregater med variabel luftmengde, VAV, med en prosjektert luftmengdekapasitet på 24 290 m³/h til sammen for begge aggregatene. Vedlegg 2 tilsier at 75 % samtidighet av ventilasjonssystemet tilsvarer 18 200 m³/h. Dette antas å være normal drift ved drift av hele bygningen. Begge aggregatene er utstyrt med roterende varmegjenvinner med virkningsgrad på ca. 83 % samt kombinert varme-/kjølebatteri.

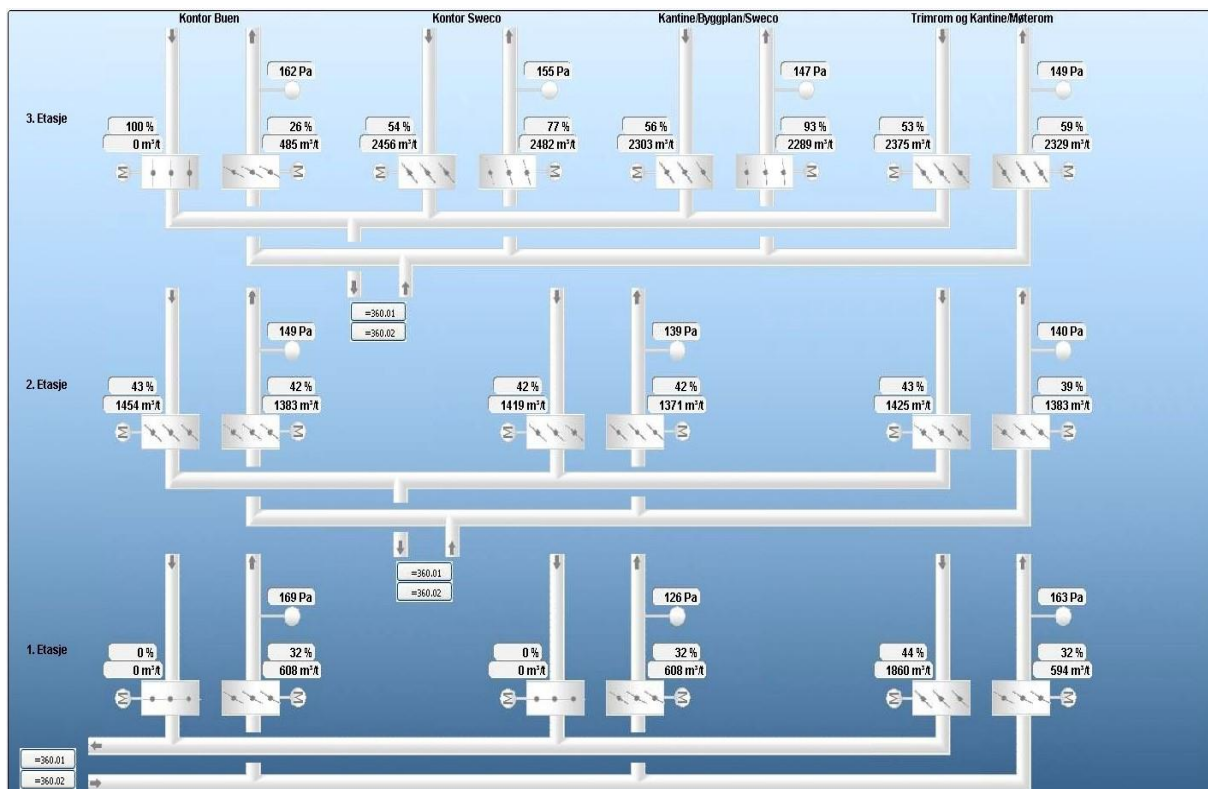


Figur 14: Systemskjema for ett av to ventilasjonsaggregater til kontorbygget

Figur 14 viser et skjermbilde fra SD-anlegget av ventilasjonsaggregat 36.01. Uteluft tilføres inn i aggregatet via et grovrister for å skille ut løv og andre gjenstander. Deretter går luften gjennom et filter. Dette for å skille ut øvrige forurensninger i lufta. Videre passerer luften gjennom den roterende varmegjenvinneren og varmeveksles med avkastlufta dersom det er oppvarmingsbehov av tillufta. Dette for å redusere energibruken til varmebatteriet. Videre varmes/kjøles lufta avhengig av om det er oppvarmings-/kjølebehov av tillufta i varme-/kjølebatteriet. Nå sendes lufta ut i kanalnettet og til de ulike sonene/rommene i bygget som ventileres. I selve rommet som ventileres vil luftmengden bli regulert av et VAV-spjeld og

deretter bli fordelt i rommet ved hjelp av Caverion KlimaTak. Avtrekk av luft fungerer ved at avtrekksluften samles opp av avtrekkskanalene og føres ut av bygningen ved hjelp av avtrekksviften. Dersom det er oppvarmingsbehov av tillufta vil overskuddsvarme fra avtrekket bli tilført tillufta via den roterende varmegjenvinneren.

Figur 15 viser en oversikt over det behovsstyrte ventilasjonssystemet i bygget. Figuren er et skjermbilde fra SD-anlegget tatt klokka 10:08 onsdag 6. november 2013. Dermed viser figuren de ulike luftmengdene til de ulike sonene et gitt tidspunkt. Som figuren indikerer består 1. og 2. etasje av 3 ulike soner, mens 3. etasje består av 4 soner (Kontor Buen, kontor Sweco, Kantine/Byggplan/Sweco og Trimrom og Kantine/Møterom). Prosjekterte verdier for det behovsstyrte ventilasjonssystemet finnes som vedlegg 2.



Figur 15: Oversikt over det behovsstyrte ventilasjonsanlegget til kontorbygget

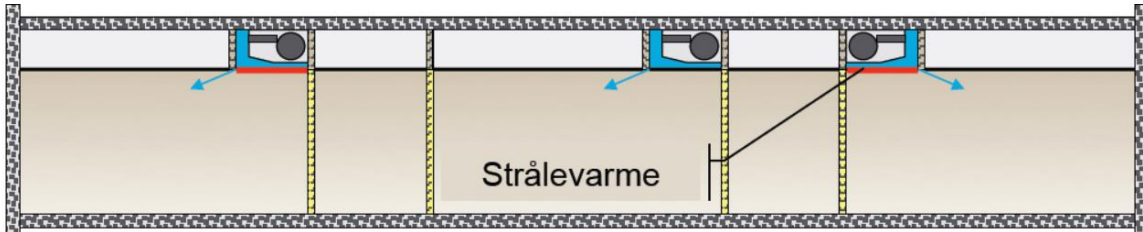
Figur 15 viser at de ulike sonene i 1. og 2. etasje mangler navn. Luftmengdene i denne oppgaven er studert totalt for hele bygget og totalt for hver enkelt etasje.

6.3 Klimatak med takvarme i Havutsikt

Klimaanlegget til bygget er basert på Caverion sitt KlimaTak med innebygget takvarme. KlimaTak er et trekkfritt og lydisolert anlegg for ventilasjon, oppvarming og kjøling uten bruk av isvann. Klimatak er montert i himlingen, derav navnet. KlimaTak fungerer også som føringsvei for øvrige tekniske installasjoner som elektro, data, tele og sentralstøvsuger [45]. Dermed sørger KlimaTak for ventilering av bygget, samtidig som takvarmen/varmepanelene sørger for oppvarming når det er oppvarmingsbehov.

Takvarmepanelene er basert på strålevarme. Varmepanelene kan plasseres fritt i rommet, enten tak eller vegg. Paneler på 1200x1600 mm avgir ca. 200-250 W ved vanntemperatur mellom 40-55 °C [46].

Skisse av KlimaTak sin varmeløsning er gitt i figur 16.



Figur 16: Skisse av varmepaneler integrert i Caverion KlimaTak som er montert i kontorbygget [46]

Figur 17 viser hvordan KlimaTak ser ut etter montering. Varmepanelene er integrert i himlingen. Dermed sparer man plass i forhold til radiatorer montert på vegg



Figur 17: Varmepaneler integrert i himlingen i kontorbygget [46]

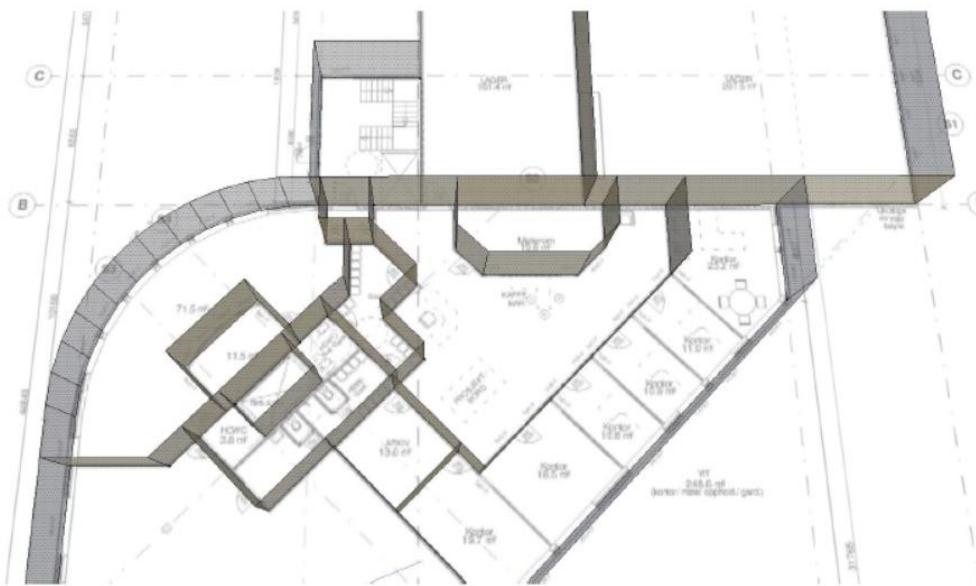
Som forklart i kapittel 2.3, benyttes gjerne trelagsisolertruter i passivhus. På grunn av det lavere varmetapet gjennom vinduer ved disse vinduene, er det ikke lenger nødvendig å plassere radiatorer under vinduer, for å hindre kaldras. Det er derfor mulig å plassere varmepanelene i himlingen [15].

7 Simuleringsmodell og energimåling

Simuleringsmodellen brukt i denne oppgaven er hovedsakelig laget av Jostein Wall gjennom hans masteroppgave, men det er gjort noen endringer [8]. De viktigste endringene er at data til luft vann varmpumpe og el-kjelen er endret. I tillegg er også varmetilskudd fra internlaster og lekkasjetall tilpasset NS 3701. Videre i dette kapittelet beskrives hovedtrekkene i simuleringsmodellen og hvordan energimålingen ble utført. Tilslutt nevnes usikkerheter rundt simuleringsmodellen og energimålingene

7.1 Simulering av bygningen i EnergyPlus

Grunnlaget for modellen er plantegninger av bygget (vedlegg 1), som er lastet inn i SketchUp og deretter bygd opp, slik figur 18 viser.



Figur 18: Simuleringsmodellen i EnergyPlus ble laget ut i fra plantegningene [8]

Etasjehøyden er satt til 3,3 meter. Teknisk data, som U-verdier og virkningsgrad på varmegjenvinner, er hentet fra en SIMIEN simulering datert 14.02.2012 (vedlegg 5). Videre er bygget delt inn i 24 forskjellige termiske soner. Prinsippet i soneinndelingen er at nærliggende rom med relativt lik bruk og bruksmønster, er slått sammen til en sone. Eksempler er kontorer som ligger ved siden av hverandre, kun adskilt med lettvegger. Å ha en egen sone for hvert rom kompliserer en allerede detaljert modell unødvendig mye, samtidig som resultatet forandres minimalt. Kontorer og møterom ved siden av hverandre er imidlertid delt opp i to forskjellige soner. Dette fordi bruksmønsteret er såpass ulikt. Toaletter som ligger rett over hverandre i de tre etasjene, er slått sammen til en felles sone. Dette gjelder også trappeoppgang.

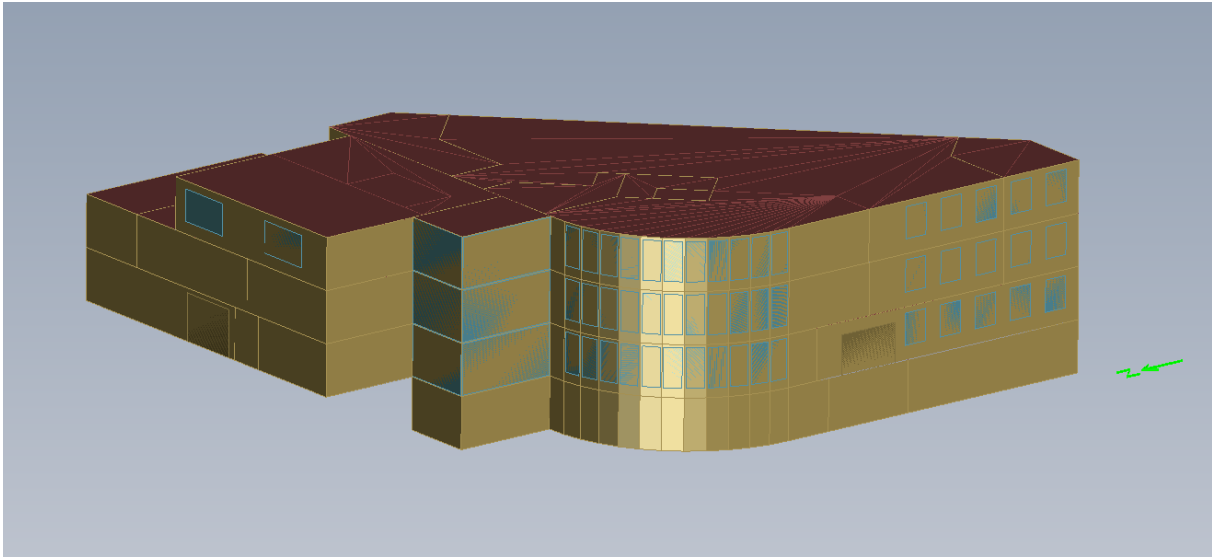
I tabell 11 viser en oversikt over navn på de ulike termiske sonene, hvilken etasje sonen er i, om den oppvarmet og ventilert og tilslutt areal.

Tabell 11: Oversikt over de ulike sonene i simuleringsmodellen i EnergyPlus

Sone navn	Etasje	Oppvarmet/ventilert	Areal [m ²]
TZ3KONTORLANDSKAP	3	Ja	473
TZHCWC	Alle	Ja	28
TZ0GANGOGANNET	Kjeller	Nei	120
TZ33GANG	3	Ja	32
TZ0Parkering	Kjeller	Nei	455
TZ3KANTINEMM	3	Ja	190
TZ2KONTOR2	2	Ja	34
TZ0SERVER	Kjeller	Nei	18
TZ1KAFFEMM	1	Ja	122
TZ2RESEPSJONMM	2	Ja	225
TZ2MOTE	2	Ja	35
TZ1DISP	1	Ja	333
TZ2KONTOR3	2	Ja	61
TZ1LAGER	1	Nei	301
TZ2TRIMROM	2	Ja	63
TZ3MOTE	3	Ja	55
TZ2MOTE2	2	Ja	39
TZ3KONTOR	3	Ja	35
TZ0GARDEROBE	Kjeller	Ja	19
TZ1KONTOR	1	Ja	118
TZ2VRIMLE	2	Ja	98
TZ2KONTOR1	2	Ja	99
TZTEKNSJKAKT	Alle	Nei	7
TZTRAPPEROM	Alle	Nei	35
Totalt areal			2992
Totalt oppvarmet/ventilert			2055

Av tabellen legger en merket til at total areal er 2 992 m² hvorav 2 055 m² er klimatisert.

Figur 19 viser den ferdige simuleringsmodellen sett fra nordvest.



Figur 19: Simuleringsmodellen i EnergyPlus

7.1.1 Sentral inndata i simuleringsmodellen

Som energikilde til oppvarming er det lagt inn en luft til vann varmpumpe med varmekapasitet på 65 kW og nominell COP på 3,15. El-kjelen som benyttes til topplast er i EnergyPlus lagt inn som fjernvarme (district heating) med en varmekapasitet på 96 kW. Det er verken lagt inn kjøling eller oppvarming av varmt tappevann. Bakgrunnen for dette er at varmtvannsforbruket utgjør en veldig liten del av energibudsjettet for et kontorbygg. I behovssimuleringen til Jostein Wall ble det konkludert med at kjølebehovet var på kun 1 469 kWh for et helt år [8]. Dette er svært lite, dermed ble det ikke lagt inn kjøling i modellen.

7.1.2 Temperaturkrav, internlast, luftmengder og grunntemperatur i simuleringsmodellen

Driftstid er satt til 12 timer, fra klokka 06:00-18:00. I driftstiden er temperaturen satt til være mellom 21-25 °C (23-27 °C på toalett), mens utenfor driftstid mellom 16-29 °C.

Internlast i modellen er varmetilskudd fra belysning, elektrisk utstyr (PCer, kaffemaskiner osv.) og personer. Disse følger standardverdier fra NS 3701, det vil si 4 W/m² for belysning og 6 W/m² for teknisk utstyr. Det er simulert at all belysningen skrues av utenfor driftstid, mens teknisk utstyr reduseres til 15 % utenfor driftstid. Det er simulert at det oppholder seg 100 personer i bygget i løpet av driftstiden og disse avgir en gjennomsnittlig varmeeffekt på 90 W.

Figur 20 viser tidsplanene for internbelastningene i EnergyPlus.

Field	Units	Obj3	Obj4	Obj5
Name		Belysning	ElektriskUtstyr	Personer
Schedule Type Limits Name		Fraction	Fraction	Fraction
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31
Field 2	varies	For: Weekdays	For: Weekdays	For: Weekdays
Field 3	varies	Until: 06:00	Until: 06:00	Until: 06:00
Field 4	varies	0	0.15	0
Field 5	varies	Until: 18:00	Until: 18:00	Until: 18:00
Field 6	varies	1	1.0	1.0
Field 7	varies	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00
Field 8	varies	0	0.15	0.0
Field 9	varies	For: AllOtherDays	For: AllOtherDays	For: AllOtherDays
Field 10	varies	Until: 24:00	Until 24:00	Until 24:00
Field 11	varies	0.0	0.15	0.0

Figur 20: Tidsplanene for internbelastningene i EnergyPlus

Luftmengdene i ventilasjonen følger også NS 3701-krav. Det vil si gjennomsnittlig tilluft på $6 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ i driftstiden og $1 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ utenfor driftstiden. Lekkasjetallet er satt til $0,6 \text{ h}^{-1}$ som er kravet fra NS 3701. Dette gjelder ved 50 Pa trykkdifferanse.

EnergyPlus tar også hensyn til grunntemperaturen i området på tre nivåer. Grunntemperatur i umiddelbar nærhet til bygget er satt til $17 \text{ }^\circ\text{C}$ (ca $2 \text{ }^\circ\text{C}$ lavere enn kjellertemperatur).

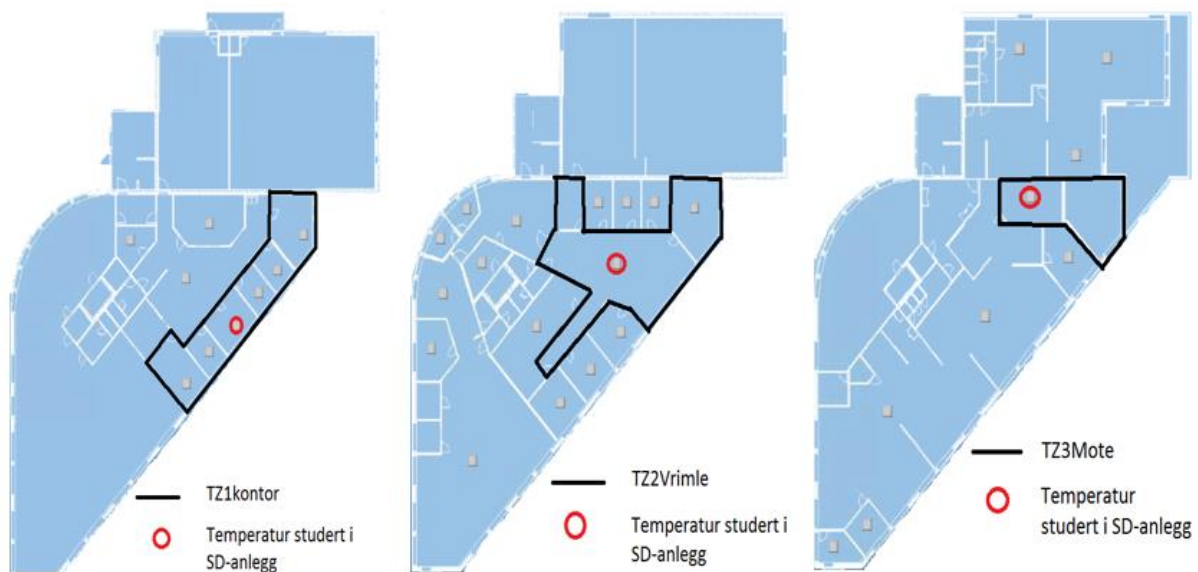
Grunntemperatur i øvre lag settes lik gjennomsnittlige månedlig utetemperatur med en innlagt tidsforsinkelse på tre måneder. Grunntemperatur i øvre lag for april er dermed månedlig utetemperatur for februar. Tilslutt er dypere grunntemperatur, det vil si temperaturen omtrent 3-4 meter under bakken, satt til å være $9,7 \text{ }^\circ\text{C}$.

I EnergyPlus er ikke klimadata for Mandal tilgjengelig. Det ble derfor laget en vær fil for Mandal ut fra værddata fra Bioforsk. Her ble 2011 klima valgt. Filen inneholder timesverdier for miljømessige forhold som solinnstråling, lufttrykk, lufttemperatur, luftfuktighet, vindretning og vindhastighet [47].

Etter at årssimulering er kjørt for denne innledende simuleringen, vil simuleringsmodellen blir kalibrert mot energimålingene basert på fremgangsmåten i figur 7.

7.2 Inneklimasimulering

Når simuleringsmodellen er ferdig kalibrert, vil inneklima blir studert i tre soner. Dette er kontor i 1. etasje, kontorlandskap i 2. etasje og møterom i 3. etasje. Figur 21 viser oversikt over de ulike etasjene fra SD-anlegget med de aktuelle sonene markert. Rød ring viser hvilken temperaturføler som er brukt i logging av temperatur fra SD-anlegget



Figur 21: Oversikt over de studerte sonene i inneklimasimuleringen i EnergyPlus. Romfordeling fra SD-anlegg

Det viser seg at romfordelingen i SD-anlegget ikke er identisk med plantegningene (vedlegg 1). Dette fordi det er satt opp ulike lettvegger for å skille kontorer etter at bygget ble tatt i bruk. Det er antatt at dette utgjør en svært liten forskjell i simuleringsmodellen. Det er derfor ikke tatt hensyn til.

Sentral data om de ulike sonene i EnergyPlus er gitt i tabell 12.

Tabell 12: Oversikt over inneklimasimulering med verdier fra EnergyPlus

	Sonenavn EnergyPlus	Areal [m²]	Antall personer	Kommentar
Kontor i 1. etasje	TZ1kontor	118	11	Sammenslåing av 6 kontorer
Kontorlandskap i 2. etasje	TZ2vrimle	98	10	Inneholder også et kontor og kopirom i SD-anlegg.
Møterom i 3. etasje	TZ3mote	55	15	Sammenslåing av 2 møterom

Antall personer i sonen er angitt spesifikt for inneklimasimuleringen. Det er derfor valgt et forholdsvis høyt antall personer for å teste inneklimate. Det er simulert med full drift hele driftstiden.

I EnergyPlus blir også operativ temperatur i sonene studert for vinter- og sommerforhold. I SD-anlegget ble temperaturene loggført på timesbasis i sonen for to ulike uker.

Inneklimate blir studert over hele året i driftstiden. Inneklimate ble verifisert ved å bruke Fanger komfortmodell i EnergyPlus for sommer- og vinterforhold. For Fanger ble aktivitetsgraden valgt til å være 1,2 met og lufthastigheten 0,1 m/s. I tillegg ble sommerbekledning valgt til å

være 0,5 clo, mens vinterbekledning 1 clo. Sommerforhold ble i tillegg studert ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251 i EnergyPlus. Denne modellen evaluerer akseptable innetemperaturer for dimensjonering av bygninger uten mekaniske kjølesystemer. Modellen baserer seg på operativ temperatur i sonen fordelt på tre kategorier, som forklart i kapittel 5.6.2. Utetemperaturen er i denne modellen middel utetemperatur de syv siste dagene. Modellen tar også hensyn til bekledning og lufthastigheter, slik at de ikke trenger og defineres i EnergyPlus, slik som ved Fanger. Figur 22 viser inndataen for inneklimasimuleringen i EnergyPlus.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		Kontor1etasje	Landskap2etasje	Mote3etasje
Zone or ZoneList Name		TZ1kontor	TZ2vrime	TZ3mote
Number of People Schedule Name		Personer1etasje	Personer2og3	Personer2og3
Number of People Calculation Method		People/Area	People/Area	People/Area
Number of People		11	10	15
People per Zone Floor Area	person/m2	0,0932	0,10204	0,272727
Zone Floor Area per Person	m2/person			
Fraction Radiant		0,5	0,5	0,5
Sensible Heat Fraction		autocalculate	autocalculate	autocalculate
Activity Level Schedule Name		ActivityTermiskKomf	ActivityTermiskKomf	ActivityTermiskKomf
Carbon Dioxide Generation Rate	m3/s-W			
Enable ASHRAE 55 Comfort Warnings		No	No	No
Mean Radiant Temperature Calculation Type		ZoneAveraged	ZoneAveraged	ZoneAveraged
Surface Name/Angle Factor List Name				
Work Efficiency Schedule Name		PersonerWorkEff	PersonerWorkEff	PersonerWorkEff
Clothing Insulation Schedule Name		Clothing	Clothing	Clothing
Air Velocity Schedule Name		Vindhastighet	Vindhastighet	Vindhastighet
Thermal Comfort Model 1 Type		Fanger	Fanger	Fanger
Thermal Comfort Model 2 Type		AdaptiveCEN15251	AdaptiveCEN15251	AdaptiveCEN15251

Figur 22: Inndata i EnergyPlus for inneklimasimulering

7.3 Energimåling

Energologi, energioppfølgningssystemet til Havutsikt, ble i denne oppgaven brukt til å måle energibruken og energiforsyningen på forskjellige steder i oppvarmingssystemet. De to første energimålerne sitter på energiforsyningsiden (kondensatorvarme varmepumpe og el-kjel), mens de to neste sitter på forbrukssiden (varmebatteri og varmepaneller). Øvrige målere er strømmålere som måler elforbruket i de ulike sonene som Energologi er delt inn i. Se tabell 13. Energologi ble tatt i bruk 25.02.2013, og energien blir målt med timesverdier. Energimåler nr. 4, strålepaneller, blir videre omtalt som varmepaneller.

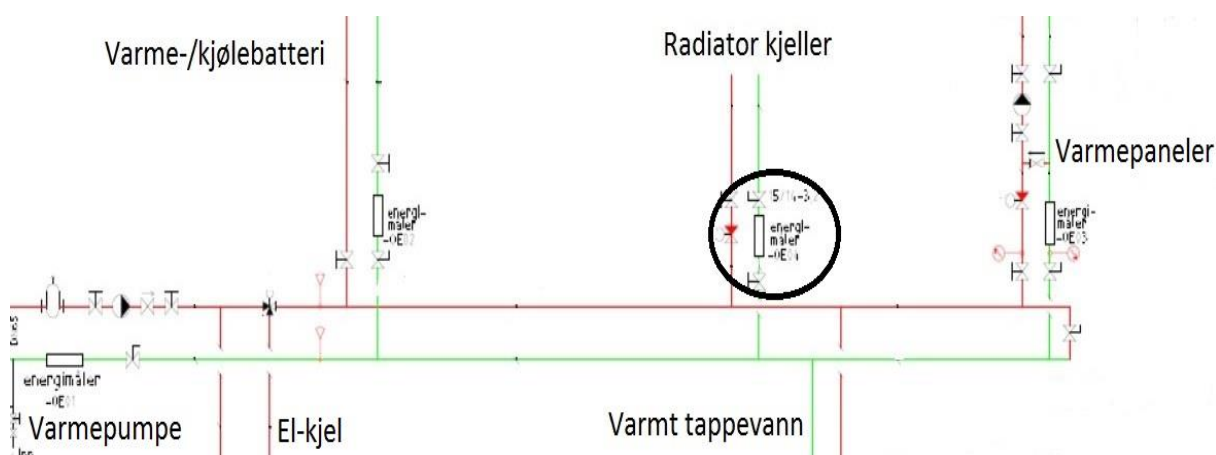
Tabell 13: Oversikt over energimålere i Energologi

Nr	Energimåler	Anlegg
1	320.01-OE01 Varmepumpe	Kondensatorvarme fra varmpumpe
2	433.33-RE04 El-kjel	Varme fra el-kjel
3	320.01-OE02 Ventilasjon	Varmebatteri ventilasjon
4	320.01-OE03 Strålepaneler	Varme til Caverion takvarme (varmepaneler)
5	432.01-RE01 Passivhus	Elforbruk til kontorer, kontorlandskap osv.
6	432.01-RE02 Ikke-passivhus	Elforbruk til lager, kjeller osv.
7	433.33-RE02 Kantine	Elforbruk kantine
8	433.33-RE02 Teknisk rom	Elforbruk vifter, pumper, varmegjenvinner osv.
9	433.33-RE03 Varmepumpe	Elforbruk varmpumpe (kompressor)

Det var ingen målepunkter for oppvarming av varmt tappevann, men det er mulig å gjøre et overslag ved å ta avviket mellom varmen fra varmpumpen og el-kjelen (det som går inn i systemet) minus det som går ut, altså varmepaneler og varmebatteri. I følge figur 23 skal det være en energimåler for radiator kjeller også, men denne finnes ikke i Energologi. Dermed blir avviket mellom varme inn i oppvarmingssystemet minus ut av systemet lik energibruken til varmt tappevann og radiator kjeller. Det er imidlertid ikke tatt ut verdier for varmt tappevann i oppgaven, da dette ikke er inkludert i simuleringssystemet.

Strømmålerne har navn etter hvilken sone de måler i bygget. Sonene i Energologi er mye større enn i simuleringssystemet, da for eksempel sonen passivhus dekker hele kontordelen av bygget. Som beskrevet i kapittel 5.2 og figur 6, er det ønskelig at energipostene *vifter, pumper, belysning og teknisk utstyr* kan måles individuelt i passivhus kontorbygg. Dette viser seg å ikke være mulig i Energologi, da det kun er en felles måler for de ulike sonene.

Figur 23 viser hvor de ulike energimålerne sitter i oppvarmingssystemet.



Figur 23: Systemskisse over energimålerne

Energimåler til radiator kjeller er markert med en svart ring, da denne ikke finnes i Energologi. Energimåleren til el-kjelen er ikke med på systemskjemaet. Energimålere i varme- og kjøleanlegg skal monteres i returledningen (grønn ledning) [48].

I tillegg blir SD-anlegget benyttet til å logge luftmengder i ventilasjonssystemet, samt også logging av temperaturer i sonene som inneklime blir evaluert.

7.4 Usikkerheter

Både simuleringsmodellen og energimålingene har en del usikkerheter rundt seg.

I simuleringsmodellen er det verken lagt inn kjøling eller oppvarming av varmt tappevann. Det er også usikkerhet rundt de interne varmelastene. Belysning og teknisk utstyr er valgt ut i fra standardverdier i NS 3701. Videre er det i modellen simulert med full drift fra starten av perioden, altså tatt hensyn til at alle kontorene var leid ut fra starten av og vært i bruk under hele perioden. Klimadata for simuleringen er hentet fra 2011 klima i Mandal. En del teknisk data om bygget, slik som U-verdier, varmegjenvinner virkningsgrad, er hentet fra en SIMIEN simulering utført 14.02.2012.

Totalt gulvareal er i EnergyPlus summert til 2 992 m², mens i Energologi er gulvarealet summert til 3 265 m², altså et avvik på 273 m². Modellkalibreringen i denne oppgaven er basert på totalt energibruk for ett år. Avviket på 273 m², vil dermed utgjør en forskjell på den spesifikke energibruken, selv om totalt energiforbruk er likt. Elforbruk utgjør i målingene 164,8 MWh. Dette tilsvarer 50,47 kWh/m², mens tilsvarende spesifikke forbruk for simuleringsmodellen blir da, gitt samme total forbruk for ett år, 55,08 kWh/m². Dermed et avvik på 4,61 kWh/m². Det er også usikkerhet rundt andelen av bygget som regnes som passivhus. Det er derfor antatt at hele bygget regnes som passivhus, både i målingene og simuleringene.

Ettersom bygget stod ferdig sent i 2012 kan det oppstå usikkerheter rundt uttørking av byggfukt og innregulering av tekniske installasjoner. Innreguleringen av tekniske anlegg tar ofte lenger tid enn antatt. Energioppfølging kort tid etter bygging blir ofte lite representativt for bruksfasen [21].

I tillegg er fortsatt ikke alle kontorene tatt i bruk (juni 2014), selv om det er simulert full drift. Energimålingene er kun tilgjengelig fra 25.02.2013, dermed er sammenligningen og kalibreringen basert på kun ett år (01.04.2013-31.03.2014), noe som er en veldig kort periode, spesielt siden bygget er helt nytt. Energimålingene er dermed sterkt avhengig av 2013/2014 klima.

8 Resultater

I dette kapittelet presenteres og diskuteres resultatene fra denne masteroppgaven.

I *kapittel 8.1* og *8.2* presenteres og diskuteres resultatene for oppvarming og elforbruk fra energimålingene og simuleringen.

I *kapittel 8.3* sammenlignes resultatene og modellkalibreringen presenteres.

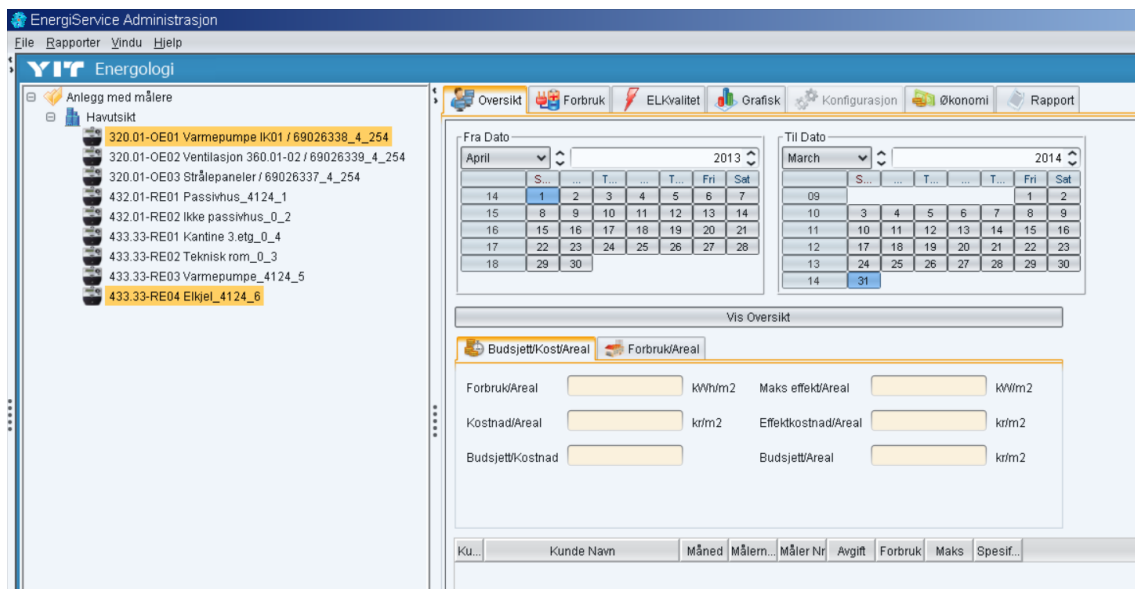
Videre blir det i *kapittel 8.4* gjennomført en nærmere studie av varmepanelene i Energologi og SD-anlegg.

I *kapittel 8.5* blir luftmengdene fra ventilasjonssystemet logget fra SD-anlegget og sammenligning og modellkalibrering av luftmengdene i simuleringene presenteres.

Til slutt blir inneklimate undersøkt i *kapittel 8.6*. Dette utføres først og fremst i den kalibrerte simuleringssmodellen, men også loggede temperaturer fra SD-anlegget blir undersøkt.

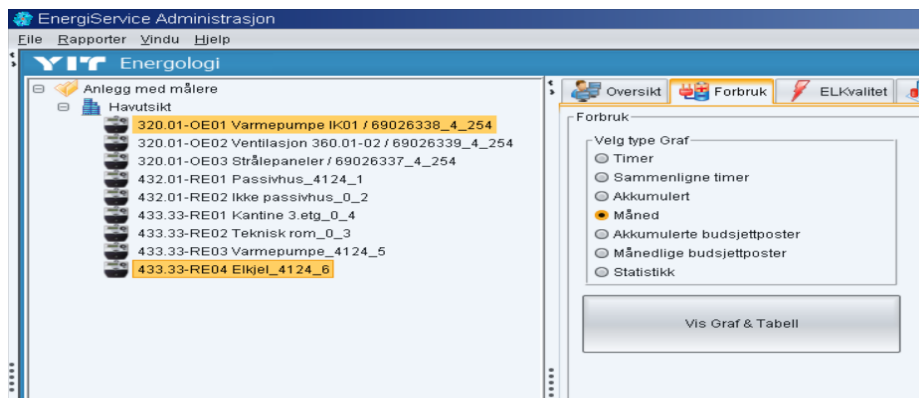
8.1 Energimålinger fra Energologi

Energioppfølgingssystemet til Havutsikt, Energologi, ble brukt til å lese av energibruken til bygget. Prinsippet i energimålingene til bygget er beskrevet i kapittel 7.3. Teknisk beskrivelse av bygget henvises til kapittel 6. Varmebehovet til bygget ble funnet ved å lese av verdiene fra *320.01-OE01 Varmepumpe IK01 / 69026338_4_254* og *433.33-RE04 El-kjel*. Se figur 24. Her ble også perioden for målingen valgt.



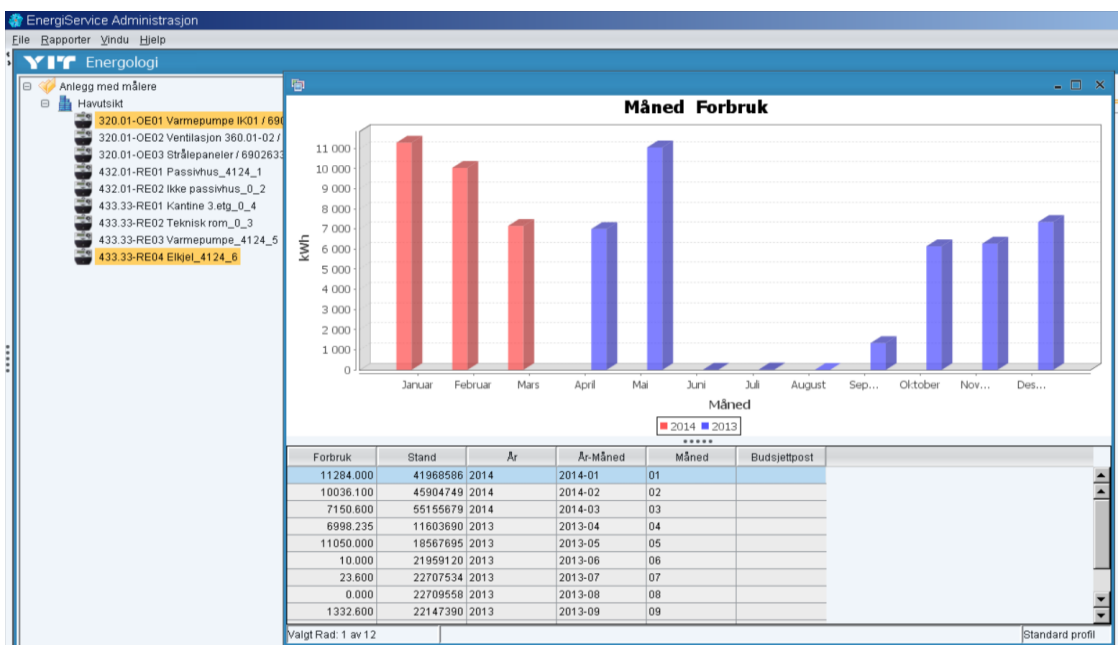
Figur 24: Oversikt over de ulike energimålerne og valg av tidsperiode i Energologi

Figur 24 gir samtidig en oversikt over alle energimålerne i Energologi. Videre ble det valgt å studere varmebehovet med månedsverdier. Som figur 25 viser, er det også mulig å få timesverdier. Varmebehovet er også undersøkt med timesverdier senere i denne oppgaven.



Figur 25: Valg av tidsintervall i Energologi

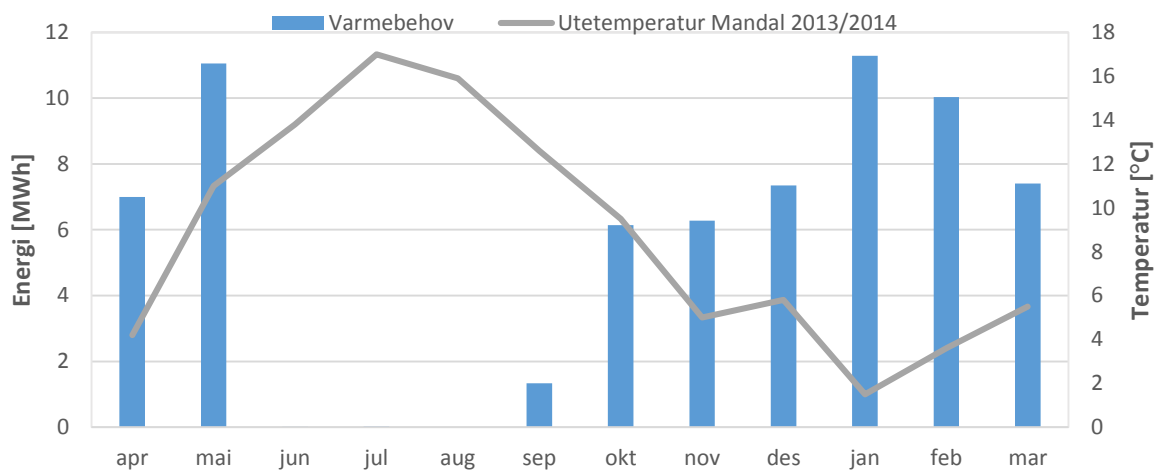
Til slutt trykker man på knappen *Vis Graf & Tabell* i figur 25. Da får man opp resultatene, både grafisk og i tabellform, slik figur 26 viser.



Figur 26: Resultatene vist grafisk i Energologi for valgte energimålere og periode

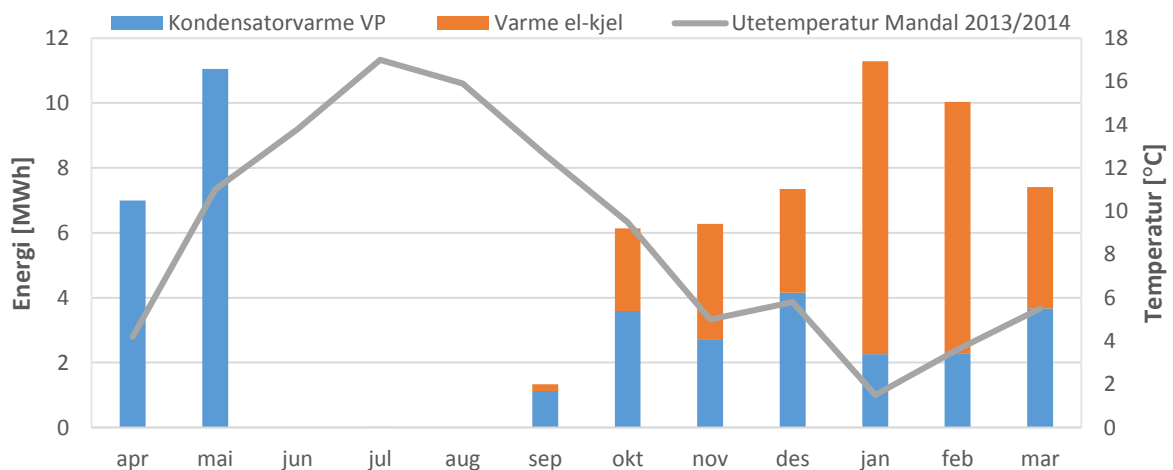
Tabellen ble eksportert til Excel for videre bearbeidelse. Dette fordi resultatene direkte fra Energologi er lite brukervennlige og tilpasningsdyktige. Blant annet kommer 2014 før 2013 i den grafiske fremvisningen. I tillegg er det også ønskelig å sammenligne med simuleringsresultater og gjennomsnittlig utetemperatur for Mandal i de aktuelle månedene, samt også gjøre grafen enklere å forstå. Heretter presenteres bare bearbeidede resultater fra Excel, hvis ikke annet er oppgitt.

Etter bearbeidelse i Excel, ser varmebehovet ut som i figur 27. For måleperioden er det totale varmebehovet til bygget på 67,90 MWh (20,8 kWh/m²). Spesifikt energibruk per år er gitt i parentes.



Figur 27: Varmebehov – Måling fra Energologi

Varmebehovet i figur 27 er her summen av kondensatorvarme fra luft til vann varmpumpa og varme fra el-kjelen. Temperaturen på sekundæraksen i figur 27 er middeltemperatur i Mandal per måned fra april 2013 til mars 2014, hentet fra eKlima [49]. Legger merke til at varmebehovet for mai måned er veldig høyt i forhold til utetemperatur sammenlignet med øvrige måneder. Dette er en feil i Energologi, som forklares senere i dette kapitlet med figur 31. Øvrige måneder viser sammenheng mellom utetemperatur og varmebehov. I juni, juli og august er varmebehovet tilnærmet 0. Dette er en indikasjon på at oppvarming av varmt tappevann ikke er inkludert i Energologi. Figur 28 viser det samme varmebehovet, men med bidraget fra varmpumpa og el-kjelen spesifisert.

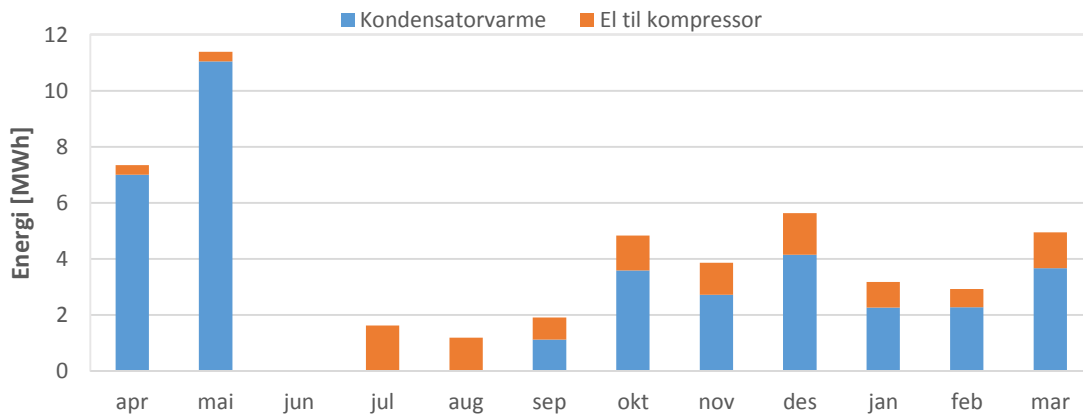


Figur 28: Kondensatorvarme fra varmpumpa og varme fra el-kjel – Måling fra Energologi

Av figuren kan en se at samspillet mellom kondensatorvarmen fra varmpumpa og varmen fra el-kjelen er svært variabelt. Energibruken fra el-kjelen er tilnærmet 0 fra april til august, mens vintermånedene i 2014 dominerer el-kjelen. I januar og februar dekker el-kjelen henholdsvis

80 % og 77 % av varmebehovet. I oktober og november dekker el-kjelen henholdsvis 42 % og 56 % av varmebehovet.

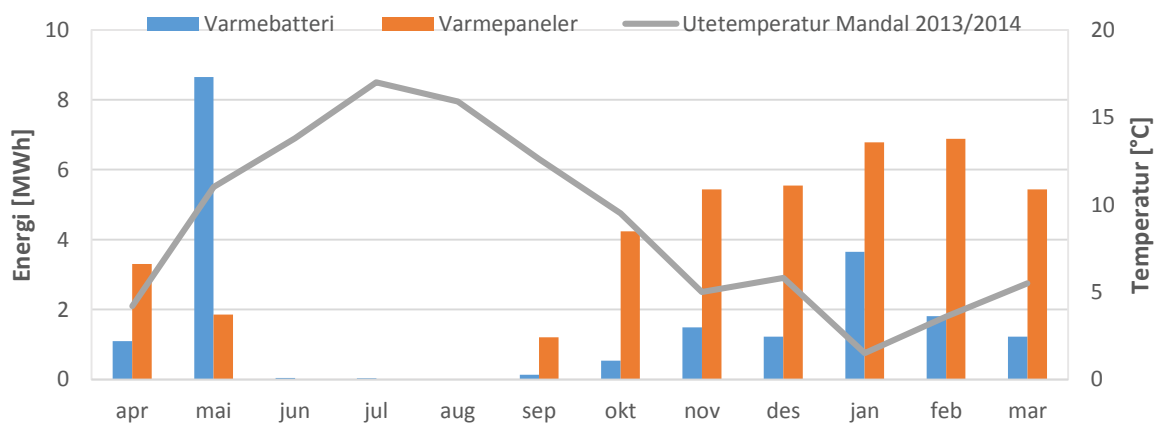
Figur 29 viser forholdet mellom elektrisitet til kompressor i varmepumpa og avgitt kondensatorvarme fra varmepumpa. Elektrisitet til kompressor i varmepumpa er funnet ved 433.33-RE03 Varmepumpe fra figur 24



Figur 29: Kondensatorvarme og el til kompressor til varmepumpa - Måling fra Energologi

Som det vises i figur 29, er det feil i elforbruket til kompressoren i vårmånedene (2013). Hvis resultatene hadde vært riktig ville SPF_{april} (netto årsvarmefaktor april) for varmepumpa vært 20, noe som ikke er teoretisk mulig. Enda høyere for mai måned, men i mai er kondensatorvarmen feil (se figur 31). COP til varmepumpa er oppgitt til å være 3,15. Det er også misvisende at elforbruket til kompressoren er på 1,6 MWh i juli måned, samtidig som kondensatorvarmen er 0. Elforbruket viser riktignok en mer realistisk trend i høstmånedene 2013 og vintermånedene 2014. I disse månedene varierer $SPF_{\text{måned}}$ fra 2,4 (november) til 3,45 (februar). Dette er fortsatt variable resultater. På bakgrunn av dette vil ikke elforbruket til kompressoren i varmepumpa bli videre diskutert i denne oppgaven.

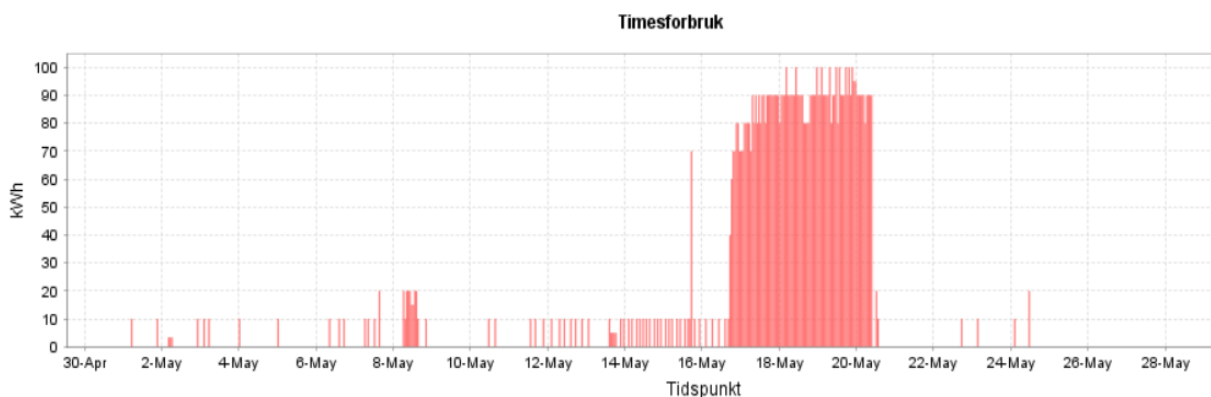
Energibruk til varmepaneler og varmebatteri er funnet ved å markere henholdsvis 320.01-OE03 Strålepaneler og 320.01-OE02 Ventilasjon i figur 24. Figur 30 viser energibruken til varmebatteri i ventilasjonsanlegget og varmepanelene.



Figur 30: Energibruk til varmepaneler og varmebatteri - Måling fra Energologi

Dette kan sees på som energibruk til oppvarming. Total energibruk til oppvarming for måleperioden er 60,55 MWh (18,55 kWh/m²). I figur 30 vises tydelig årsaken til det høye varmebehovet i mai. Nemlig at varmebatteriet har et svært høyt energibruk i mai. 8,65 MWh i mai mot 1,1 MWh i april som også har en lavere snitt utetemperatur. Energibruken i mai for varmebatteriet er over dobbelt så høy som måned med nest høyest energibruk. Dette er januar og i januar er gjennomsnittstemperaturen over 5 °C lavere enn i mai. Øvrige måneder viser forventet bruk. Varmepanelene er her takvarme integrert i Caverion KlimaTak. Varmepanelene er undersøkt nærmere i kapittel 8.4.

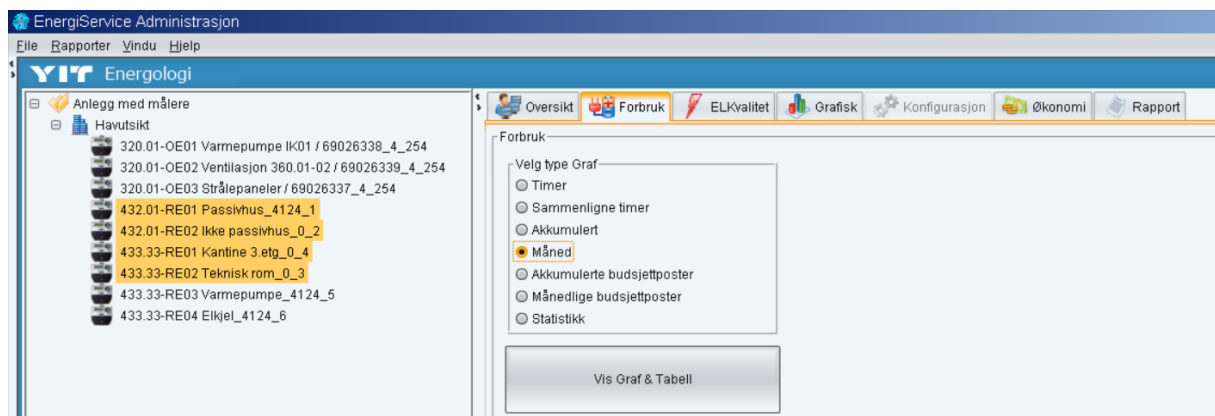
Varmebatteriet studert på timesbasis i mai (2013) viser tydelig årsaken til den høye energibruken i mai. Nemlig den svært høye energibruken mellom 17-20 mai. Figur 31 er et skjermbilde fra Energologi.



Figur 31: Energibruk varmebatteri i mai - Skjermbilde fra Energologi

Figur 31 viser at energibruken til varmebatteriet er svært høy fra 17-20 mai. 17. mai 2013 var en fredag og er Norges nasjonaldag (helligdag), mens 18. og 19.mai var en helg. Dette kan forklare hvorfor avviket ikke ble oppdaget. Det antas at varmebatteriet ikke var i bruk denne helga, dermed kan dette tyde på en feil i Energologi.

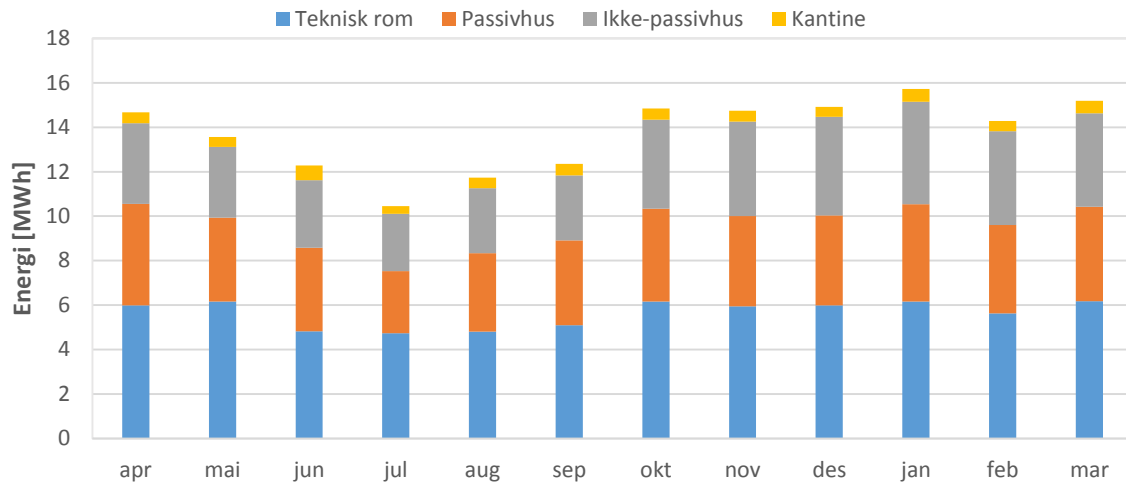
Elektrisitetsforbruket er funnet i Energologi ved å markere sonene 432.01-RE01 Passivhus, 432.01-RE02 Ikke-passivhus, 433.33-RE02 Kantine og 433.33-RE02 Teknisk rom. Elekrisitet til kompressor til varmepumpa er ikke tatt med, da denne er studert for seg selv. Figur 32 viser et skjermbilde fra Energologi.



Figur 32: Oversikt over strømmålere i Energologi

Figur 32 viser at det i Energologi ikke er mulighet for individuelle målinger av *belysning, teknisk utstyr, vifter, pumper* osv. Som beskrevet i kapittel 5.2, er dette anbefalt og ønskelig for nye yrkesbygg. Dette utgjør dermed en svakhet med Energologi.

I figur 33 er elektrisitetsforbruket vist for de ulike sonene i Energologi. Totalt elektrisitetsforbruk for måleperioden er 164,79 MWh (50,47 kWh/m²).



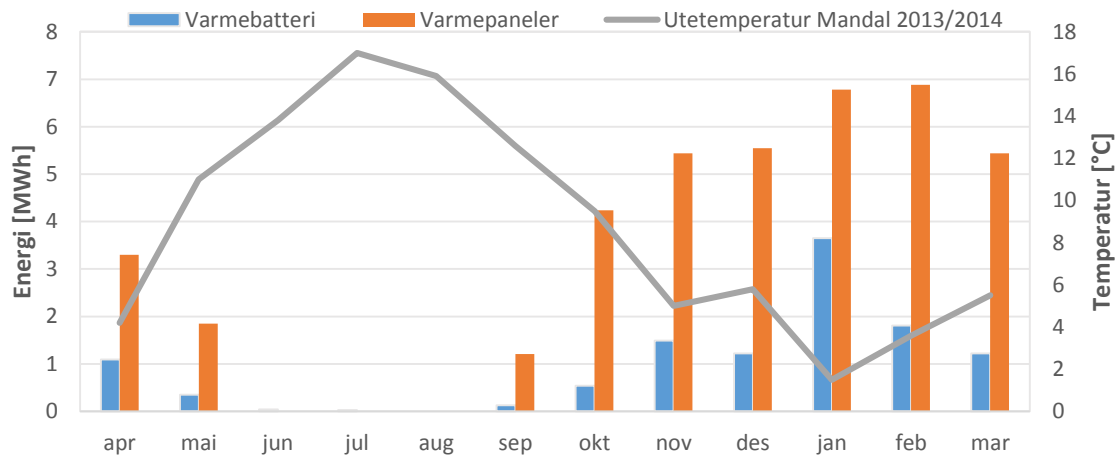
Figur 33: Elektrisitetsforbruk - Måling fra Energologi

I Energologi er det kun en strømmåler for hver sone som registrerer forbruket på timesbasis. Disse målerne måler elforbruket målt i sonen. For passivhus-sonen er dette hovedsakelig belysning og teknisk utstyr (PCer, kaffemaskiner, kopimaskiner osv.) For teknisk rom er det stort sett elektrisitet til å drive ventilasjonen, det vil si vifter, pumper, osv. Elforbruket er vanligvis uavhengig av utetemperaturen, da dette stort sett blir påvirket av bruken av bygget, som forklart i kapittel 4.2.1. Dette stemmer bra med de målte verdiene. Likevel vises det i figur 33 at elforbruket til passivhus, ikke-passivhus er mindre i sommermånedene. Totalt er forbruket 5,2 MWh høyere i januar enn juli. Dette kommer av ferieavvikling i juli måned, og dermed redusert bruk av bygget, for eksempel redusert PC bruk.

8.1.1 Diskusjon og justering av energimålinger fra Energologi

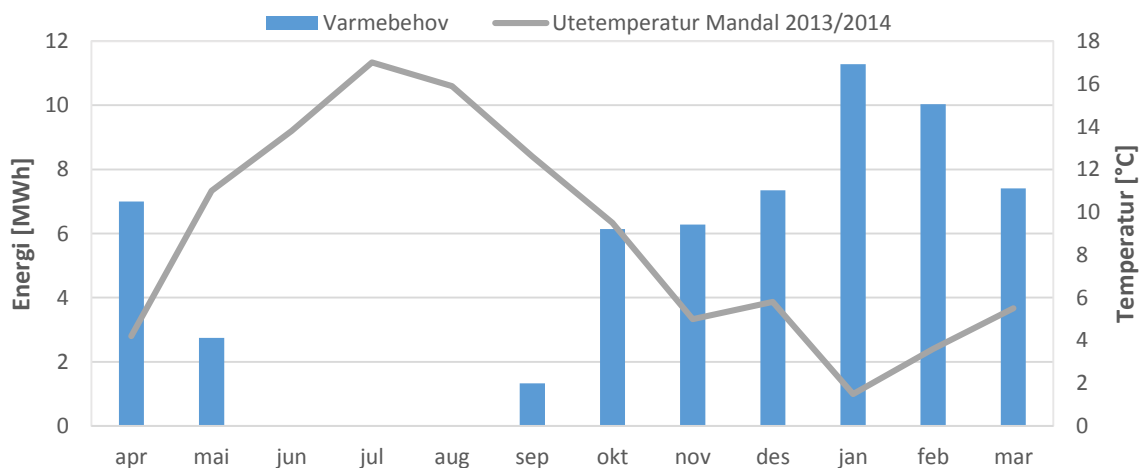
På bakgrunn av den åpenbare feilen med varmebatteriet i mai, er det laget en justert modell for varmebehovet for bygningen. Energibruken til varmebatteriet er funnet ved lineær interpolering mellom energibruken i april og juni med hensyn på utetemperatur. Dette er gjort for å få et mer realistisk bilde av det virkelige varmebehovet og energibruken til oppvarming samt også lettere å sammenligne med simuleringsverdier. Videre blir dermed det justerte varmebehovet, figur 35, brukt i sammenligningen og kalibreringen, og ikke figur 27. Samspillet mellom el-kjelen og varmepumpen er uforandret i figuren, da det er vanskelig å se noe fast mønster ut i fra målingene. I sammenligningen blir det lagt vekt på total varmebehov, og dermed ikke nøye studert hva som spesifikt varmepumpa og el-kjelen bidrar med. Årsaken til dette er at samspillet mellom varmepumpe og el-kjelen er veldig uforutsigbart i målingene.

Figur 34 viser den justerte energibruken for varmebatteriet samt også varmepaneler. Varmepanelene er inkludert i figuren for å vise forholdet mellom varmepanelene og varmebatteriet. Totalt energibruk til varmebatteri og varmepaneler er nå 52,27 MWh (16 kWh/m²).



Figur 34: Energibruk til varmebatteri og varmepaneler - Justert måling fra Energologi

Figur 34 gir nå et mer realistisk bilde av varmebatteriet i mai måned, som nå altså er interpolert mellom april og juni måned. Denne justeringen fører naturligvis til varmebehovet synker i mai måned. Figur 35 viser nå endelig varmebehov for bygget. Totalt varmebehov for måleperioden er nå 59,60 MWh (18,26 kWh/m²).



Figur 35: Varmebehov - Justert måling fra Energologi

Det er dette varmebehovet som simuleringsmodellen vil bli kalibrert mot. I tabell 14 vises levert varme til oppvarmingssystemet (mai justert) fra varmepumpa og el-kjel mot total energibruk til varmepanelene og varmebatteri. Det vil si varmebehov for bygningen sammenlignet med oppvarmingsbehovet. Avviket representerer varmtvann ifølge figur 2 fra kapittel 2.2.1, men som figur 35 viser er varmebehovet tilnærmet 0 i sommermånedene. Varmtvann er dermed ikke inkludert i Energologi. I følge figur 2 skal da varmebehovet være lik oppvarmingsbehovet. Med andre ord skal da figur 34 og 35 være like minus eventuelle tap i det vannbårne systemet og tap i varmebatteriene og varmepanelene.

Tabell 14: Avvik fra energimåling i Energologi

Måned	Levert varme fra varmpumpe og el-kjel [MWh]	Energibruk til varmepaneler og varmebatteri [MWh]	Avvik [MWh]
April	7.00	4.40	2.60
Mai	2.75	2.20	0.55
Juni	0.01	0.04	- 0.03
Juli	0.02	0.03	- 0.01
August	0	0	0
September	1.33	1.34	- 0.01
Oktober	6.14	4.78	1.36
November	6.28	6.93	- 0.65
Desember	7.35	6.77	0.58
Januar	11.28	10.43	0.85
Februar	10.04	8.69	1.35
Mars	7.40	6.66	0.74
Sum	59.60	52.27	7.33

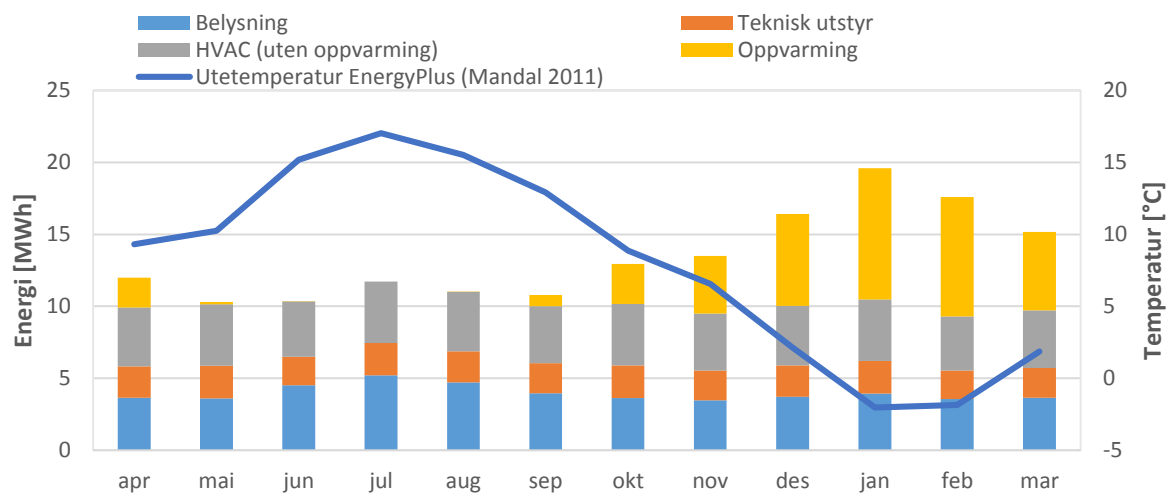
I tabellen vises tydelig at det er feil ved målingene i Energologi, da energibruk til varmepaneler og varmebatteri ikke kan være større enn avgitt varme fra varmpumpe og el-kjel (rød tall). Dette kan være en indikasjon på at kondensatorvarme fra varmpumpa eller varmen fra el-kjelen er for lav. I følge systemskjemaet i figur 23, representerer avviket varme til varmtvann og radiator kjeller. Dette avviket er negativt (røde tall) i fire av månedene, noe som er umulig. For alle månedene, varierer avviket fra 2.60 MWh til -0.65 MWh, altså 3.25 MWh mellom levert varme til bygget og energibruk til varmebatteri og varmepaneler. Dette er en tydelig indikasjon på at Energologi ikke er tilstrekkelig kalibrert.

I kalibreringen av simuleringsmodellen vil det bli fokusert på det totale varmebehovet til bygget og elektrisitetsforbruket. Dette på grunn av stor usikkerhet rundt energibruken til varmepanelene og varmebatteriet. I august måned er energibruken 0, mens juni og juli er henholdsvis 0,01 og 0,02 MWh. Dette tyder på at *varmtvannsforbruket* ikke er koblet til Energologi. Varmebehov regnes som summen av oppvarming og varmtvann. Ettersom varmtvann da ikke er inkludert, brukes varmebehovet videre i denne oppgaven som oppvarming. Sammenhengen mellom varmebehov, oppvarming, varmtvann, romoppvarming (varmepaneler) og ventilasjonsvarme (varmebatteri) er forklart i kapittel 2.2.1 og figur 2.

Videre i denne oppgaven er det måling av elektrisitetsforbruket (figur 33) og den justerte målingen for varmebehov (figur 35) som brukes videre. Merk at heretter blir *oppvarming* brukt i stedet for *varmebehov*. Dette fordi varmtvann ikke er inkludert i Energologi.

8.2 Simuleringsresultater fra EnergyPlus

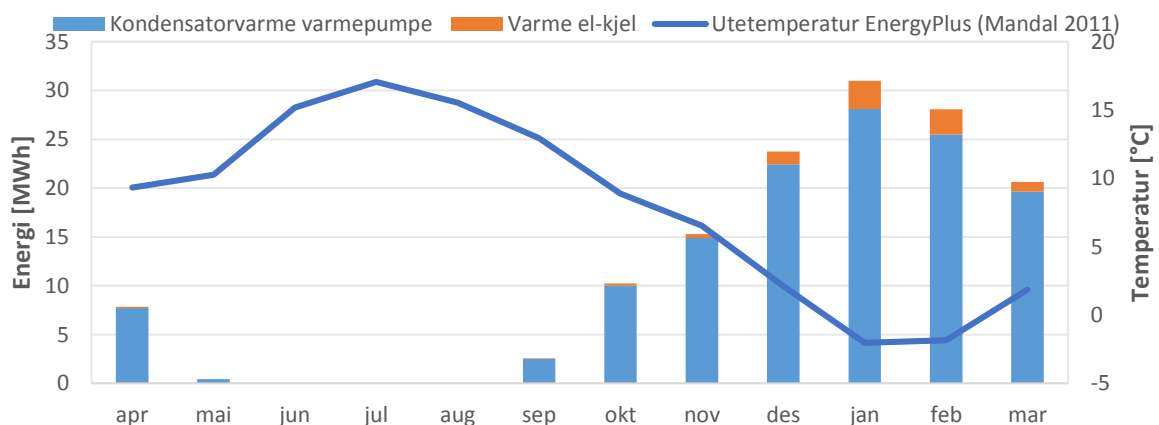
I dette kapittelet presenteres resultatene fra årssimulering i EnergyPlus med fulldrift av bygget og med takvarme og klimatisering av soner, som forklart i kapittel 7. Dette er dermed resultatene for innledende simulering med NS 3701-verdier. Resultatene fra EnergyPlus inneholder flere parametere, da programmet har store muligheter for å skrive ut detaljerte resultater, slik som vifteeffekt for både tilluft- og avtrekksvifte i ventilasjonsanlegget. Et detaljert simuleringsprogram er nyttig i kalibreringsprosessen [36]. I figur 36 vises energibudsjettet som fremkommer etter simulering av et år i EnergyPlus. Simuleringsperiode er fra 1. april til 31. mars på grunn av at det er denne perioden det er målingene fra, og dette vil da gjøre sammenligningen og kalibreringen enklere. Temperaturen på sekundæraksen er nå klimadataen brukt i simuleringen, nemlig Mandal 2011 klima. Total levert energi til bygget er 161,45 MWh (53,96 kWh/m²).



Figur 36: Energibudsjett full drift av bygget - Resultater fra EnergyPlus

Figur 36 gir oversikt over de ulike energipostene. De enkelte energipostene vil bli nøyere studert videre. Som det fremkommer av figuren, er ikke varmtvann inkludert i modellen. For oppvarming er det elektrisitet til kompressor til varmepumpa og varme fra el-kjelen som er inkludert. HVAC står for Heating, Ventilation and Air Conditioning.

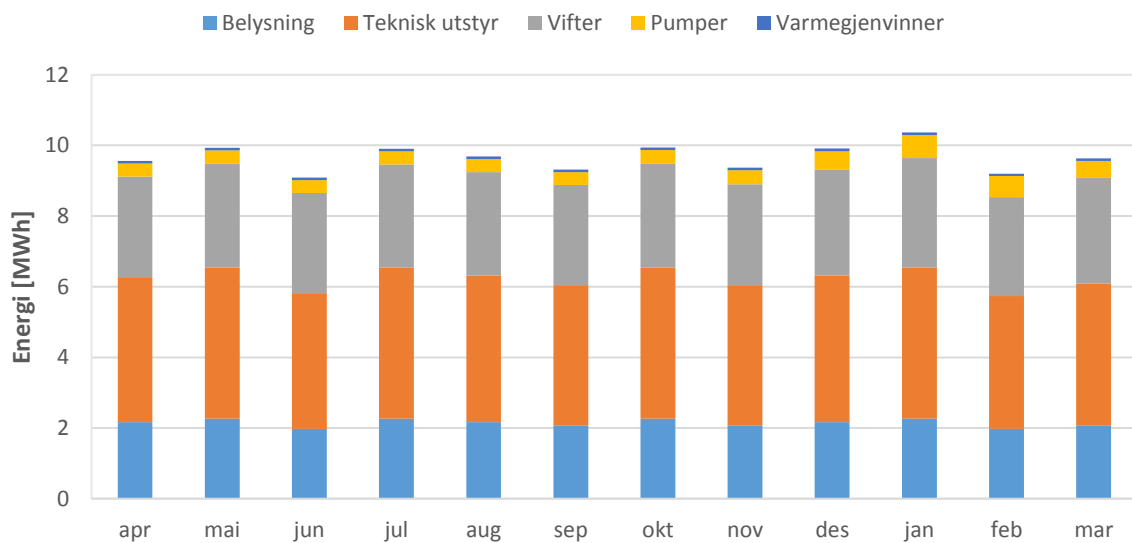
Figuren 37 viser energibruk til oppvarming.



Figur 37: Kondensatorvarme fra varmepumpe og varme fra el-kjel - Resultater fra EnergyPlus

Figur 37 viser kondensatorvarme fra varmepumpa og varme fra el-kjelen, og er dermed ikke det samme som oppvarming i figur 36. Total energi fra varmepumpe (kondensatorvarme) og el-kjel er 139,8 MWh (46,73 kWh/m²). Heretter vil energibruken til oppvarming fra simuleringen være kondensatorvarme fra varmepumpa og varme fra el-kjelen. Bidragene fra varmepumpa og el-kjelen vil bli slått sammen til oppvarming. Dette fordi samspillet mellom varmepumpe og el-kjel ikke har noe klar sammenheng i målingene fra Energologi som vist i figur 28. Derfor er det oppvarmingsbehov totalt som blir sammenlignet og kalibrert.

Figur 38 viser elektrisitetsforbruket til belysning, teknisk utstyr, vifter, pumper og varmegjenvinner. Dette er det samme som det totale elektrisitetsforbruket hvis man ikke regner med elektrisitet til kompressoren til varmepumpa. El til kompressoren er utelatt både i simuleringen og målingene i den videre sammenligningen.



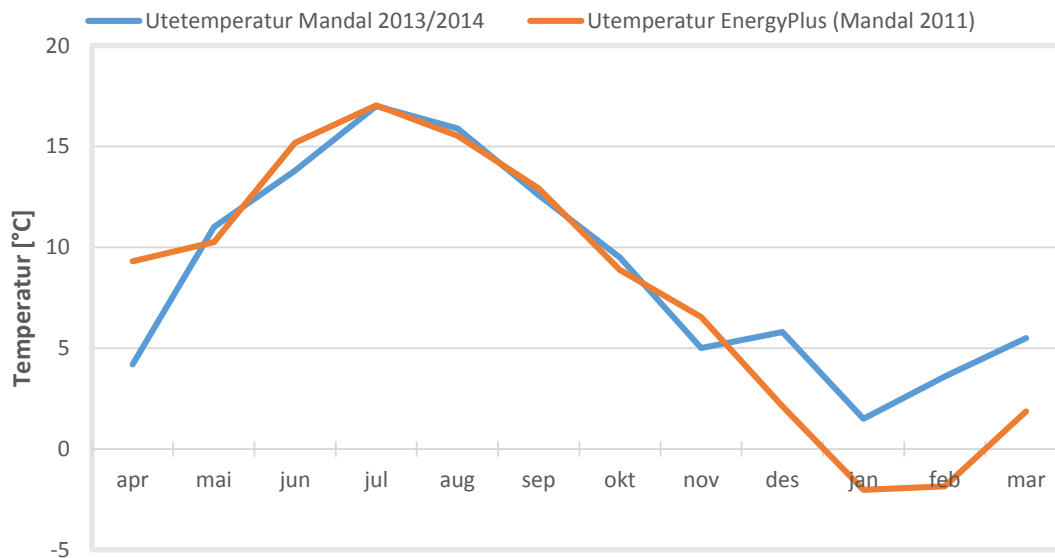
Figur 38: Elektrisitetsforbruk - Resultater fra EnergyPlus

Totalt elektrisitetsforbruk for et år er 115,90 MWh (38,74 kWh/m²). Disse energipostene er uavhengige av utetemperaturen, og dermed relativt konstante over året. I Energologi er det ikke mulighet for å lese av individuelle målinger for *belysning*, *teknisk utstyr*, *vifter* osv, som forklart i kapittel 7.3. Det er derfor videre i denne oppgaven kun sett på det totale elforbruket. En av årsakene til variasjonene mellom de ulike månedene i simuleringsmodellen er rett og slett fordi de ulike månedene har forskjellig lengde.

8.3 Kalibrering av simuleringsmodell mot målt energibruk

I dette kapittelet blir først resultatene for oppvarming og elforbruk sammenlignet. Dette for å danne et grunnlag før kalibrering av simuleringsmodellen. Kalibreringen blir utført ved å endre verdier på sentrale parametere, som forklart i kapittel 5.3 og skissert i figur 7. Først blir imidlertid klimadataen brukt i målingen og simuleringen sammenlignet.

Figur 39 viser en sammenligning av gjennomsnittlig månedstemperatur for Mandal i måleperioden og klimadata brukt i simuleringen. Det vil si fra april 2013 til mars 2014 og Mandal 2011.



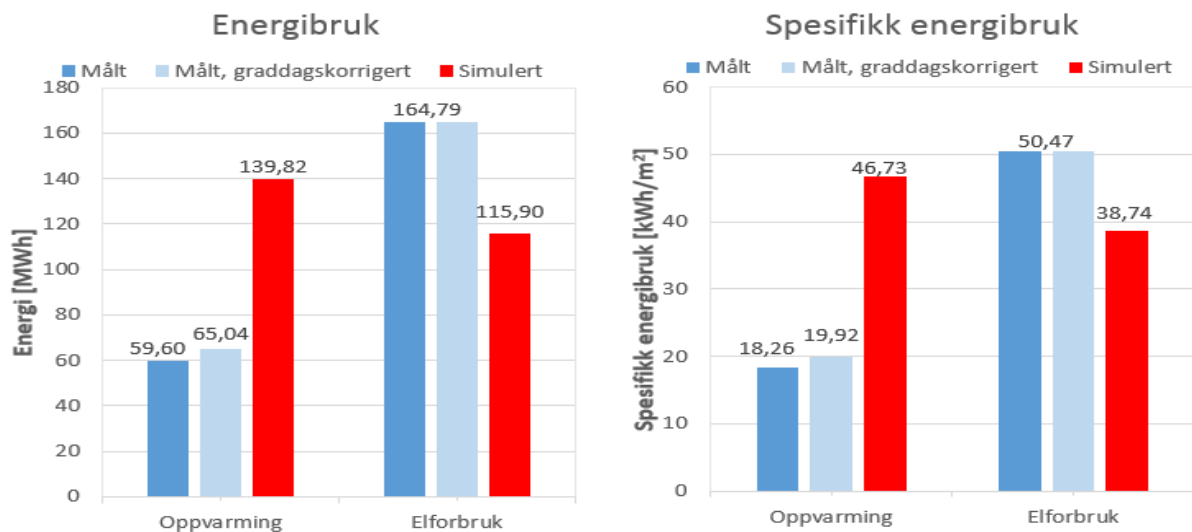
Figur 39: Sammenligning av klimadata fra måling og simulering

Figur 39 viser at vinteren har vært veldig mild i måleperioden. Snittemperaturen i februar var 5,45 °C høyere i målingene (2014) enn i simuleringen (2011). Tilsvarende tall for desember, januar og mars er 3,7 °C, 3,5 °C og 3,6 °C. På motsatt side var april måned 5,1 °C kaldere i målingene (2013) enn simuleringen (2011). Øvrige måneder er, som figuren viser, mer jevne. På bakgrunn av disse forskjellene vil energibruken til oppvarming bli graddagskorrigert mot Mandal 2011 klima. Det vil si at Mandal 2011 klima blir brukt som normalår i likning (2) fra kapittel 5.5.2. Den graddagskorrigerede målingen vil bli brukt sammen med den målte energibruken til kalibreringen.

Graddagstall for Mandal 2011 og 2013 er funnet ved Enova sin oversikt over historiske graddagstall [50]. For 2014 månedene er de beregnet manuelt ut fra likning (1) i kapittel 5.5.1 og klimadata fra eKlima [49].

Figur 40 viser en oversikt over energibruken til oppvarming og elforbruket for både målingene, graddagskorrigert måling og simulering. I figuren vises både total energibruk for hele året og spesifikk energibruk i kWh/m² for ett år. Som forklart under usikkerheter i kapittel 7.4, er *målt* og *graddagskorrigert* energibruk dividert på 3 265 m² (bruksareal fra Energologi), mens *simulert* er dividert på 2 992 m² (bruksareal fra EnergyPlus). Det er valgt å

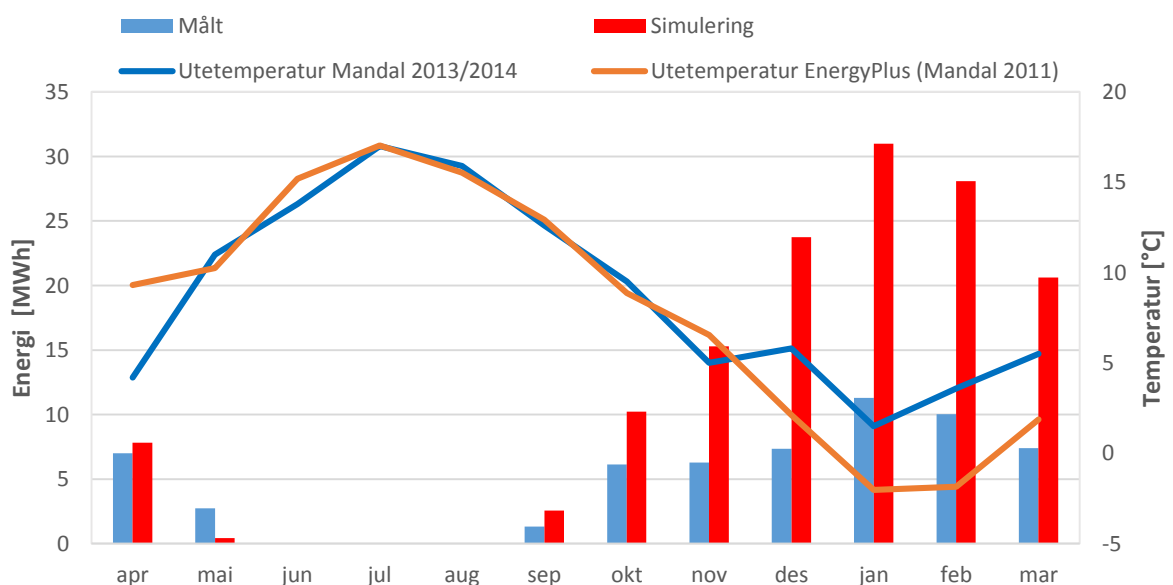
se på totalt bruksareal og ikke oppvarmet del av bruksareal grunnet usikkerhet til areal andel i Energologi.



Figur 40: Sammenligning av energibruk til oppvarming og elforbruk fra måling og simulering

Energibruk til oppvarming er svært høy i simuleringmodellen, faktisk over dobbelt så høy som selv den graddagskorrigerede målingen. I motsetning utgjør det simulerte elforbruket kun 70 % av det målte elforbruket. Graddagskorrigerering har ingen innvirkning på elforbruket, dermed er elforbruket det samme for både det målte og graddagstallkorrigerede målingen. I simuleringmodellen er det brukt standardverdier fra NS 3701 på lekkasjetall, snitt effektbehov fra belysning, teknisk utstyr osv. I tillegg er det simulert full drift av bygget hele året. Disse parameterne vil bli justert i kalibreringen.

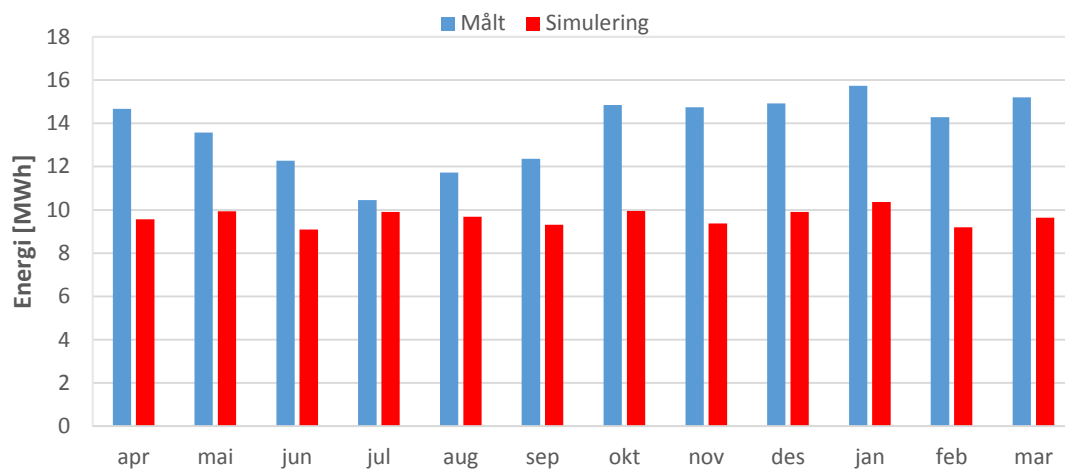
Figur 41 viser den månedlige sammenhengen mellom oppvarming for de målte verdiene og simuleringen.



Figur 41: Sammenligning av energibruk til oppvarming

Merk at det i figur 41 er de målte verdiene, og ikke de graddagskorrigerte som sammenlignes. Som forklart i kapittel 5.5.2, er graddagskorrigering en årsstasjonær beregning, og bør derfor ikke brukes på månedsverdier. Figur 41 viser at høst og vår månedene ligger på omtrent samme nivå. Avviket i april er 0,84 MWh eller 10,6 %. For oktober er avviket 4 MWh eller 40 %. Dette avviket øker betraktelig om vinteren. I januar er avviket hele 19,70 MWh eller 64 %. Dette kan tyde på at bygget i simuleringsmodellen ikke er godt nok isolert eller at lekkasjetallet er for høyt i simuleringsmodellen. Dette blir behandlet videre i kalibreringsprosessen.

Figur 42 viser den månedlige sammenhengen mellom elforbruket for de målte verdiene og simuleringen.



Figur 42: Sammenligning av elektrisitetsforbruk

Figur 42 viser at elforbruket er motsatt av oppvarmingen. Her ligger de målte verdiene høyere enn de simulerte. Dette kan tyde på at teknisk utstyr og belysing er for energieffektivt i simuleringen i forhold til virkelig bruk. I simuleringen er standardverdier fra NS 3701 brukt. I simuleringen er elforbruket jevnt over hele året, mens målingene viser en klar tildens med redusert elforbruk i sommermånedene.

8.3.1 Kalibreringsprosess

Resultatene fra simuleringen viser store avvik fra målingene. Den spesifikke energibruken til oppvarming per år i simuleringen er 46,73 kWh/m² mot 18,26 kWh/m² i målingene. Tar man hensyn til den milde vinteren i 2014 og de graddagskorrigererte målingene, blir den spesifikke energibruken per år til oppvarming 19,92 kWh/m². Dette er fortsatt kun 43 % av de simulerte resultatene. I elforbruket derimot, er de simulerte verdiene kun 70 % av de målte. Dette er resultater som indikerer at simuleringsmodellen må kalibreres mot de målte verdiene. Det vil i kalibreringen bli lagt vekt på å kalibrere energibruken til oppvarming mot den graddagskorrigererte målingen. Dette fordi klimadataen i simuleringen, Mandal 2011, er såpass forskjellig fra Mandal 2013/2014, som vist i figur 39.

Kalibreringsprosessen blir delt opp i tre faser. Dette er endring av konstruksjons-, utstyrs- og driftstidparametere. Kalibreringen blir utført som et parameterstudium. Det henvises til

kapittel 2 om passivhus og lavenergibygninger og kapittel 4 om parametere som påvirker energibruk i bygninger.

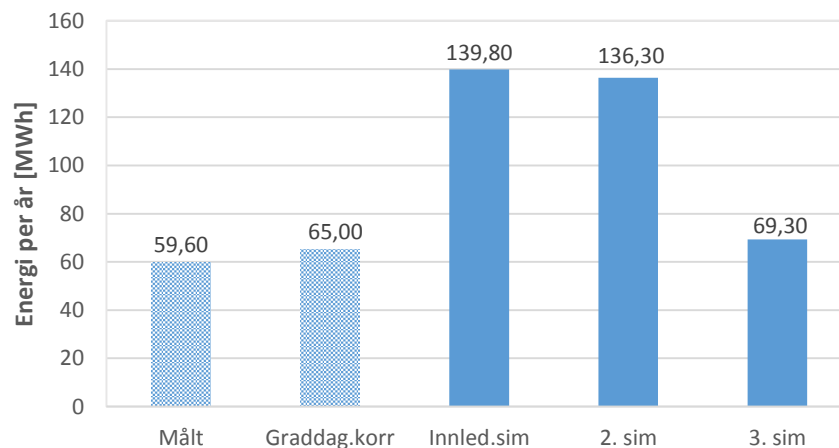
8.3.2 Kalibrering av konstruksjonsinnstillinger

Første del gjelder konstruksjonsparametere. Dette vil i denne kalibreringen medføre reduisering av U-verdiene til bygningskonstruksjonen og reduisering av lekkasjetallet. Dette for å redusere energibruken til oppvarming. I kalibreringen blir det undersøkt innvirkning av å isolere med 50 mm ekstra isolasjon i tak, gulv og vegg, og hva dette vil ha å si for energibruken til oppvarming. Vinduene ble ikke endret da de allerede har en U-verdi på 0,71 W/(m²·K). I henhold til NS 3701, er bygget simulert med et lekkasjetall på 0,6 luftskifter i timen. Tetthetsmåling fra bygget etter at det ble tatt i bruk, viser imidlertid at lekkasjetallet er så lavt som 0,34 luftskifter i timen [51]. Lekkasjetallet ble derfor endret til 0,34 luftskifter i timen i 3. simulering.

Tabell 15: Endring av U-verdier og lekkasjetall i simulering 2 og 3

	U-verdi vegg [W/(m ² ·K)]	U-verdi tak [W/(m ² ·K)]	U-verdi gulv [W/(m ² ·K)]	U-verdi vindu [W/(m ² ·K)]	Lekkasjetall [h ⁻¹]
Innledende sim.	0,10	0,08	0,08	0,71	0,6
2. simulering	0,08	0,07	0,07	0,71	0,6
3. simulering	0,10	0,08	0,08	0,71	0,34

Figur 43 viser total oppvarming for ett år for de tre ulike simuleringene, samt også referanseverdiene fra de målte og graddagskorrigererte målingene. Spesifikk oppvarming per år i kWh/m² for kalibreringsprosessen er oppgitt i tabell 18.



Figur 43: Energibruk til oppvarming inkludert konstruksjonsmessig kalibrering

Som vist i figuren ga reduisering av U-verdier (2. simulering) svært liten effekt på energibruken til oppvarmingen. Det ble derfor bestemt å forkaste hele tiltaket og videre benytte seg av de opprinnelige U-verdiene, som altså stammer fra en SIMIEN rapport fra 2012. Tiltaket var kun ment for undersøke om simuleringsmodellen er for dårlig isolert i

forhold til det virkelige bygget. 2. simulering viser at for dårlig isolering i simuleringmodell ikke er årsaken til avviket.

Ved å redusere lekkasjetallet fra 0,6 luftskifter i timen til 0,34 i timen, sank imidlertid oppvarmingsbehovet med 50 %. Dette lekkasjetallet er funnet ved tetthetsmåling etter at bygget stod ferdig, og gir dermed en bedre tilnærming enn standardverdien fra NS 3701, som er 0,6 luftskifter i timen. Her avsløres årsaken til de høye resultatene i simuleringen. Avviket i forhold til graddagskorrigert måling mellom 3. simulering og graddagskorrigert måling er nå på 6,6 % fra 115 % i innledende simulering.

Lekkasjetallet kan videre tilpasses i EnergyPlus for å eksakt stemme med graddagskorrigert måling. Dette har ikke imidlertid ingen hensikt i denne fasen av kalibreringen, ettersom elforbruket også skal kalibreres. Elforbruket er tilnærmet uavhengig av utetemperaturen, og dermed U-verdier og lekkasjetall, og vil derfor ikke være kalibrert etter 3. simulering. Endring av øvrige parametere som endring av varmetilskudd fra utstyr vil påvirke både elforbruket og energibruken til oppvarming.

8.3.3 Kalibrering av utstyr innstillinger.

Endring av lekkasjetall til 0,34 har som nevnt tilnærmet ingen effekt på elforbruket.

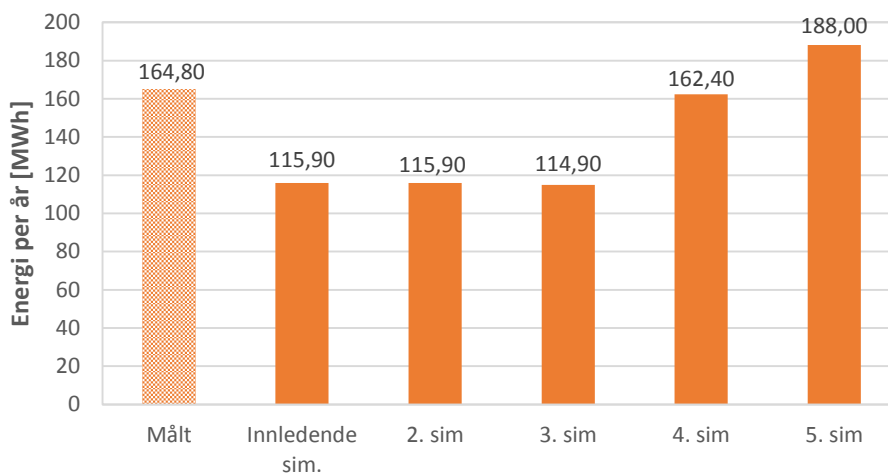
Elforbruket er 115 MWh på et år i simuleringmodellen, mens det målte verdien er 164 MWh.

I simuleringmodellen er snitt effektbehov fra teknisk utstyr og belysning satt etter standardverdier fra NS 3701. Dette er svært energieffektive tall som kan være for lave. Som beskrevet i kapittel 7.3, måler Energologi kun total elforbruk for hver sone. Det er dermed ikke mulig å se elforbruket for belysning og teknisk utstyr adskilt. Dette kompliserer kalibreringen, og det er dermed bestemt å øke de enkelte snitt effektbehovene til NS 3031-nivå. NS 3031-nivå tilsvarer TEK 10-nivå. I simulering nr. 4 ble snitt effektbehov for teknisk utstyr satt til 11 W/m². Dette er standardverdien fra NS 3031 for gjennomsnittlig effektbehov for teknisk utstyr i driftstiden i kontorbygg. Videre ble virkningsgraden på viften justert fra 90 til 75 % på bakgrunn av undersøkelser i SD-anlegget. I simulering nr. 5 ble snitt effektbehov for belysning økt til 8 W/m². Dette er standardverdien fra NS 3031 for gjennomsnittlig effektbehov for belysning i driftstiden i kontorbygg. En annen årsak til at elforbruket er lavere i simuleringene, kan være at det bygget består i virkeligheten av mer teknisk utstyr enn simuleringmodellen. Det er for eksempel blitt vanlig at ingeniører jobber med flere PC-skjermer. Dermed blir også varmetilskuddet høyere per m² fra teknisk utstyr. Dette er ikke studert nærmere.

Tabell 16: Endring av utstyr innstillinger i simulering 4 og 5

	Snitt effektbehov utstyr [W/m²]	Snitt effektbehov belysning [W/m²]	Virkningsgrad vifte [-]
Innledende sim.	6	4	0,90
4. simulering	11	4	0,75
5. simulering	11	8	0,75

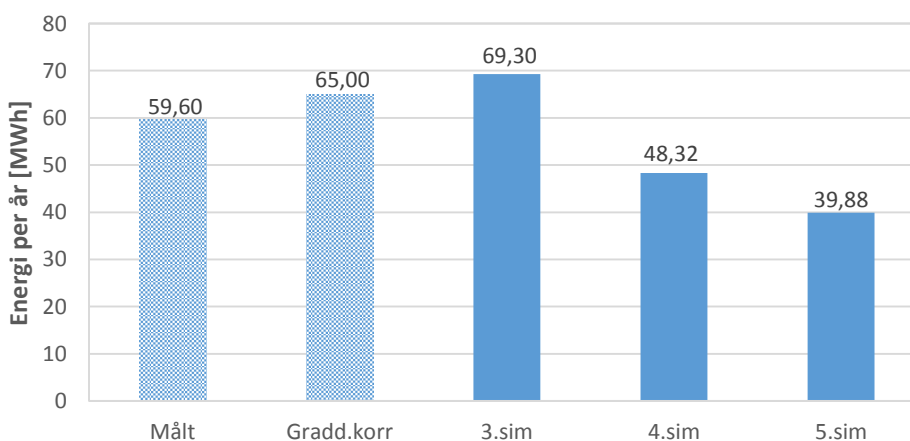
Figur 44 viser elforbrukets utvikling gjennom de fem simuleringene samt også den målte verdien for ett år. Spesifikt forbruk er oppgitt i tabell 18.



Figur 44: Elektrisitetsforbruk inkludert kalibrering av utstyr innstillinger

Som forventet hadde ikke endring av U-verdier eller lekkasjetall noen stor innvirkning (2. og 3. simulering) på elforbruket. Derimot endring av effektbehov fra teknisk utstyr til NS 3031-verdier, samt redusering av virkningsgrad på vifte (simulering 4), fører til økning av elforbruket til 162,40 MWh. Dette er et avvik på kun 1,4 % i forhold til de målte verdiene. I simulering nr. 5 økes også effektbehovet til belysning til NS 3031-verdier. Dette fører imidlertid til at det totale elforbruket for ett år blir over 23 MWh høyere i simulering enn målingene.

Det er i alle simuleringene antatt at lyset slås av utenom driftstid, mens teknisk utstyr er redusert til 15 % utenfor driftstid. Endring av snitt effektbehov til teknisk utstyr og belysning fører til at disse parameterene avgir mer varme i W/m^2 , noe som igjen fører til at oppvarmingsbehovet synker, slik figur 45 viser.



Figur 45: Energibruk til oppvarming inkludert kalibrering av utstyr innstillinger

Økning av varmetilskudd fører nå til at oppvarmingsbehovet er for lavt i simuleringen. Verdiene som brukes i NS 3031, fører til at varmen fra teknisk utstyret (PCer, kopimaskiner, kaffemaskiner osv.) og belysning avgir henholdsvis $11 W/m^2$ og $8 W/m^2$. Dette er en økning

på 83 % for teknisk utstyr i forhold til NS 3701-tall. Tilsvarende tall for belysning er en økning på 100 %. Det er verdt å merke seg at NS 3031 regnes som TEK 10-nivå, og disse tallene fortsatt regnes som energieffektive. Dermed er NS 3701 varmetilskuddene trolig for optimistiske.

Det finnes få studier som studere målt energibruk til utstyr. Samtidig viser målt elektrisitetsbruk i enkelte bygninger at elektrisitetsbruken til utstyr er så høy som 15 W/m^2 . Som beste løsning er 6 W/m^2 benyttet. Dette tilsvarer NS 3701. For belysning blir det i enkelte ZEB-studier benyttet snitteffekt på 2 W/m^2 . NS 3031-nivå er 8 W/m^2 og NS 3701-nivå er 4 W/m^2 . En «dårlig belysningsløsning» tilsvarer 10 W/m^2 [7].

Oppvarmingsbehovet i passivhus er ofte så lavt at det ikke lønner seg å benytte konvensjonelle oppvarmingssystemer. Det er ofte tilstrekkelig med enkle punktoppvarmingskilder eller et enkelt vannbårent systemer som varmepaneler i tak, som benyttet i dette bygget [13]. At oppvarmingsbehovet er lite i passivhus, vises tydelig fra simulering 3-5. Ved å øke snitt effektbehov for belysning og teknisk utstyr til NS 3031-nivå, sank oppvarmingsbehovet fra $23,16 \text{ kWh/m}^2$ til $13,33 \text{ kWh/m}^2$.

8.3.4 Kalibrering av driftsinnstillinger

Til nå er bygget simulert med full drift hele året. Det viser seg imidlertid at ikke hele bygget er leid ut, slik figur 46 viser.



Figur 46: Oversikt over ledige lokaler i bygget [52]

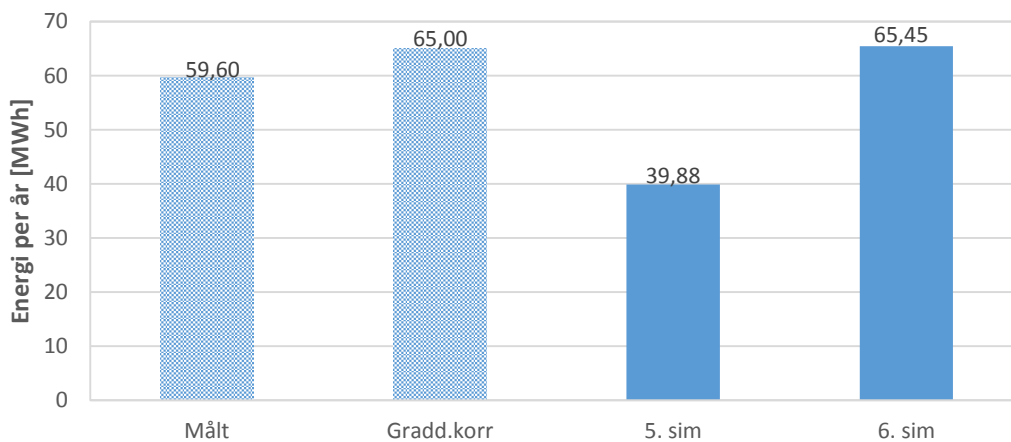
Dette er et skjermbilde fra www.havutsikt.no tatt 01.06.2014. I 1. etasje er et lokale på 359 m² ledig, i 2. etasje tre kontorer på til sammen 36 m², mens i 3. etasje et lokale på 123 m². Dette utgjør til sammen 518 m². Dette tilsvarer ca 16-17 % av hele bygget, avhengig av hvilket totalareal man sammenligner med. Driften av ventilasjonen, teknisk utstyr, belysning og personer ble dermed redusert til 83 % drift i driftstiden av de opprinnelige verdiene. Det vil si 83 % drift av disse parameterne i forhold til simulering nr. 5. Innstillingene utenfor driftstid er uforandret i forhold til tidligere simuleringer. I tillegg ble drift av teknisk utstyr og personbelastning satt til 50 % drift i driftstiden i juli på grunn av ferieavvikling. Det vil si 50 % av fulldrift av bygget. Dette tilsvarer 60 % drift i forhold til øvrige måneder i simulering nr. 6. Normal driftstid ble ikke endret. Denne er fortsatt 06:00-18:00 på hverdager, og ikke drift i helgene.

Samtidig viser det seg at lekkasjetallet på 0,34 fører til litt for lavt oppvarmingsbehov. Dette ble økt til 0,41 for at energibruken til oppvarming skal bli tilpasset den graddagskorrigerte målingen.

Tabell 17: Endring av driftsinnstillinger og lekkasjetall fra simulering 5 til 6

	5. simulering	6. simulering
Belastning - Ventilasjon - Teknisk utstyr - Belysning - Personer	Driftstid: 06:00-18:00 Belastning i driftstid: 100 % drift av ventilasjon, utstyr, belysning og tilstedeværelse av personer Belastning utenfor driftstid: 15 % drift av maks for teknisk utstyr. 16,67 % drift for ventilasjon. 0 % for belysning og personer	Driftstid: 06:00-18:00 Belastning i driftstid: 83 % drift av ventilasjon, utstyr, belysning og tilstedeværelse av personer Belastning utenfor driftstid: Samme som 5. simulering
Drift i juli	Samme som øvrige måneder	50 % drift av teknisk utstyr og tilstedeværelse av personer
Lekkasjetall	0,34	0,41

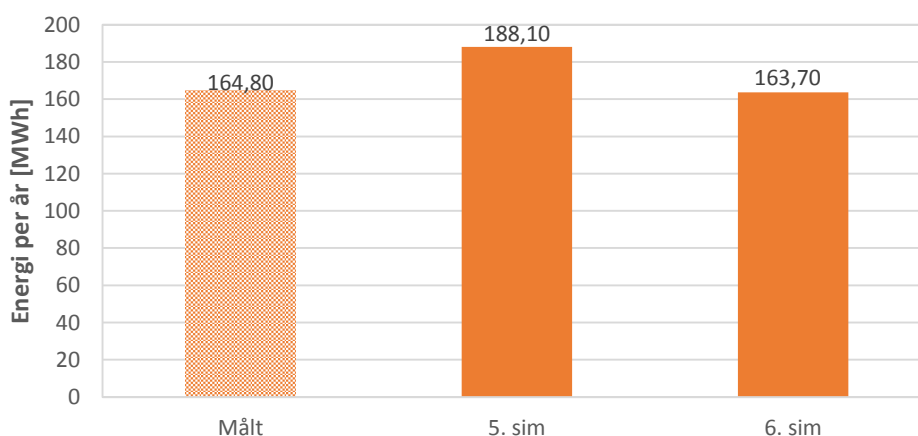
Energibruk til oppvarming for ett år etter endring av driftsbelastning, samt justering av lekkasjetall vises i figur 47.



Figur 47: Energibruk til oppvarming inkludert kalibrering av drift

Energibruken til oppvarming økte med 64 % ved å redusere driften samt også øke lekkasjetallet, og er nå under 1 % forskjell fra den graddagskorrigerte målingen. Ved å redusere belastningen av bygningen til 83 %, avgir dermed teknisk utstyr, belysning og personer mindre varme til bygget, og dermed øker oppvarmingsbehovet. Det er spesielt teknisk utstyr som er avgjørende da denne posten har den største varmeavgivelsene av de interne varmetilskuddene. Passivhus-bygningskropper er så godt isolerte at oppvarmingsbehovet er sterkt redusert. Øking av varmeavgivelse fra interne varmetilskudd vil derfor ha større påvirkning i et passivhus enn et gammelt hus med dårlig isolasjon [13]. Dette kommer tydelig frem i denne kalibreringen, da endring av varmetilskuddene gjorde store utvalg på den totale energibruken til oppvarming per år. Ved en endring av lekkasjetallet til 0,39 luftskifter per time, vil energibruken til oppvarming ende opp på samme nivå som de målte verdiene. Dette er ikke gjort da det er antatt at den graddagskorrigerte målingen gir en mer realistisk måling av energibruken til oppvarming i forhold til simuleringsmodellen. Dette er på grunn av den milde vinteren i målingene (vinteren 2013/2014), som forklart i figur 39.

Figur 48 viser elforbruket for ett år etter reduisering av driftsbelastningen, samt justering av lekkasjetallet.



Figur 48: Elektrisitetsforbruket inkludert kalibrering av drift

Ved å redusere driftstidbelastningen sank elforbruket med 13 % og er nå under 1 % i forskjell fra de målte verdiene. Som tidligere vist, har lekkasjetallet tilnærmet ingen virkning på elforbruket. Dette er forventet resultater fra elforbruket. Redusert driftsbelastning fører til mindre elforbruk til utstyr og belysning. Det kan dermed antas at standardverdiene fra NS 3031 stemmer godt overens med bygget. Dette fordi resultatene fra 6. simulering ligger elforbruket innenfor 1 % fra de målte verdiene. Dette når bygget ikke er i fulldrift, verken for målingen eller simuleringen. Simuleringsmodellen regnes nå som ferdig kalibrert med tanke på oppvarming og elforbruk.

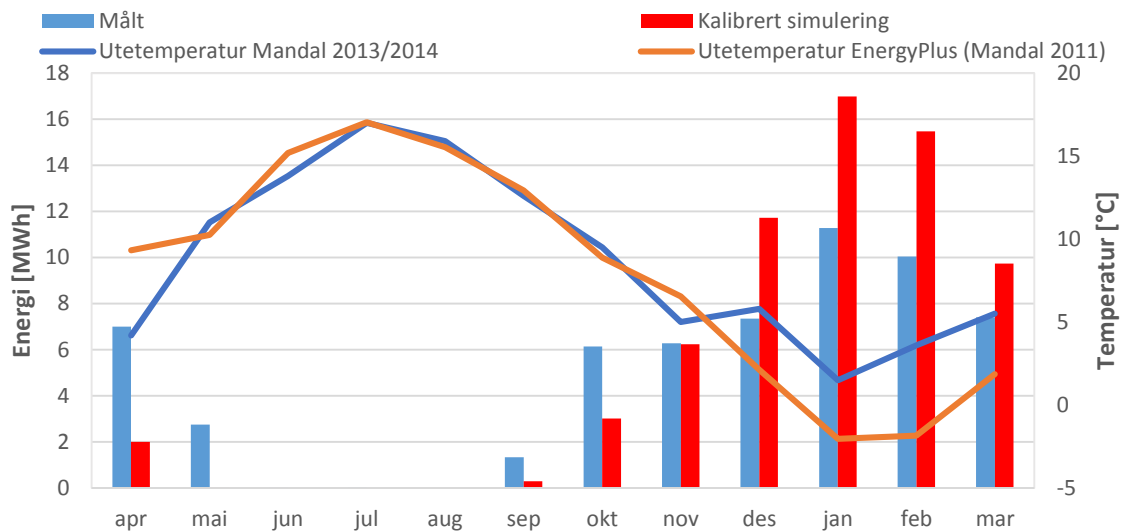
Tabell 18 viser en oversikt over spesifikk energibruk og total energibruk for de ulike tiltakene i kalibreringen. Merk at spesifikk energibruk i simulering er total energibruk dividert med 2 992 m² (areal av simuleringmodell), mens måling og graddagskorrigerert er dividert med 3 265 m² (areal fra Energologi). Dette er en oppsummering av kalibreringsprosessen. Målingen, graddagskorrigerert måling og ferdig kalibrert simulering er markert med blått for å tydeligere vise sammenhengen mellom målt og kalibrert simuleringmodell.

Tabell 18: Oversikt over kalibreringsprosessen med alle resultater

	Tiltak	Energibruk oppvarming [kWh/(m ² ·år)]	Energibruk oppvarming [MWh/år]	Elforbruk [kWh/(m ² ·år)]	Elforbruk [MWh/år]
Måling		18,26	59,60	50,47	164,79
Grad. korr.		19,92	65,00	50,47	164,79
Sim. 1	NS 3701	46,73	139,82	38,74	115,90
Sim. 2	U-verdier	45,57	136,34	38,72	115,86
Sim. 3	Lekkasjetall	23,16	69,30	38,42	114,94
Sim. 4	Effektbehov utstyr	16,15	48,32	54,27	162,39
Sim. 5	Effektbehov lys	13,33	39,88	62,87	188,10
Sim. 6	Driftsbelastning, lekkasjetall	21,87	65,45	54,71	163,70

Tabell 18 oppsummerer kalibreringsprosessen og effekten av de ulike tiltakene. Den ferdig kalibrerte modellen har spesifikt energibruk til oppvarming på 21,87 kWh/(m²·år) og elforbruk på 54,71 kWh/(m²·år).

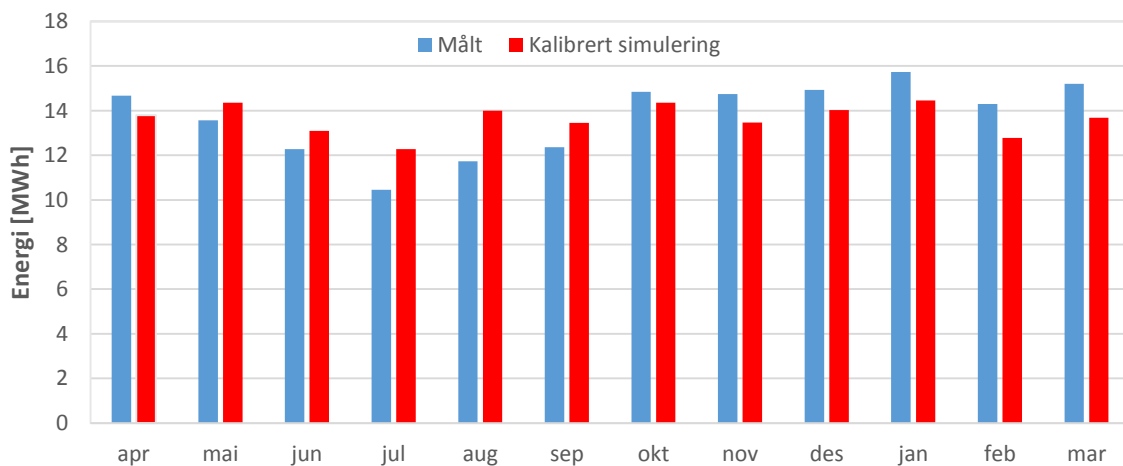
Figur 49 viser en månedlig sammenligning mellom energibruken til oppvarming for målingene og den ferdig kalibrerte modellen, samt gjennomsnittlig månedstemperatur for begge tilfeller.



Figur 49: Sammenligning energibruk til oppvarming for måling og kalibrert modell

Som vist er nå energibruken til oppvarming under 1 % forskjellig fra den graddagskorrigerede målingen. Den graddagskorrigerede målingen er ikke inkludert i figur 49, fordi dette er en årlig stasjonærberegning, og ikke bør brukes på månedsverdier. Den kalibrerte modellen har energibruk til oppvarming som er ca. 10 % høyere enn det målte bruken. Dette kommer av den milde vinteren 2014. Simuleringsmodellen kan enkelt kalibreres mot den målte energibruken ved å senke lekkasjetallet til 0,39 (fra 0,41). Vinteren var såpass mild at januar og februar i simuleringsmodellen er henholdsvis 3,7 °C og 5,45 °C kaldere enn i målingene. Der er derfor sterk grunn til å tro at energibruken til oppvarming er lavere enn normalt i målingene, det er derfor besluttet å kalibrere modellen mot det graddagskorrigerede målingen. På bakgrunn av dette er også avviket mellom energibruken i vintermånedene såpass stor, slik som figur 49 viser. I januar er avviket hele 5,15 MWh og februar 4,87 MWh. Legger også merke til at energibruken er lavere i simuleringen enn målingen i vår- og høstmånedene. Dette er altså motsatt av vintermånedene. Dette kan forklares ved å studere varighetsdiagrammene i figurene 51 og 52.

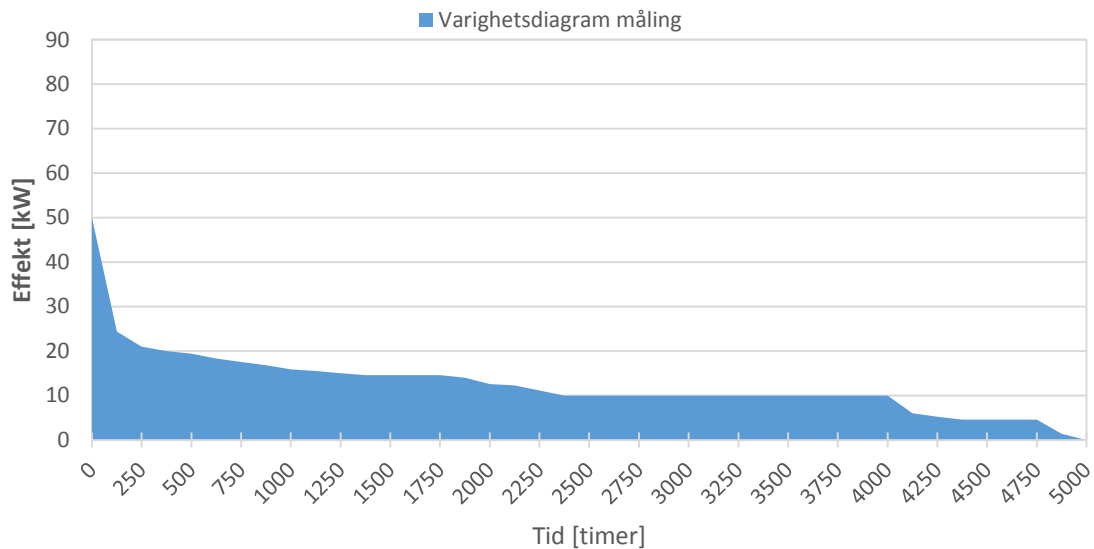
Figur 50 viser sammenligning mellom elforbruket for målingene og den ferdig kalibrerte modellen.



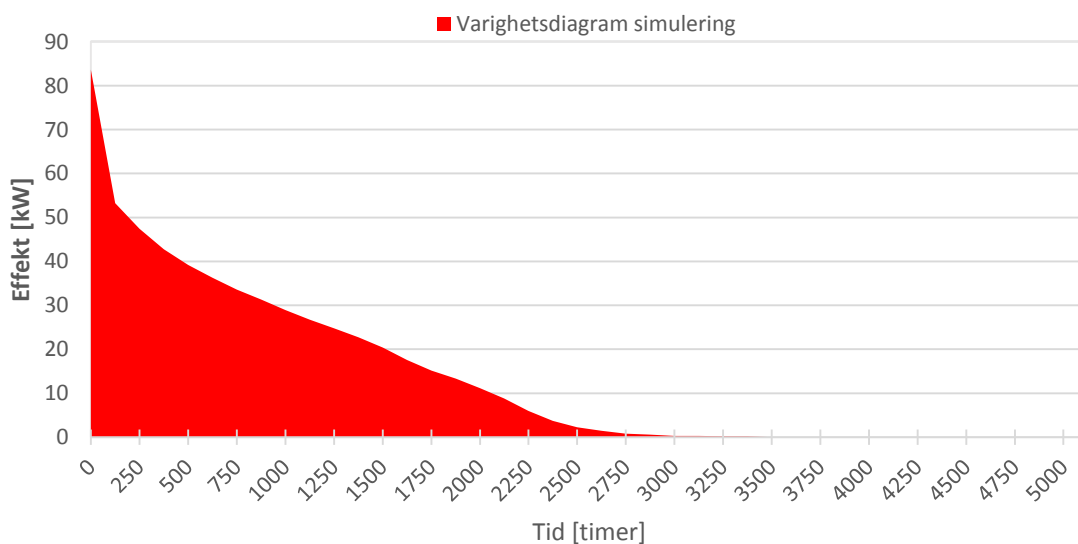
Figur 50: Sammenligning av elforbruk for måling og kalibrert modell

Det totale elforbruket for ett år avviker nå under 1 % fra målingene i den kalibrerte modellen. Elforbruket er vanligvis uavhengig av klima, noe som stemmer veldig bra i dette tilfellet. Figur 50 viser tydelig at den kalibrerte modellen stemmer bra med målingene.

Figur 51 og 52 viser varighetsdiagrammet for oppvarming for både målingene og den kalibrerte simuleringsmodellen.



Figur 51: Varighetsdiagram oppvarming for måling



Figur 52: Varighetsdiagram oppvarming for kalibrert modell

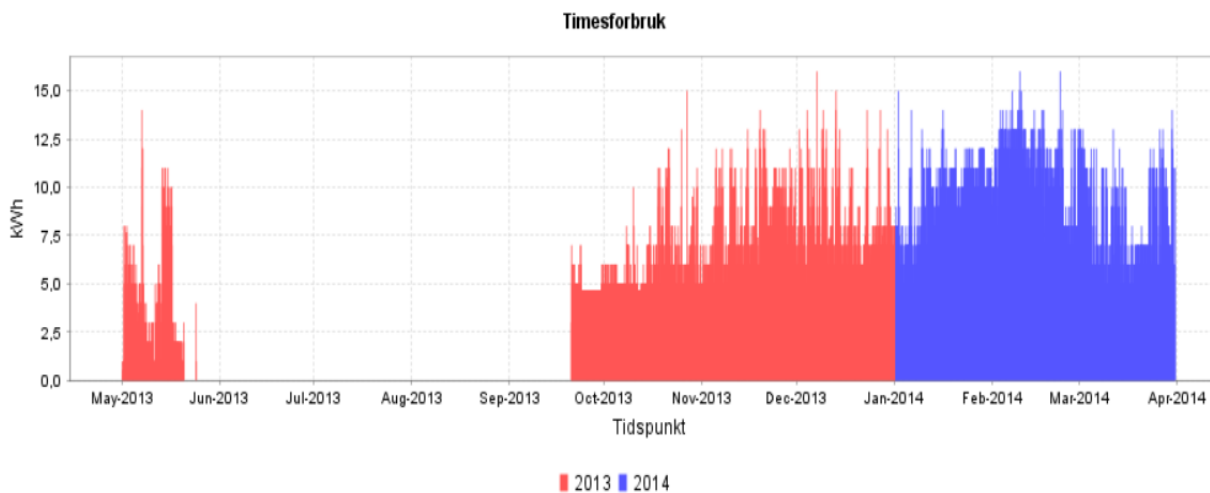
Det er også i disse figurene bare valgt å vise totalt oppvarming. I varighetsdiagrammene bekreftes hvorfor energibruken til oppvarming er lavere i simuleringen i vår- og høstmånedene. Nemlig fordi fyringssesongen er ca. 2 000 timer kortere i simuleringen enn målingene, slik som figur 51 og 52 viser. Derimot er effekten mye lavere i målingene enn simuleringen, slik at det jevner seg ut for et år. Det vil si den kalibrerte modellen jevner seg ut

mot den graddagskorrigererte målingen, ikke de direkte målingene fra Energologi som varighetsdiagrammet viser. I passivhus er behovet for romoppvarmingen sterkt redusert, og normalt sett så lav at det ikke lønner seg å benytte konvensjonelle oppvarmingsystemer. Romoppvarming kan da dekkes med enklere systemer, for eksempel en enkelt vannbårent system, slik som i dette bygget [13]. Dette forklarer det jevne varighetsdiagrammet fra målingen. Effekten ligger mellom 10-20 kW i nesten 4 000 timer i det målte varighetsdiagrammet. Simuleringsmodellen har en helt annen oppbygning, selv om den er kalibrert mot bygget. I den kalibrerte modellen er formen på varighetsdiagrammet jevnt synkende, men til gjengjeld er fyringsperioden nesten 2 000 timer kortere enn i målingene.

8.4 Takvarmepanelene studert i Energologi og SD-anlegg

Varmeavgivning i bygget foretas fra takvarme integrert i Caverion Klimatak. Denne løsningen er nærmere forklart i kapittel 6.3. Det vannbårne systemet er beskrevet i kapittel 6.1. I Energologi er det mulig å lese av energibruken til varmepanelene på timesverdier. Det er imidlertid kun mulig å lese av en verdi, som dermed gjelder totalt for alle varmepaneler. I tillegg er det mulig fra SD-anlegget å logge tur- og returtemperatur i det vannbårne systemet inn til varmepanelene. Det er også her bare mulig å logge en tur- og en returtemperatur for varmepanelene.

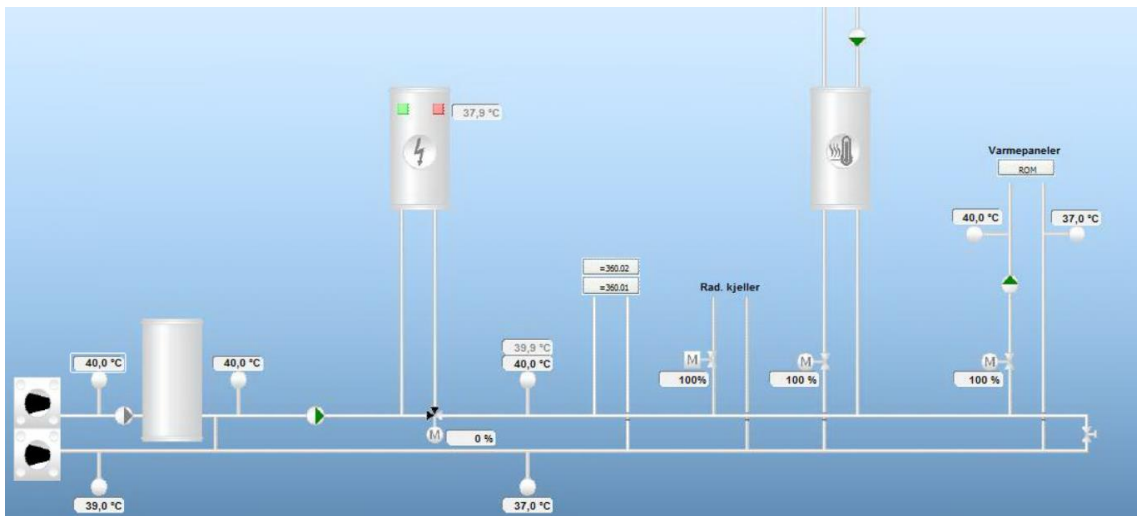
Figur 53 er et skjermbilde fra Energologi som viser energibruken til varmepanelene for ett år, fra 01.04.2013 til 31.03.2014. Figuren er funnet ved å markere 320.01-OE03 Strålepaneler i figur 24 i Energologi. Deretter er det valgt periode og timesverdier.



Figur 53: Energibruk til varmepanelene for ett år - Skjermbilde fra Energologi

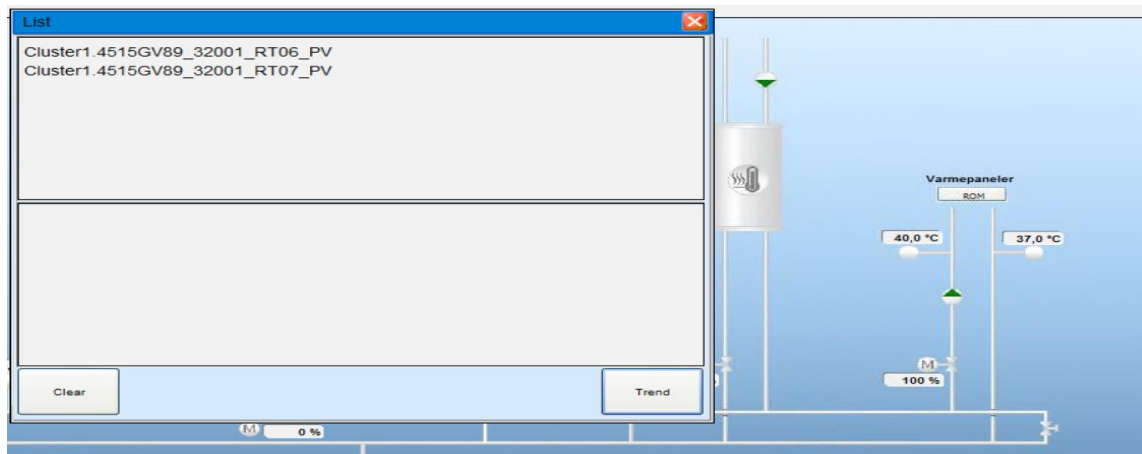
I figur 53 vises energibruken i tilknytning til varmepanelene. Maks energibruk på en time er 16 kWh. I tillegg vises fyringssesongen tydelig. Varmepanelene er ikke i bruk fra 24.05.2013 til 20.09.2013. Fyringsperioden er avhengig av uteklima, og vil dermed variere fra år til år. Som det fremgår av varighetsdiagrammet til målingene i figur 51, er energibruken relativt jevn over hele fyringsperioden. Det blir bekreftet ved å studere varmepanelene. Typisk energibruk til varmepanelene er 5 kWh om høsten og 12 kWh på kalde vinterdager.

Det er i tillegg logget tur- og returtemperatur til varmepanelene i det vannbårne systemet. Figur 54 gir en oversikt over varmesystemet i det vannbårne systemet fra SD-anlegget.



Figur 54: Oversikt over det vannbårne varmesystemet til bygget - Skjerm bilde fra SD-anlegg

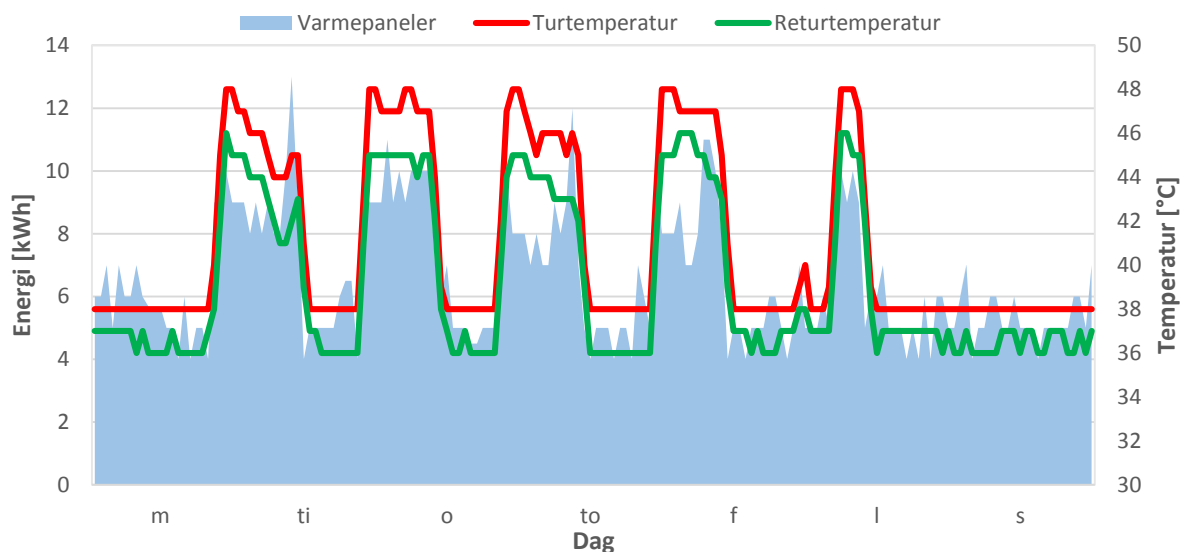
Figuren gir en oversikt over lavtemperaturanlegget. Her er det mulig å logge både tur- og returtemperaturer til varmepanelene ved å høyre klikke på de aktuelle temperaturene og velge *trend*, slik figur 55 viser.



Figur 55: Logging av tur- og returtemperaturer - Skjerm bilde fra SD-anlegg

Det er også mulig fra SD-anlegget og eksportere dataen (temperaturene) til Excel. Dette ble utført i denne oppgaven.

Figur 56 viser energibruken til varmepanelene for uke 11. På sekundæraksen vises tur- og returtemperatur på vannet til varmepanelene for samme uke, det vil si fra 10. mars til 16. mars 2014.



Figur 56: Energibruk til varmepanel samt tur- og returtemperatur til varmepanelene for uke 11

Figuren er kun vist for å vise energibruken til varmepanelene i sammenheng med tur-retur temperatur på vannet. Som det vises i figur 56, er temperaturene for turtemperaturen unøyaktig. Dette fordi det mangler noen målinger fra SD-anlegget, og er dermed årsaken til de konstante temperaturene.

På bakgrunn av lite tilgjengelig muligheter i Energologi. Det er kun mulig å måle total energibruk for alle varmepaneler per time, samt lite muligheter for tur-retur logging, samt mangel av data, er ikke varmepanelene studert i detalj videre i denne oppgaven.

8.5 Nærmere studie av luftmengdene i ventilasjonssystemet

I dette kapittelet vil luftmengdene i ventilasjonssystemet bli undersøkt. Ventilasjonssystemet i bygget ble beskrevet i kapittel 6.2. Studering av ventilasjonssystemet utføres ved at først logges luftmengdene til bygget fra SD-anlegget for fire ulike uker. Deretter sammenlignes dette med den ferdig kalibrerte simuleringsmodellen (simulering nr. 6). Deretter kalibreres denne simuleringsmodellen ytterligere, slik at luftmengdene i simuleringsmodellen stemmer med det reelle luftmengdene fra bygget. Den kalibrerte simuleringsmodellen mot luftmengder blir kalt *luftsimulering*, og brukes til å evaluere inneklime i sonene som inneklime studeres nærmere i, som forklart i kapittel 7.2, i kapittel 8.6.

Dermed regnes fortsatt simulering nr. 6, som den ferdig kalibrerte simuleringsmodellen for oppvarming og elforbruk. Dette fordi endring i ventilasjonssystemet kan føre til endringer av el til vifter, samt også endre driften av varmepanelene. Den kalibrerte simuleringsmodellen med luftmengder, *luftsimulering*, er kun for å undersøke luftmengdene i ventilasjonssystemet samt også evaluering av inneklime når luftmengdene er kalibrert med de loggete luftmengdene.

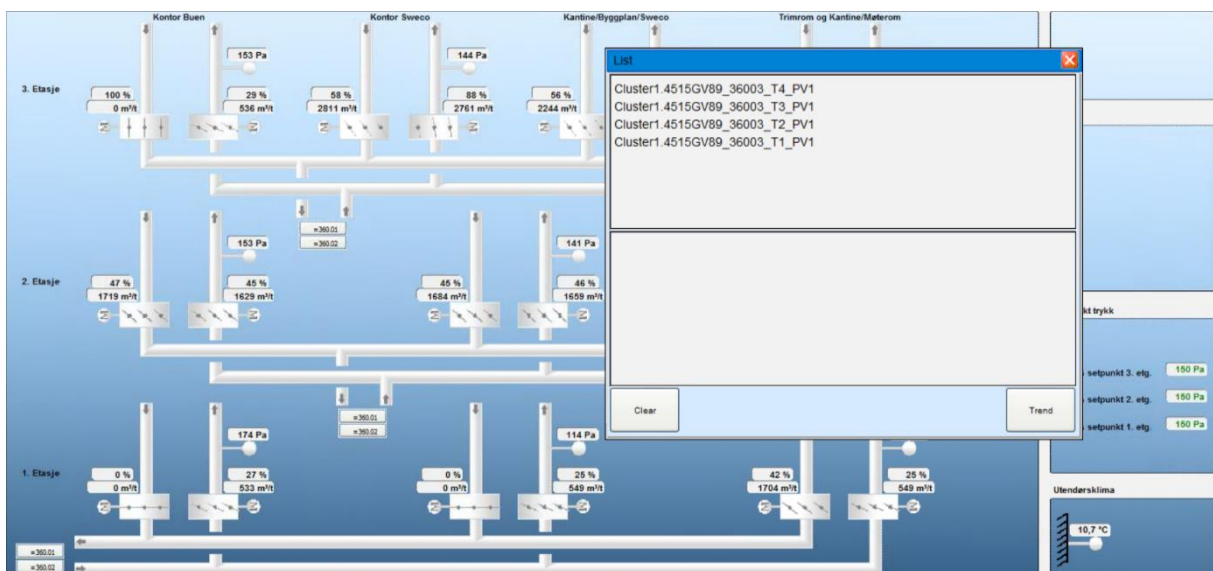
I simuleringsmodellen benyttes minste tillatte luftmengder fra NS 3701 i alle de klimatiserte sonene. Det vil si $6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ i driftstiden og $1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ utenfor driftstid. Tabell 19 viser sentrale parametere i simuleringen.

Tabell 19: Inndata for luftmengder fra kalibrert simuleringsmodell

	Hele bygget
Driftstid	06:00-18:00, hverdager
Luftmengde driftstid [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]	6
Luftmengde utenfor driftstid [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]	1
Andel drift av bygget [%]	83

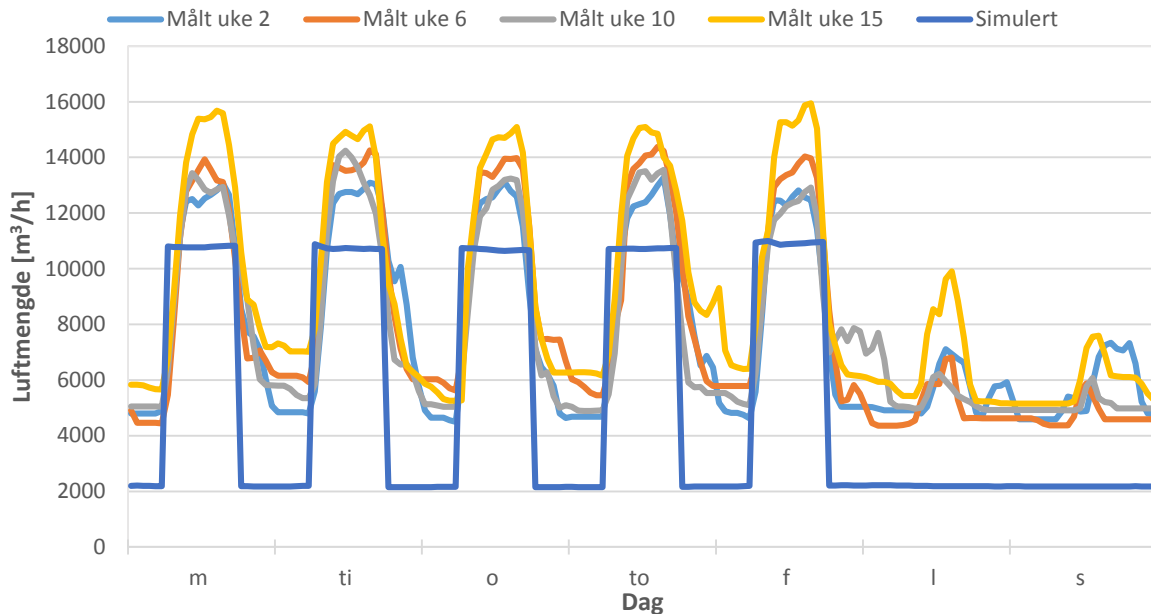
I loggingen fra SD-anlegget er det tatt utgangspunkt i fire uker. Uke 2, 6, 10 og 15. Luftmengdene er funnet fra SD-anlegget ved å høyre klikke på alle luftmengdene på tilluftsiden, for så å velge *trend*.

Figur 57 viser et skjermbilde fra SD-anlegget hvor de fire sonene i 3. etasje er valgt og klar til å logge. Dataen er videre eksportert til Excel.



Figur 57: Logging av luftmengder - Skjermbilde fra SD-anlegg

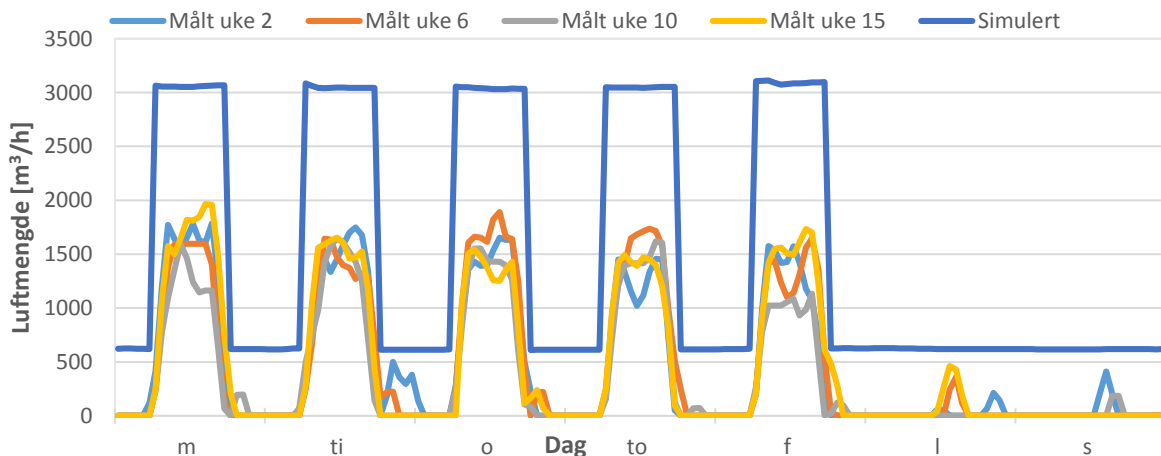
Figur 58 på neste side viser de totale luftmengdene for hele bygget. Målingene er hentet fra SD-anlegget, som forklart. I tillegg er luftmengdene for simuleringen for uke 2 inkludert i figuren. Luftmengdene for simuleringen i øvrige uker er tilnærmet like, det er derfor valgt å bare inkludere uke 2 fra simuleringen for å gjøre sammenligningen mer oversiktlig.



Figur 58: Sammenligning av luftmengder for hele bygget fra SD-anlegg og simulering

I følge systemskjema for VAV (vedlegg 2) er ventilasjonssystemet prosjektert til 24 290 m³/h. Vedlegg 2 viser at 75 % samtidighet tilsvarer 18 200 m³/h. Dette ble antatt som forventede luftmengder med full drift av bygget, som forklart i kapittel 6.2. 83 % belastning av fulldrift vil da si 20 160 m³/h av totalt prosjektert, mens 83 % av 75 % samtidighet tilsvarer ca. 15 100 m³/h. Som figur 58 viser, varierer de målte ukene fra 13 000 -16 000 m³/h, dette er dermed forventede resultater ut ifra virkelig drift av bygget. I tillegg ser man at det også er drift i helgene, men veldig redusert og variabelt. Ettersom ventilasjonsløsningen er behovsstyrt, vil alle dagene avhenge av den spesielle driften av sonen den aktuelle dagen. Uke 15 skiller seg ut med mye høyere luftmengder enn øvrige måneder. Dette kan tyde på at det var større aktivitet denne uka.

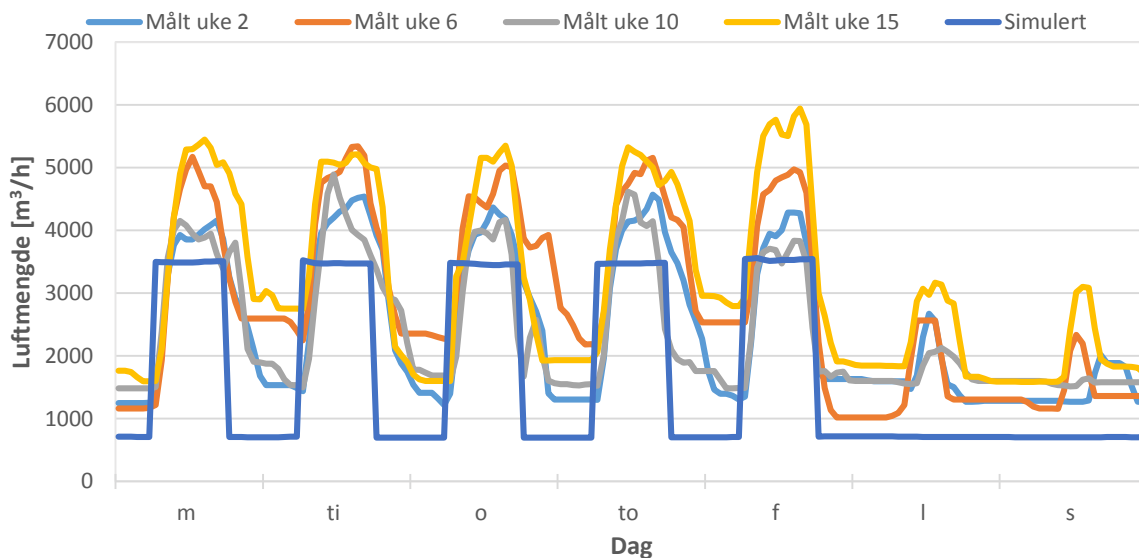
For å kalibrere simuleringmodellen slik at luftmengdene fra SD-anlegget stemmer med simuleringmodellen, studeres hver etasje for seg. Dette gir bedre oversikt over driften av den enkelte etasje. Figur 59 viser luftmengdene for 1. etasje de samme ukene.



Figur 59: Sammenligning av luftmengder for 1. etasje fra SD-anlegg og simulering

Her vises det at simuleringen er for høy. Blant annet er luftmengdene lik 0 utenfor driftstid. I følge NS 3701 er minste tilatte spesifikke luftmengde utenfor driftstid $1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. I tillegg er et lokale på 359 m^2 ledig i 1. etasje, som forklart i figur 46. Dette utgjør 39,5 % av bruksareal i 1. etasje. I tillegg er over 300 m^2 av 1. etasje et lager. Det ledige lokale på 359 m^2 , utgjør dermed 59,8 % av etasjen hvis man neglisjerer lageret. Dette har stor innvirkning på belastningen i etasjen, og kan forklare de lave luftmengdene fra SD-anlegget og samtidig at 83 % drift av ventilasjonen er for høyt for 1. etasje. Målingene fra SD-anlegget er ellers jevne. Driftstiden ser ut å være fra 06:30-16:30 på hverdagene og liten drift i helgene. 1. etasje inneholder blant annet resepsjon, personalrom og flere kontorer.

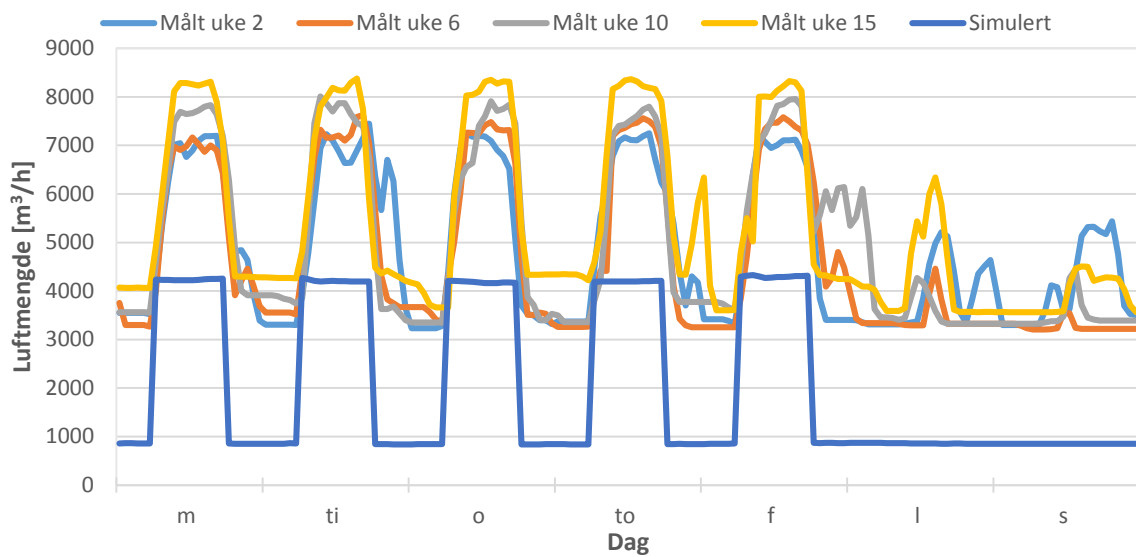
Figur 60 viser luftmengdene for 2. etasje.



Figur 60: Sammenligning av luftmengder for 2. etasje fra SD-anlegg og simulering

I 2. etasje er verdiene fra simuleringen for lave. Dette kan komme av at i 2. etasje er det tre kontorer på til sammen 36 m^2 som er ledig, i motsetning til 1. etasje hvor tallet er 359 m^2 , som vist i figur 46. 36 m^2 utgjør ca. 4 % av bruksarealet for 2. etasje, og dermed er 83 % drift belastningen for lav i denne etasjen. Etasjen består hovedsakelig av kontoer, møterom og kontorlandskap. Målingene og dermed driften er svært variabel for 2. etasje, noe det behovsstyrte målingene viser. Normal driftstid er fra 07-18 og ikke 6-18 som i simuleringen. I tillegg er det større andel drift i helgene, men igjen svært variabel både i driftstid og belastning. Legger også merke til at luftmengden utenfor driftstid ligger på $1400 \text{ m}^3/\text{h}$ i målingene mot ca. $800 \text{ m}^3/\text{h}$ i simuleringen.

Figur 61 viser luftmengdene for 3. etasje.



Figur 61: Sammenligning av luftmengdene for 3. etasje fra SD-anlegg og simulering

Igjen er de simulerte verdiene alt for lave. I 3. etasje er det samtidig svært ujevn drift. Etasjen består blant annet av et ledig lokale på 123 m², som vist i figur 46. Dette utgjør ca. 15 % av bruksareal for 3. etasje. Denne etasjen inneholder blant annet trimrom, konferanserom og kantine. Alle disse rommene bidrar til variabel belastning og driftstid. Et eksempel er trening etter arbeidstid, konferanser eller bespisning i kantinen etter arbeidstid og i helgene. Dette kan være årsaker til de forlengende driftstidene som figur 61 viser, spesielt tirsdag, torsdag og fredag. 3. etasje har også størst aktivitet i helgen av etasjene. I tillegg består etasjen av blant annet kontorer, møterom og kontorlandskap. Alle disse rommene fører til ujevn driftstid slik figuren viser. Driftstiden er som for 2. etasje fra 7-18 på hverdagene og svært variabel i helgene. Luftmengdene utenfor driftstid ligger omtrent 3,5 ganger høyere i målingen enn simuleringen. I denne etasjen holder det ikke å benytte seg av minste tillatte luftmengder fra NS 3701. I videre kalibrering vil luftmengdene bli endret.

8.5.1 Kalibrering av simuleringsmodell mot luftmengder fra SD-anlegg

Ved å studere hver etasje for seg, konkluderes det med at man hvis man skal kalibrere modellen med riktig luftmengder, må hver etasje kalibreres individuelt. Dette fordi dette er et bygg med mange uavhengige brukere og rom og dermed ulikt bruksmønster. Det vil derfor ikke være tilstrekkelig å sette all drift til 83 %. For eksempel er det ledig lokale på 359 m² i 1. etasje, mens tilsvarende tall for 2. etasje er 36 m².

For å kalibrere simuleringsmodellen mot målingene, justeres først og fremst parameteren spesifikke luftmengder (gjennomsnittlige) samt også belastningen av etasjen.

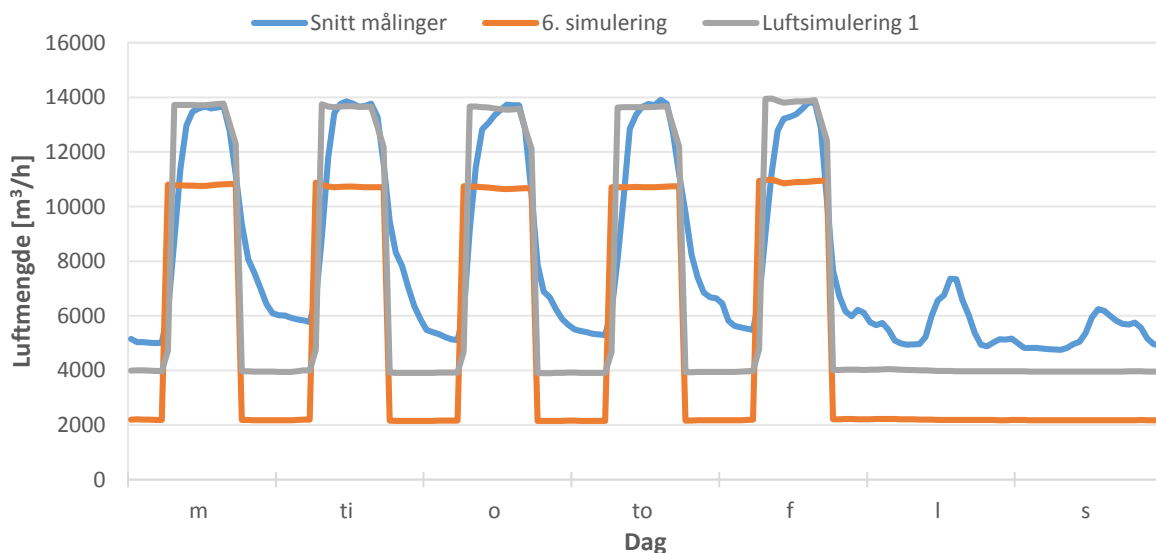
Kalibreringsprosessen følger fortsatt figur 7, bare at modellen allerede er etablert. For 2. etasje økes de spesifikke luftmengdene til henholdsvis 7 m³/(m²·h) i driftstiden. Dette er de minste spesifikke luftmengdene i driftstiden for kontorbygning fra NS 3031. For 3. etasje økes luftmengdene til 10 m³/(m²·h) i driftstiden og 3 m³/(m²·h) utenfor driftstiden. Dette er

spesifikk luftmengde i driftstiden og utenfor for kontorbygning fra NS 3031. Driftstiden endres for alle etasjene på bakgrunn av datagrunnlag fra SD-anlegget. Tilslutt endres også andel av etasjen som er i drift. Det vil altså si belastningen av etasjen. Ettersom så store andel (%) av 1. etasje er ledig i forhold til 2. og 3. etasje, blir denne andelen høyere. I tabell 20 vises endringene fra 6. simulering til luftsimulering 1.

Tabell 20: Endring av parametere fra 6. simulering til luftsimulering 1

	6. simulering	Luftsimulering 1		
	Hele bygget	1. etasje	2. etasje	3. etasje
Driftstid	06:00-18:00	06:30-16:30	07:00-18:00	07:00-18:00
Luftmengde driftstid [m ³ /(m ² ·h)]	6	6	7	10
Luftmengde utenfor driftstid [m ³ /(m ² ·h)]	1	0	2	3
Andel av etasjen i drift [%]	83	40	95	90

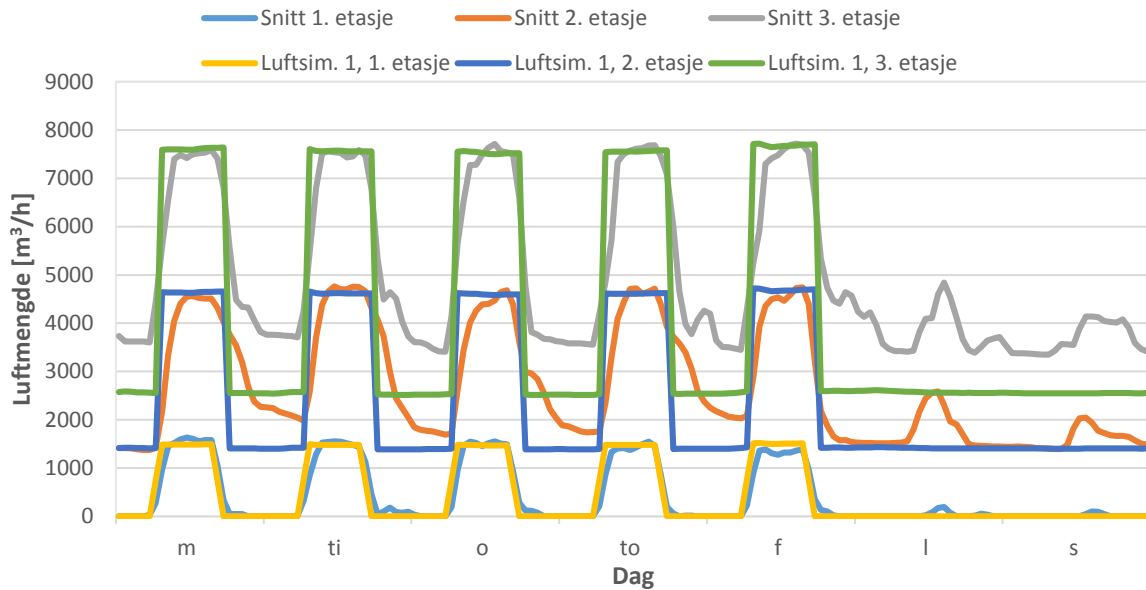
Figur 62 viser snittet av luftmengdene av uke 2, 6, 10 og 14 samt 6. simulering og luftsimulering 1. Figuren gjelder hele bygget.



Figur 62: Sammenligning av luftmengder for hele bygget fra SD-anlegg, 6. simulering og luftsimulering 1

Ved å øke luftmengdene i 2. og 3. etasje samt også øke belastningen i disse etasjene, ser man at de simulerte verdiene kommer opp på nivå med snittet av målingene. Legger merke til at utenfor driftstiden er fortsatt nivået i målingene høyere enn i simuleringen, og det er fortsatt ikke simulert drift i helgene.

Figur 63 viser luftmengdene for hver etasje.



Figur 63: Sammenligning av luftmengder for hver etasje fra SD-anlegg, 6. simulering og luftsimsimulering 1

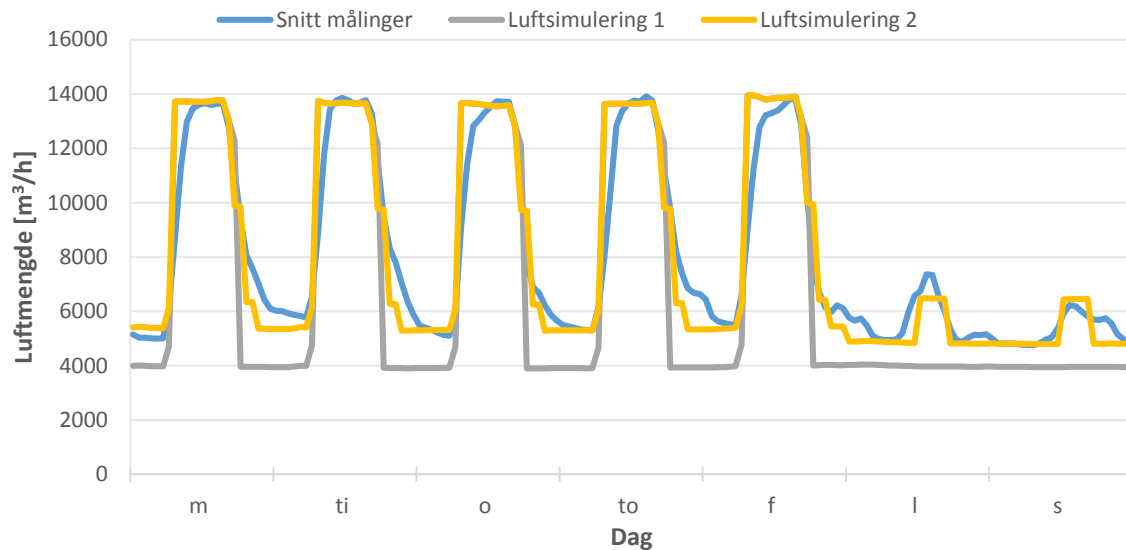
Luftsimsimulering 1 er en stor forbedring fra innledende simulering (6. simulering). 1. etasje regnes nå som ferdig kalibrert. Det viser seg at 2. etasje har lenger driftstid på hverdage enn til klokka 18:00. Dette kommer trolig av at noen kontorer og møterom brukes på kveldstid. For 3. etasje gjelder dette konferanserom, trimrom og kantine i tillegg til kontorer og kontorlandskap. Både 2. og 3. etasje har drift i helgene som nå legges inn i luftsimsimulering 2.

I luftsimsimulering 2 er det gjort tilpasninger slik at luftmengdene stemmer med snittet. Luftmengdene utenfor driftstiden økes (se tabell 21), mens luftmengder og belastning i driftstiden er uforandret. I tillegg legges det inn drift i helgen. Disse verdiene er tilpasset å passe inn på bakgrunn av SD-anlegget, og følger ikke lenger noe standardverdier. Dette gjelder også den reduserte driftstiden om kveldene. 1. etasje er uforandret.

Tabell 21: Endring av parametere fra luftsimsimulering 1 til luftsimsimulering 2

	Luftsimsimulering 1		Luftsimsimulering 2	
	2.etasje	3.etasje	2.etasje	3. etasje
Luftmengde utenfor driftstid [m ³ /(m ² ·h)]	2	3	3	4
Driftstid med belastning fra luftsimsim.1	07:00-18:00	07:00-18:00	07:00-17:00	07:00-17:00
Redusert drift, hverdager	-	-	17:00-19:00, 80 % 19:00-21:00, 60 % 21:00-24:00, 40 %	17:00-19:00, 70 %
Driftstid helg og andel drift	-	-	12:00-17:00, 45 %	12:00-17:00, 50 %

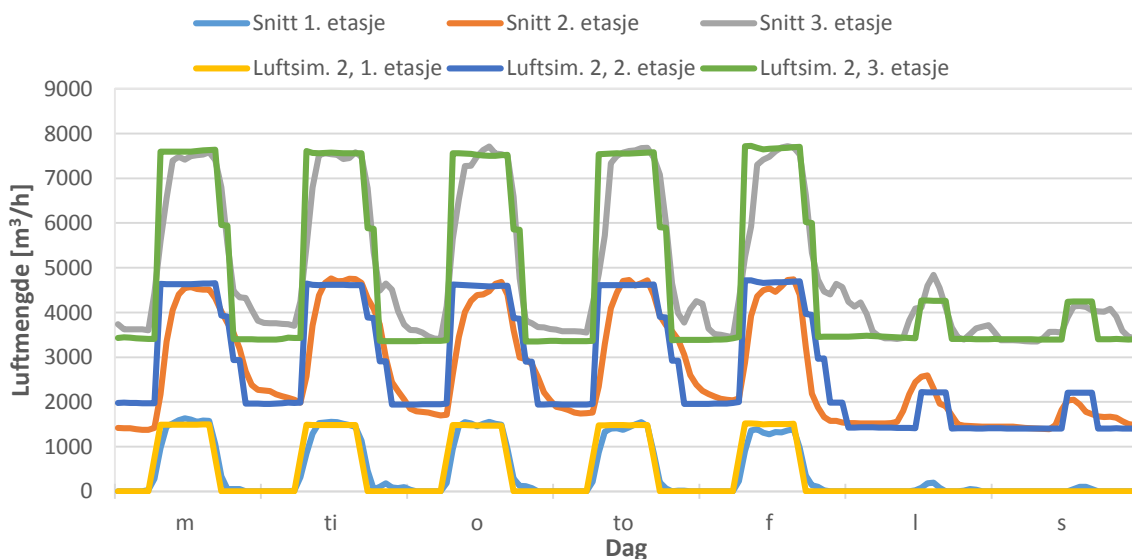
Figur 64 viser sammenligning av snittet av målingene fra SD-anlegget, luftsimulering 1 og luftsimulering 2.



Figur 64: Sammenligning av luftmengder for hele bygget fra SD-anlegg, luftsimulering 1 og luftsimulering 2

Modellen er nå ferdig kalibrert med hensyn på luftmengder etter luftsimulering 2. Figur 64 viser at luftsimulering 2 stemmer godt overens med målingene fra SD-anlegget både i driftstiden og utenfor driftstiden. Samtidig legger man merke til at simuleringen når maks luftmengde kort tid etter start av driftstiden. Dette er fordi ventilasjonssystemet er behovsstyrt, og det er simulert full tilstedeværelse av personer(drift) umiddelbart i det driftstiden starter. I virkeligheten kommer trolig ikke alle på jobb samtidig, derfor tar det noen timer før luftmengdene når maks i målingene. Dette er samme årsak til redusert drift i lunsjtiden, noe som ikke er tatt hensyn til i simuleringen.

Luftmengdene per etasje i den ferdige modellen er vist i figur 65.



Figur 65: Sammenligning av luftmengder per etasje fra SD-anlegg og luftsimulering 2

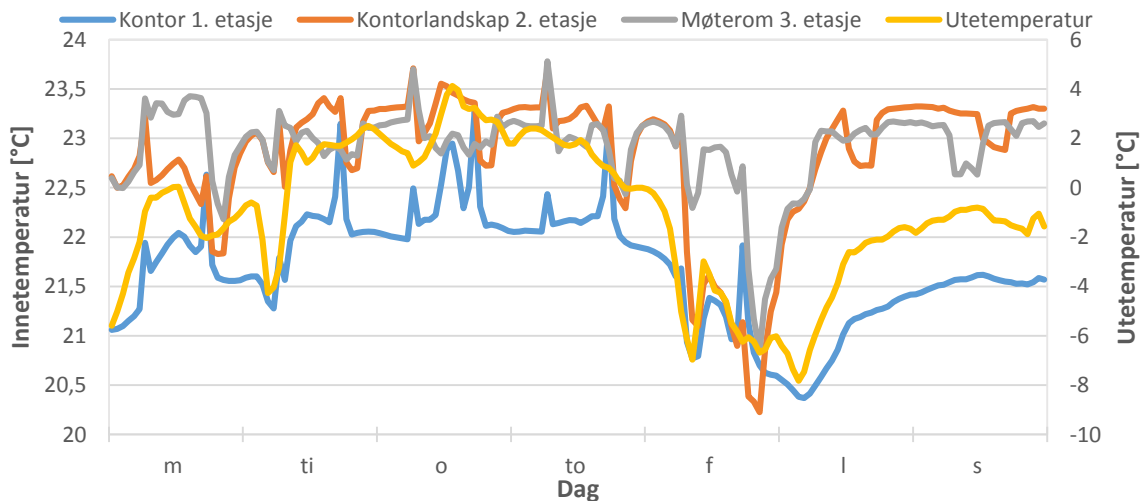
Figuren viser at luftmengdene fra simuleringen for 2. og 3. etasje nå stemmer godt overens med målingene. Det er som sagt variabel bruk, siden ventilasjonen er behovsstyrt. Utenfor driftstid er nå på riktig nivå.

Denne modellen regnes nå som ferdig kalibrert og klar for å evaluere inneklime. De totale luftmengdene har nå økt for luftsimulering 2 i forhold til simulering 6. Dette fører dermed til økt energibruk til vifter. Luftsimulering 2 brukes kun til å undersøke ventilasjonssystemet og evaluering av inneklime. Det er derfor fortsatt simulering nr. 6 som regnes som den ferdig kalibrerte modellen mot energibruk til oppvarming og elforbruk.

8.6 Inneklimeevaluering

Inneklime blir evaluert i EnergyPlus ved Fanger og adaptiv komfortmodell basert på NS 15251. Disse metodene er beskrevet i kapittel 5.6.1 og 5.6.2. Sonene som studeres er kontor i 1. etasje, kontorlandskap i 2. etasje og møterom i 3. etasje. Inndata for sonene i inneklimeevalueringen er nøyere beskrevet i kapittel 7.2. Videre i dette kapittelet blir det først studert operativ temperatur i sonene for vinter- og sommerforhold. Deretter blir inneklime evaluert ved Fanger og NS 15251. Til slutt logges temperaturer for tilsvarende rom/soner fra SD-anlegget. Simuleringsmodellen som brukes er luftsimulering 2.

Figur 66 viser den operative temperaturen i sonene for uke 2. Utetemperatur er vist på sekundæraksen. Uke 2 er valgt som vinterforhold.

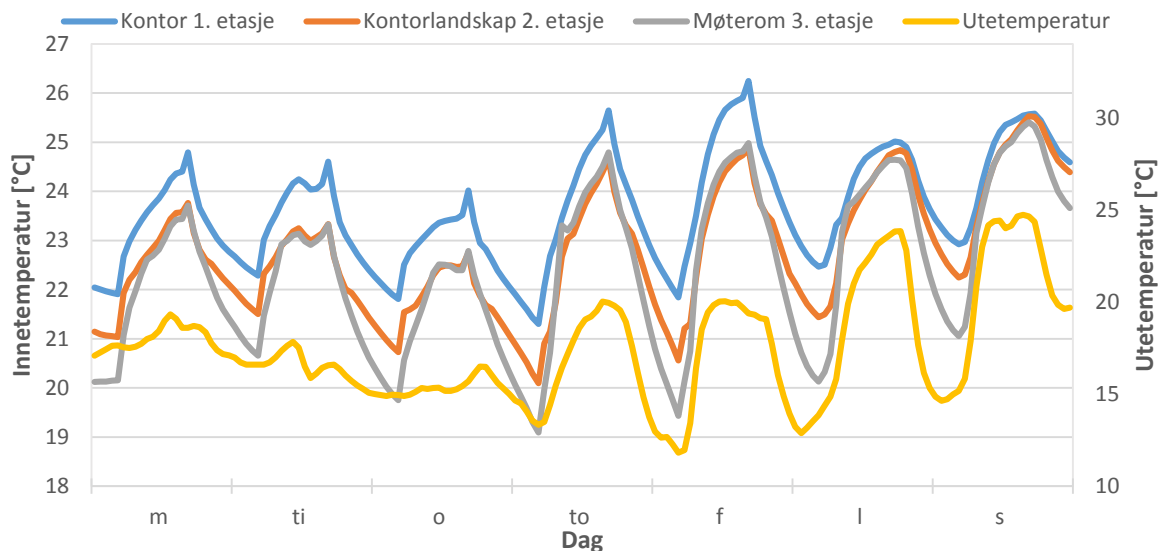


Figur 66: Operativ temperatur vinterforhold

Som det fremgår av figur 66, vil temperaturen i møterommet og kontorlandskapet være høyere enn kontoret i 1. etasje. Temperaturene i møterommet og kontorlandskapet varierer typisk mellom 22,5 °C og 23,5 °C. I følge NS 15251 er minimumstemperaturen i kontor og kontorlandskap for vinterforhold 21 °C for kategori I [40]. Dette er tilfredsstillt for hele uka i driftstiden. Temperaturen i kontorlandskapet synker under 20,5 °C fredag kveld etter et fall i utetemperaturen på ca. 8 °C i løpet av et døgn. I kontoret i 1. etasje varierer temperaturen mellom 21 °C og 23 °C. Dette er også innenfor kategori I i NS 15251. Det vil si at kategori I er tilfredsstillt for alle timene i driftstiden i uke 2 for alle sonene. For vinterforhold gjelder kun

minimumstemperatur i NS 15251. Temperaturene for vinterforhold viser at varmepanelene er tilstrekkelig dimensjonert i forhold til isoleringen av bygget og lekkasjetall. Temperaturene indikerer at inneklima vil være godt ved vinterforhold. Fanger komfortmodell tar derimot hensyn til om temperaturen er for varm eller kjølig. Mer om Fanger evalueringen i kapittel 8.6.1.

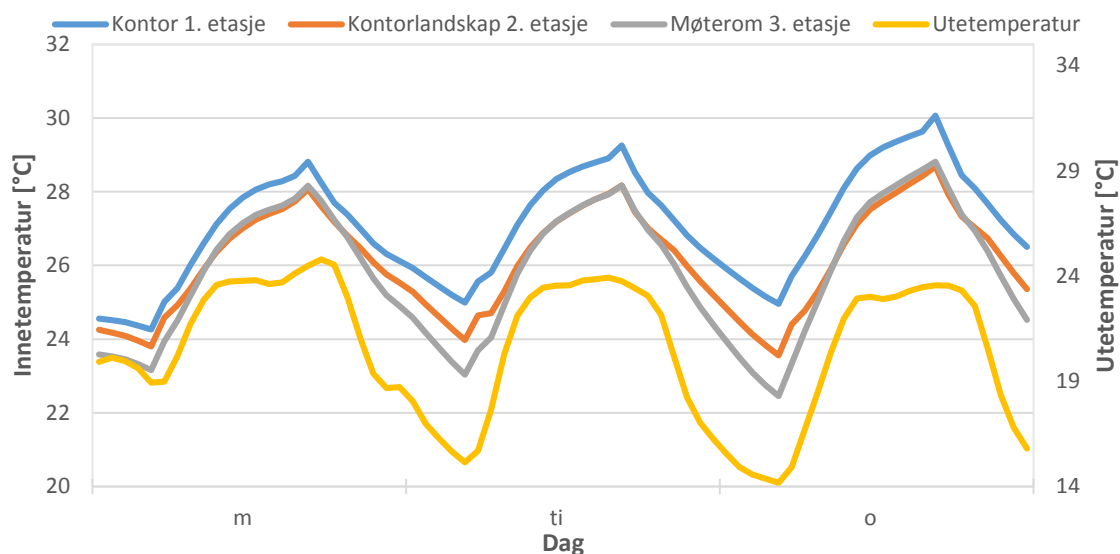
Figur 67 viser den operative temperaturen i sonene for uke 29. Utetemperatur er vist på sekundæraksen. Uke 29 er valgt som en normal sommeruke



Figur 67: Operativ temperatur sommerforhold

Det er som tidligere nevnt ikke installert kjøling i simuleringsmodellen. Om sommeren er ikke varmepanelene på, noe som fører til at temperaturen varierer mer i løpet av driftstiden. Innetemperaturen varierer som følge av utetemperaturen og driften av rommet. I figur 67 vises dette tydelig. Fra mandag til onsdag er utetemperaturen relativt konstant (svakt synkende). Her varierer innetemperaturen i sonene på grunn av driften av rommet. Torsdag til fredag øker utetemperaturen, noe som igjen fører til at innetemperaturen øker ytterligere. Utetemperaturen øker ytterligere på lørdag og søndag, men dette er utenfor driftstiden og dermed avgir ikke de interne lastene like mye varme, så dermed økes ikke innetemperaturen ytterligere. Fra NS 15251 er kravene for kategori I for kontor og kontorlandskap maks 25,5 °C. Maks temperatur for kategori II er 26 °C. Dette gjelder ved kjøling [40]. For uke 29 vil møterommet og kontorlandskap tilfredsstillende kategori I i driftstiden, mens temperaturen i kontoret i 1. etasje stiger over 26 °C i løpet av fredagen. Dette er imidlertid en varm sommerdag. Dette indikerer at inneklima vil være godt for en normal sommeruke, men at temperaturene kan bli høye ved varme sommerdager uten ekstra tiltak som åpning av vinduer. Dette er også viktig å påpeke at det ikke er installert kjølebatteri.

Som figur 68 viser, vil det oppstå overoppheting i sonene på varme sommerdager. Figur 68 viser de tre første dagene av uke 30. Utetemperatur er vist på sekundæraksen.



Figur 68: Operativ temperatur ved varme sommerdager

Figur 68 viser at det vil oppstå overoppheting på varme sommerdager. Operativ temperatur i kontoret i 1. etasje når 30 °C på onsdagen. Sonene er imidlertid simulert uten installert kjøling. Ekstra tiltak som å åpne vinduer og døgkontinuerlig ventilasjon vil også kunne senke temperaturen i sonene [8]. Åpning av vinduer kan sammenlignes med å øke infiltrasjonen i bygget.

Videre i dette kapittelet vil inneklimate bli evaluert for hele året ved Fanger komfortmodell og for sommerforhold ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251.

8.6.1 Evaluering av inneklimate ved Fanger komfortmodell

Ved årssimulering er det utført statistisk analyse ved Fanger komfortmodell for å vise antall timer i driftstiden som tilfredsstillende de ulike kategoriene. Inneklimate er kun evaluert i driftstiden. Tabell 22 viser antall driftstimer i året for de tre ulike sonene etter kalibreringen mot luftmengdene, der driftstiden blant annet ble endret. For kontorlandskap og møterommet er belastningen og drift redusert til 70 % de to siste timene av driftstiden, fra klokka 17-19, som forklart i tabell 21.

Tabell 22: Oversikt over driftstimer per år i sonene ved evaluering av inneklimate med Fanger

	Driftstid per dag [timer]	Driftsdager per år [dager]	Driftstid per år [timer]
Kontor 1. etasje	9	261	2 349
Kontorlandskap 2. etasje	12	261	3 132
Møterom 3. etasje	12	261	3 132

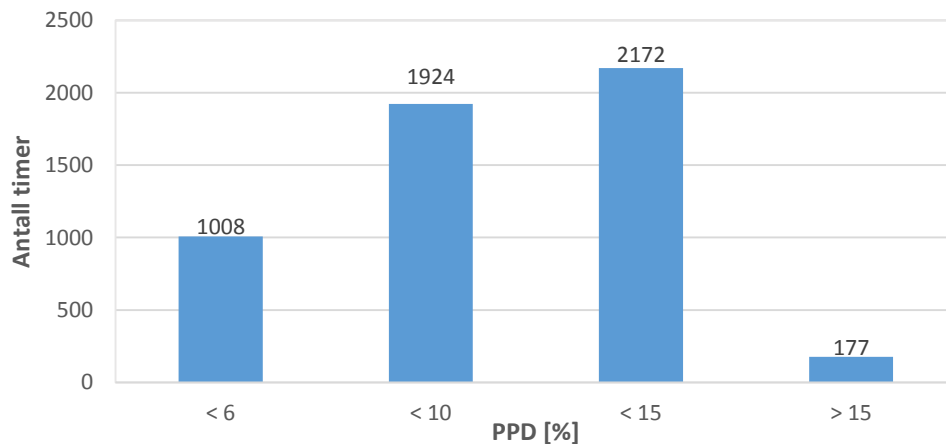
Tabell 23 viser sammenhengen mellom de ulike kategoriene for inneklima og Fanger PPD.

Tabell 23: Oversikt over de ulike kategoriene ved Fanger

Kategori	PPD %
Kategori I	< 6
Kategori II	< 10
Kategori III	< 15
Kategori IV	> 15

Som tabell 22 indikerer, er det valgt å bare å bare studere inneklima på hverdagene, mandag-fredag. Dette fordi det er svært variabel drift i helgene i 2. og 3. etasje og nesten ikke drift i 1. etasje.

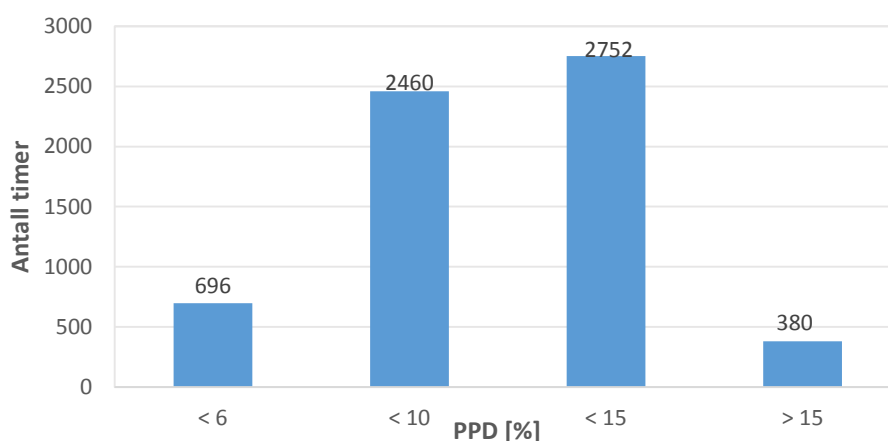
Figur 69 viser resultatene fra Fanger komfortmodell ved kontoret i 1. etasje



Figur 69: Inneklima for kontor 1. etasje ved Fanger

Driftstiden i inneklima simuleringen er 2 349 timer per år for kontor i 1. etasje. Resultatene her viser at i kontoret i 1. etasje er 1 008 timer (43 %) av driftstiden PPD under 6 %. Dette vil si at kategori 1 i tabell 23 er tilfredsstilt. Kategori II, som regnes som normalt forventningsnivå i nye og rehabiliterte bygninger, er tilsvarende resultat 1 924 timer (82 %). Kategori III, som regnes som akseptabelt, moderat forventningsnivå, er resultatet 2 172 timer (92,5 %). Kategori IV bør kun godtas i begrenset tid av året, er resultatet 177 timer (7,5 %). Dette gjelder hovedsakelig om sommeren, og da først og fremst overoppheting. Det er ikke installert kjøling i simuleringmodellen, og det oppstår dermed overoppheting på sommeren som vist i figur 68. Dette kan reduseres ved døgkontinuerlig ventilasjon og åpning av vinduer. Åpning av vinduer fører til økt infiltrasjon.

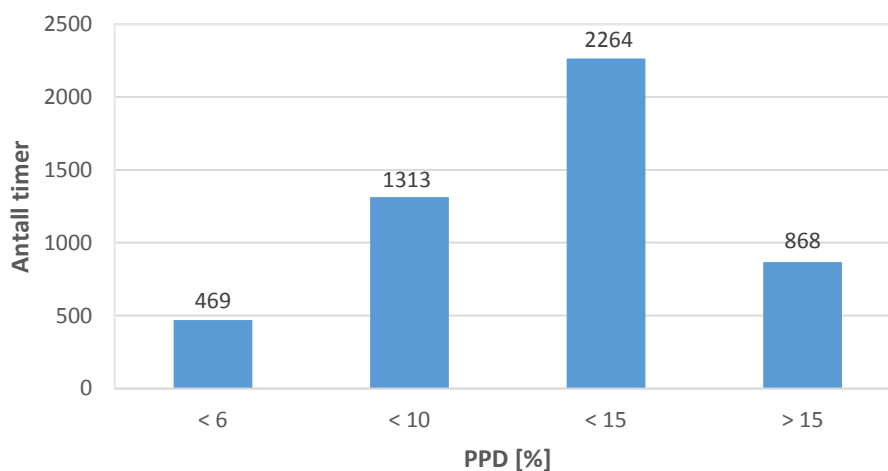
Tilsvarende resultater for kontorlandskap i 2. etasje er vist i figur 70.



Figur 70: Inneklima for kontorlandskap i 2. etasje ved Fanger

For kontorlandskapet i 2. etasje er driftstiden per år 3 132 timer. Resultatene viser her at kategori I, II og III er tilfredsstilt i henholdsvis 22 %, 78,5 % og 88 %. 12 % av tida faller inn under kategori IV. Som ved kontor i 1. etasje skyldes dette overoppheting på varme sommerdager.

Resultater for møterom i 3. etasje er vist i figur 71.



Figur 71: Inneklima for møterom i 3. etasje ved Fanger

For møterommet i 3. etasje er driftstiden også 3 132 timer. Resultatene viser her at kategori I, II og III er tilfredsstilt i henholdsvis 15 %, 42 % og 72 %. 28 % av tida faller inn under kategori IV. Denne sonene er sammenslåing av to møterom fra bygget, men simulert som en sone. Det er simulert med full drift og 15 personer fra klokka 7-17. Fra klokka 17-19 er belastningen og personer redusert til 70 % av fulldrift. Slik at resultatene her blir worst-case-scenario. Som vist i figur 66, varierer temperaturen mer i møterommet enn de andre sonene ved vinterforhold. Dette sammen med overoppheting om sommeren fører til den høyere andelen timer i kategori IV. Et møterom har vanligvis ikke fulldrift hele dagen, samt at det ofte er variabelt med personer tilstede. Det er derfor naturlig at resultatene for møterommet

blir dårligere enn kontor og kontorlandskap, ettersom persontettheten er mye lavere i disse sonene enn møterommet.

8.6.2 Evaluering av inneklima ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251

Det er også utført statistisk analyse ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251. Som ved Fanger, er det analysert hvor mange timer av driftstiden som tilfredsstillende de ulike kategoriene. EnergyPlus definerer for hver time om operativ temperatur tilfredsstillende de ulike kategoriene fra NS 15251, og hva optimal operativ temperatur er ut fra gjennomsnittlig utetemperatur, Θ_{mm} . Dermed er optimal operativ temperatur konstant per dag. Denne modellen gjelder bare når $10\text{ }^{\circ}\text{C} < \Theta_{mm} < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ for øvre grense og $15\text{ }^{\circ}\text{C} < \Theta_{mm} < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ for nedre grense, det vil si ved sommerforhold. For Mandal 2011 klima tilsvarer dette 119 dager i året. For kontorlandskap i 2. etasje og møterom i 3. etasje er belastningen og driften redusert til 70 % de to siste timene i driftstiden.

Tabell 24: Oversikt over driftstimer per år i sonene ved evaluering av inneklima med adaptiv komfortmodell basert på NS 15251

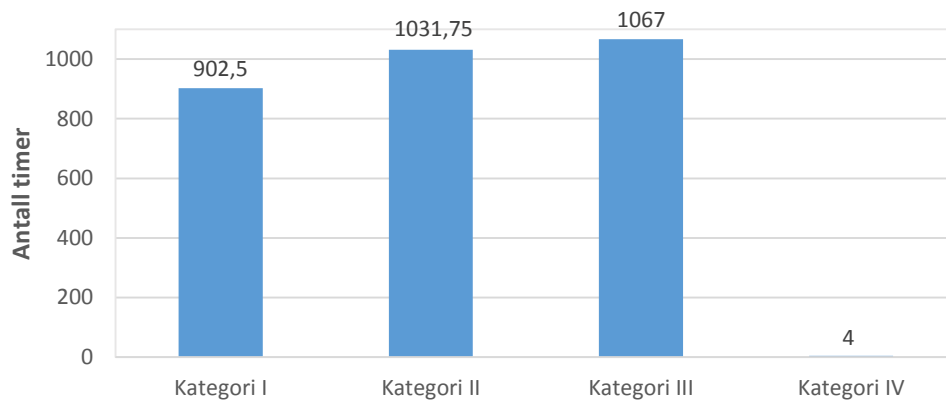
	Driftstid per dag [timer]	Driftsdager per år [dager]	Driftstid per år [timer]
Kontor 1. etasje	9	119	1 071
Kontorlandskap 2. etasje	12	119	1 428
Møterom 3. etasje	12	119	1 428

Tabell over kategorier i adaptiv komfortmodell basert på NS 15251. Legg merke til at kategoriene er ulike definert enn ved Fanger.

Tabell 25: Oversikt over de ulike kategoriene ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251

Kategori	Andel aksepterer forholdene
Kategori I	90 %
Kategori II	80 %
Kategori III	65 %
Kategori IV	$\geq 65\text{ }%$

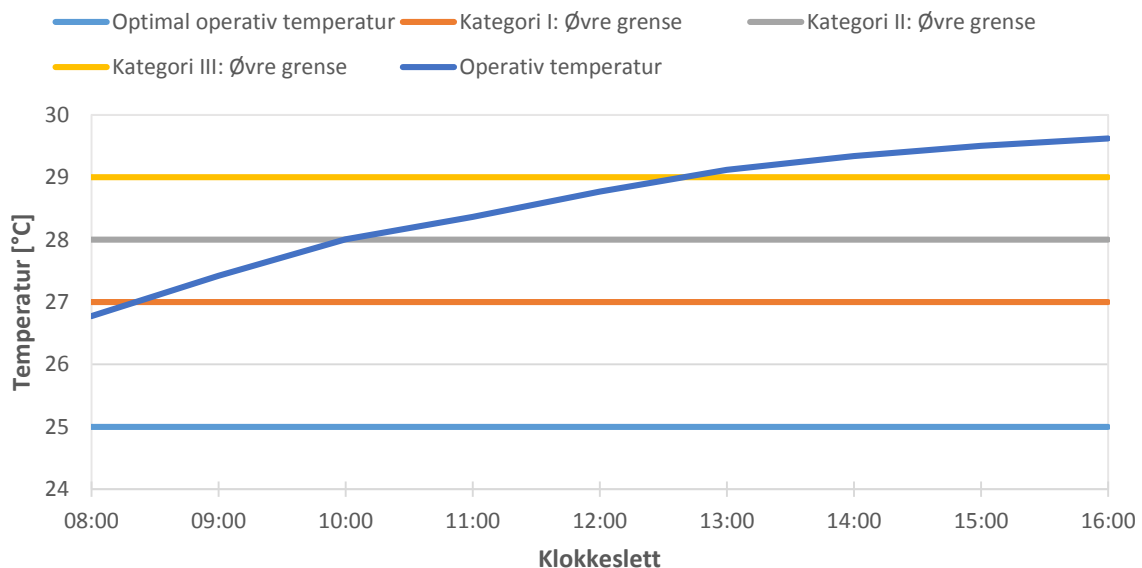
Statistisk analyse ved komfortmodellen basert NS 15251 for kontor i 1. etasje er vist i figur 72.



Figur 72: Inneklima for kontor i 1. etasje ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251

For kontoret i 1. etasje er driftstiden 1 071 timer i året ved komfortmodellen basert på NS 15251. Resultatene viser at kategori I, II og III er tilfredsstillende i henholdsvis 84,3 %, 96,3 % og 99,6 %. Det vil si at kun 4 timer eller 0,4 % av tiden havner i kategori IV. Dette er svært bra resultater. Ved Fanger tilsvarer kategori IV PPD på mer enn 15 %, mens i komfortmodellen basert på NS 15251 betyr kategori IV at færre enn 65 % aksepterer forholdene. Dette er en viktig årsak til at andelen i kategori IV er høyere ved denne komfortmodellen enn Fanger. Resultatene her viser at inneklima er tilfredsstillende.

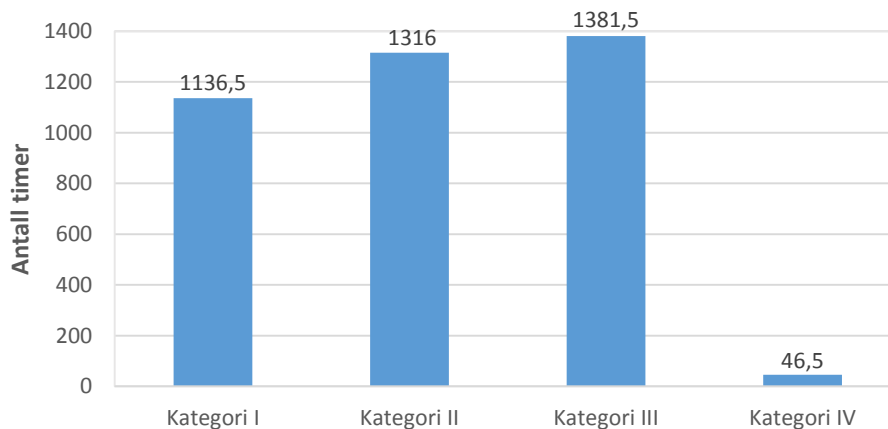
Figur 73 viser temperaturforløpet for kontoret i 1. etasje den 3. august.



Figur 73: Operativ temperatur 3. august med grenser for de ulike kategoriene for kontor i 1. etasje

Her oppstår det overoppheting. Optimal operativ temperatur denne dagen er 25 °C. Laveste operative temperatur er derimot 26,7 °C. Figur 73 viser hvor de fire timene som er innenfor kategori IV oppstår, nemlig fra klokka 13:00 den 3. august. Samtidig viser figuren også at kun de første 15 minuttene av denne dagen tilfredsstiller kategori I.

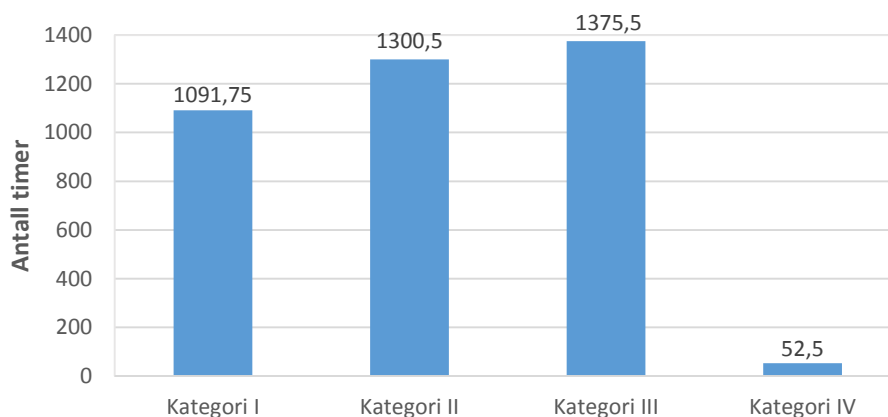
For kontorlandskap i 2. etasje blir fordelingen som vist i figur 74.



Figur 74: Inneklima for kontorlandskap i 2. etasje ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251

For kontorlandskapet i 2. etasje er driftstiden 1 428 timer i året ved NS 15251 i modellen. Resultatene viser at kategori I, II og III er tilfredsstilt i henholdsvis 79,6 %, 92,2 % og 96,7 %. Det vil si at 46,5 timer eller 3,3 % havner i kategori IV.

Tilsvarende resultater for møterommet er vist i figur 75.



Figur 75: Inneklima for møterommet i 3. etasje ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251

For møterommet i 3. etasje er driftstiden 1 428 timer i året ved NS 15251 i modellen. Resultatene viser at kategori I, II og III er tilfredsstilt i henholdsvis 76,4 %, 91 % og 96,3 %. Det vil si at 52,5 timer eller 3,7 % av driftstiden havner i kategori IV. Som ved Fanger kommer møterommet dårligst ut i inneklima evalueringen. Det er likevel bra resultater at kun 52,5 timer havner i kategori IV gjennom en hel sommer med inndataen som er brukt for møterommet i simuleringen.

8.6.3 Diskusjon av inneklima

Som det er vist i figur 68, vil det oppstå overoppheting på varme sommerdager i alle de studerte sonene. En vanlig sommeruke vil dette imidlertid ikke være noe problem. Figur 67 viser at kontoret i 1. etasje riktignok vil være utenfor kategori I og II i noen timer på fredagen i uke 30. Det er verdt å merke seg at det er simulert uten ekstra tiltak som kan redusere

temperaturen. Eksempler på dette er kjølebatteri, døgnkontinuerlig ventilasjon og øking av infiltrasjonen ved å åpne vinduer. Vintersimuleringen viser at alle sonene har temperatur høyere enn 21 °C i driftstiden. Dette tilsvarer kategori I fra NS 15251, og viser at varmepanelene er tilstrekkelig dimensjonert i forhold til isolering og lekkasjetall.

Som forklart i kapittel 2.3, er ytterkonstruksjoner med lavt varmetap og lite luftlekkasjer, sentralt i passivhuskonseptet. Dette hindrer termiske problemer som kaldras og trekk, og reduserer dermed sammenhengen mellom inne- og uteklima. Det reduserte varmetapet kan imidlertid føre til at sommertemperaturer blir høyere i passivhus enn i bygg med dårligere isolasjon. Dersom de interne varmetilskuddene og solinnstrålingen alene er høy nok til å skape over temperatur, selv ved lav utetemperatur, vil forskjellen mellom passivhus og bygg med dårligere isolasjon være større. Det påpekes samtidig at det ikke er nevneverdig forskjell på isolasjon i passivhus og TEK 10. Dette vil først og fremst gjelde mot eldre bygg [53].

De viktigste faktorene for inneklimate i passivhus om sommeren er som nevnt i kapittel 2.4: effektiv vindusutlufting, solskjerming, helst lite termisk masse (varmelagrede materialer/konstruksjoner) og et oppvarmingssystem som responderer raskt og presist til endringer i belastning og temperatur [21].

Resultatene fra evalueringen mot Fanger og adaptiv komfortmodell basert på NS 15251 viser at inneklimate i bygget er godt. Kategori II, som regnes som anbefalt nivå for nye bygninger, er tilfredsstilt fra 42-82 % av driftstiden i sonene ved Fanger og fra 91-96 % av driftstiden ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251. Møterommet kommer dårligst ut i begge evalueringene, mens kontoret best. Kategori III, som regnes som akseptabel og anbefalt i eksisterende bygninger, er tilsvarende resultater ved Fanger 72-92 % av driftstiden og ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251 96,3-99,6 % av driftstiden. Resultatene for kontor og kontorlandskap er gode som tallene indikerer. Møterommet derimot kommer dårlig ut ved evalueringen med Fanger. Dette fordi det er simulert med høy belastning av personer gjennom driftstiden. Dette fører til høy persontetthet i sonen møterom i forhold til kontorlandskap og kontor. Persontettheten i møterommet er 0,272 person/m², mens tilsvarende tall for kontor og kontorlandskap er 0,093 person/m² og 0,102 person/m². Resultatene for møterommet er derimot gode ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251. Dette er på grunn av de to evalueringene har ulik definisjon av de forskjellige kategoriene. Dette betyr at det ikke nødvendigvis oppstår overoppheting i møterommet selv om Fanger resultatene tilsier dårlig inneklimate, ettersom temperaturene for møterommet er tilfredsstilt i henhold til NS 15251-modellen.

8.6.4 Logging av temperaturer fra SD-anlegg

I SD-anlegget er det også mulig å logge temperaturer. Som forklart i kapittel 7.2, ble temperaturer fra figur 21 logget i SD-anlegget. Det er valgt ut to ulike uker, nemlig uke 2 og 12. Dette for å vise mulighetene til dokumentering fra bygget. Det er imidlertid ingen hensikt å sammenligne de loggete temperaturene med de simulerte temperaturene, da de loggete temperaturene varierer stort hver dag. Temperaturen varierer blant annet på grunn av varierende tilstedeværelse og drift av rommet. Dette kan til en viss grad korrigeres inn i simulering.

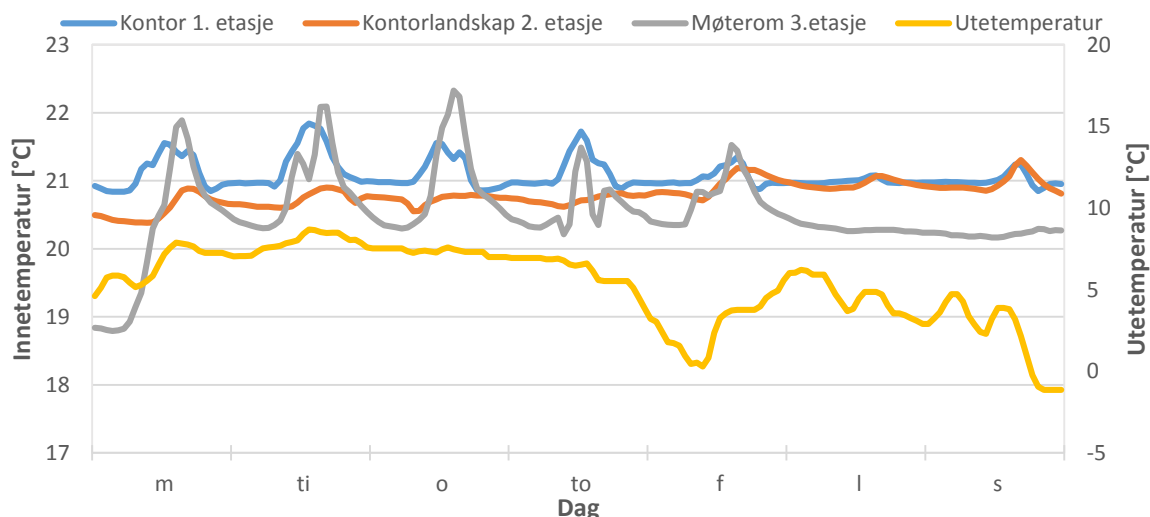
Samtidig har brukeren av rommet også mulighet til å gjøre en individuell justering, ettersom mennesker har ulik oppfattelse av komfort [30].

Figur 76 viser et skjermbilde fra SD-anlegget over romregulering for 1. etasje. Ved å høyre klikke på *Er Verdi* og deretter *trend*, kan temperaturen i sonen logges. Figuren viser også at brukerne har muligheter for justere temperaturen lokalt.

	Er Verdi	Lokal justering	Settpunkt	Varme pådrag	Kjøle pådrag	Komfort
1E-02 Meterom	21,2 °C		#UNC	0 %	✖	🏠
1E-03 Kontor	21,6 °C		#UNC	0 %	✖	🏠
1E-04 Kontor	21,6 °C		#UNC	0 %	✖	🏠
1E-05 Kontor	22,5 °C	#UNC	21,0 °C	100 %	✖	🏠
1E-06 Kontor	21,5 °C	0,0 °C	21,0 °C	0 %	✖	🏠
1E-07 Kontor	21,5 °C	0,0 °C	21,0 °C	0 %	✖	🏠
1E-08 Personalrom	20,8 °C		#UNC		✖	🏠
1E-09 Resepsjon	21,3 °C		#UNC		✖	🏠
1E-10 Kontor monterer	21,9 °C		#UNC		✖	🏠
1E-11 Landskap	#UNC		#UNC	#UNC	✖	🏠
1E-12 Meterom	#UNC		#UNC	#UNC	✖	🏠
1E-13 Landskap	#UNC		#UNC	#UNC	✖	🏠

Figur 76: Oversikt over romregulering i 1. etasje - Skjermbilde fra SD-anlegg

De loggede temperaturene for uke 2 samt utetemperaturen er vist i figur 77. Utetemperaturen er vist på sekundæraksen.

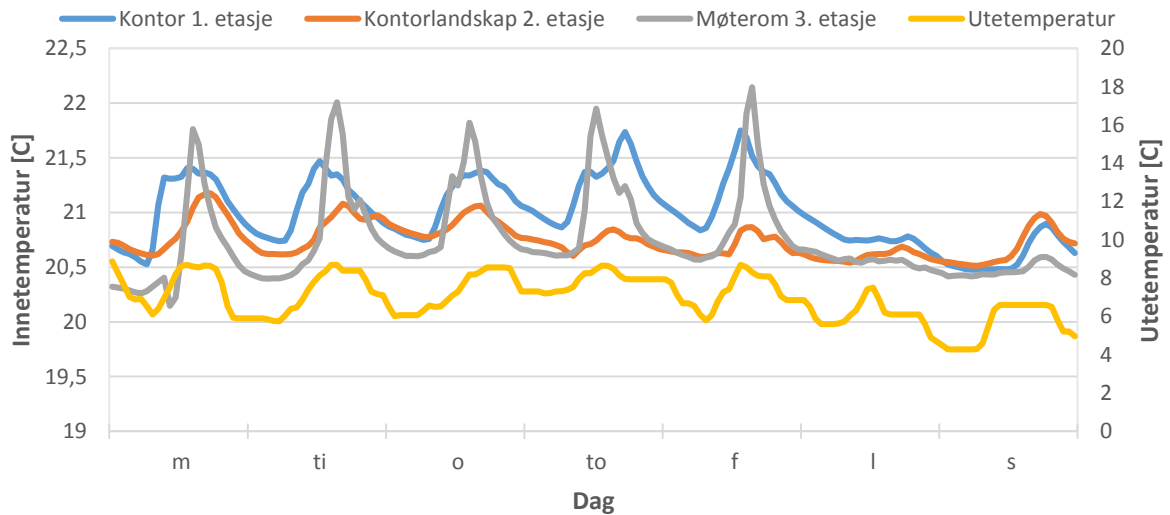


Figur 77: Loggede temperaturer fra SD-anlegg for uke 2 i utvalgte rom

Figur 77 viser at i uke 2 i 2014 lå utetemperaturen mellom 5-10 °C mandag til torsdag før et temperaturfall på nesten 10 °C natt til fredag. Temperaturen viser et jevnere forløp i kontorlandskapet enn kontoret og møterommet. Dette kommer av at kontorlandskapet har et mye større areal enn de øvrige rommene, som vist i figur 21. Det store arealet fører til at

tilstedeværelsen i rommet ikke påvirker temperaturen like mye, som for eksempel i et lite kontor. Det kan i tillegg antas at det er forholdsvis jevn drift i kontorlandskapet. Møterommet viser tydelig at det er ujevn drift i løpet av en vanlig arbeidsdag. Dette forklares ved de ulike temperaturtoppene hver dag, som altså er et resultat av økt tilstedeværelse i rommet. Temperaturforløpene til både kontoret og kontorlandskapet følger samme form som de simulerte temperaturene studert i figur 66-68. Møterommet er imidlertid annerledes, da det er simulert med full tilstedeværelse hele dagen, noe som viser seg å ikke være tilfelle.

De loggede temperaturene for uke 12 samt utetemperatur er vist i figur 78



Figur 78: Loggede temperaturer fra SD-anlegg for uke 12 i utvalgte rom

De loggede temperaturene for uke 12, bekrefter antagelsene basert på de loggede målingene fra uke 2 (figur 77). Det vil si at møterommet har begrenset tilstedeværelse i løpet av arbeidsdagen, men oppnår likevel de høyeste temperaturene når det er i bruk. Kontor og kontorlandskap følger samme forløp, bare at kontoret er mer følsom for tilstedeværelse på grunn av mindre areal.

9 Diskusjon

I dette kapitlet diskuteres først om bygget tilfredsstillende passivhusstandarden NS 3701. Videre blir det diskutert sentrale parametere som påvirker energibruk i bygninger og følsomhetsanalyse gjennomført. Til slutt diskuteres utfordringer med modellkalibreringen.

9.1 Energibruk til oppvarming evaluert mot NS 3701-krav

Oppvarming i kontorbygget Havutsikt består av energibruk til takvarmepanelene integrert i Caverion KlimaTak og varmebatteriene i ventilasjonsanlegget. Dette er omtalt som romoppvarming og ventilasjonsvarme i NS 3701. Kravet for oppvarming i NS 3701 er gitt i tabell 1 i kapittel 2.2.1.

Årsmiddeltemperatur i Mandal er $6,7\text{ °C}$ [54]. Kontorbyggets areal (bruksareal) er $3\,265\text{ m}^2$. Grunnet usikkerhet rundt oppvarmet andel av bruksareal (A_{fl}), benyttes totalt bruksareal i beregningen av spesifikt energibruk, slik det er gjort tidligere i denne oppgaven.

Fra tabell 1 og 2 med verdiene $\theta_{ym} = 6,7\text{ °C}$ og $A_{fl} = 3\,265\text{ m}^2$, blir høyest beregnede netto spesifikt energibehov per år til oppvarming lik $EP_{H,0} = 20\text{ kWh/m}^2$.

Det understrekes at verdien fra NS 3701 er høyest *beregnet* netto spesifikt energibehov til oppvarming. I beregningen skal det ifølge NS 3701 benyttes luftmengder dimensjonert ut fra persontetthetskrav gitt i NS 3701. Det skal også benyttes standardverdier for interne varmetilskudd gitt i NS 3701 [6].

I denne oppgaven er varmebehovet, det vil si kondensatorvarme fra varmepumpe og varme fra el-kjel, brukt under betegnelsen *oppvarming*. Dette fordi det var usikkerhet rundt målingene av varmtvann fra Energologi, som forklart i kapittel 8.1.1. I følge NS 3701 er oppvarming summen av romoppvarming (varmepaneler) og ventilasjonsvarme (varmebatteri). Denne posten er kalt *varmepaneler og varmebatteri* fra målingene. Som forklart i kapittel 8.1.1, var det avvik mellom *oppvarming* og *varmepaneler og varmebatteri*, som forklart i tabell 14. På bakgrunn av dette er energibehovet evaluert for begge de målte tilfellene. I tillegg er også den graddagskorrigerede målingen av oppvarmingen tatt med, som simuleringsmodellen ble kalibrert mot.

Tabell 26 viser energibruken summert for ett år fra 1.april 2013 til 31.mars 2014. Totalt energibruk for ett år er dividert med totalt bruksareal fra Energologi, $3\,265\text{ m}^2$. I tillegg viser tabellen spesifikt energibehov for både innledende simulering og kalibrert simuleringsmodell (simulering 6). Oppvarming i simuleringsmodellen er avgitt kondensatorvarme fra varmepumpe og varme fra el-kjel. Dette fordi varmtvann ikke er inkludert i simuleringsmodellen. Spesifikt energibruk for simuleringsmodellene er totalt energibruk for ett år dividert med totalt bruksareal fra EnergyPlus, $2\,992\text{ m}^2$.

Tabell 26: Evaluering av energibruk til oppvarming mot NS 3701

Energibruk til oppvarming	Spesifikt energibehov til oppvarming [kWh/(m ² ·år)]
Krav NS 3701	20
Varmepanel og varmebatteri fra Energologi	16,00
Oppvarming fra Energologi	18,26
Graddagskorrigert oppvarming fra Energologi	19,92
Innledende simulering oppvarming, EnergyPus	46,73
Kalibrert simulering oppvarming, EnergyPlus	21,87

Som tabell 26 viser, er alle verdiene fra målingene i Energologi innenfor kravet fra NS 3701. Innledende simulering, som består av standardverdier fra NS 3701, og dermed gir et mest realistisk sammenligning til *beregnet* netto spesifikt energibehov ut i fra beskrivelsen i NS 3701, har imidlertid et spesifikt energibruk på 46,73 kWh/(m²·år). Dette er simulert med et lekkasjetall på 0,6 luftskifter i timen. Som forklart i kapittel 8.3.2, sank netto spesifikt energibehov med 50 % etter redusering av lekkasjetallet. Kalibrert simuleringsmodell er tilnærmet lik som graddagskorrigert måling på totalt energibruk for ett år, men på grunn av at energibruken er dividert med ulikt areal, blir forskjellen nesten 2 kWh/(m²·år), som forklart under usikkerhetene i kapittel 7.4. I tillegg er det i både simuleringsmodellen og oppvarming fra Energologi brukt kondensatorvarme fra varmepumpe, og ikke el til kompressor. Dette fordi det er kondensatorvarme som er brukt i målingene på grunn av usikkerhet rundt elektrisitet til kompressor-målingene, som forklart ut i fra figur 29. Hadde elektrisitet til kompressor til varmepumpe og varme fra el-kjel vært inkludert for simuleringsmodellen, ville naturligvis spesifikk energibruk til oppvarming vært lavere for simuleringene.

9.2 Følsomhetsanalyse av parametere som påvirker energibruk i bygninger

Som beskrevet i kapittel 4.2, er det seks faktorer som påvirker den direkte energibruken i bygninger. I dette kapitlet vil det bli utført følsomhetsanalyse av sentrale parametere som ble brukt i modellkalibreringen. I følsomhetsanalysen vil innledende simuleringsmodell bli brukt. Denne regnes som *passivhus*, ettersom den består av standardverdier fra NS 3701. I tillegg vil parameterne bli endret til *TEK 10-nivå* (NS 3031) og til *ZEB-nivå*. ZEB-nivå bygger på kapittel 3, og spesielt tabell 8 i kapittel 3.4. Det vil bli studert levert energi til bygget. Dette gjelder derfor både oppvarming og elforbruk. For varmepumpa er elektrisitet til kompressor tatt med isteden for kondensatorvarme som ble studert i kalibreringen. Dette fordi følsomhetsanalysen er basert på simuleringsmodellen. Elforbruket til kompressoren i Energologi inneholdt målefeil, og ble derfor ikke studert videre i denne oppgaven.

Tabell 27 viser inndata brukt i følsomhetsanalysen.

Tabell 27: Oversikt over inndata brukt i følsomhetsanalysen

Variabel	TEK 10	Passivhus	ZEB
U-verdi vegg/tak/gulv [W/(m ² ·K)]	0,18/ 0,13/ 0,15	0,10/ 0,08/ 0,08	0,08/ 0,07/ 0,07
Lekkasjetall [h ⁻¹]	1,5	0,6	0,2
Belysning, snitteffekt [W/m ²]	8	4	2
Luftmengder Drift/utenfor drift [m ³ /(h·m ²)]	10/3	6/1	4/0

I følsomhetsanalysen er TEK 10- og passivhus-parameterne gitt i henhold til den nevnte forskrift og standard/simuleringsmodell. U-verdiene for passivhus er bedre enn kravet i NS 3701, men det er de samme verdiene som er brukt i simuleringsmodellen, og dermed brukt videre i denne følsomhetsanalysen.

Som beskrevet i kapittel 3.4, er teknologiene i ZEB-bygg tatt et steg videre fra passivhusstandard. Valg av de ulike ZEB-parametrene begrunnes ved:

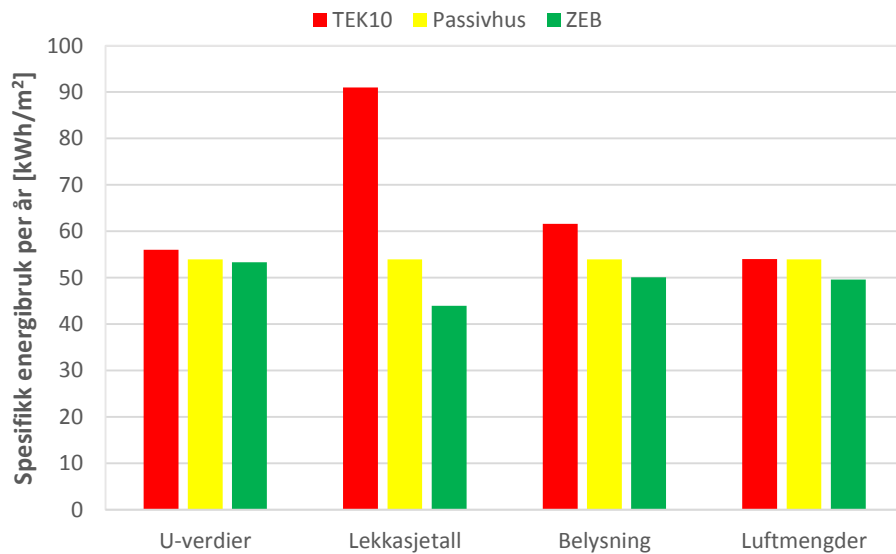
U-verdier: Det er det lagt inn 50 mm ekstra med isolasjon i vegg, tak, og gulv i passivhus-simuleringsmodellen.

Lekkasjetall: Det er benyttet lekkasjetall på 0,2 luftskifter i timen. Dette er lekkasjetall for bygg der det er satt strenge krav til lufttetthet [7].

Belysning: De mest ambisiøse prosjektene for ZEB-bygg nærmer seg en gjennomsnittlig belysningseffekt på 2 W/m². Dette ved hjelp av svært energieffektive belysningsarmaturer og avansert behovsstyring [7].

Luftmengder: I bygg med lavemitterende materialer, avansert behovsstyring samt hvor luften blir tilført effektivt, ofte med fortrenningsventilasjon, kan gjennomsnittlig luftmengde i driftstiden bli så lav som 4 m³/(h·m²). Utenfor driftstiden er satt til 0 [7].

I figur 79 vises resultatene fra følsomhetsanalysen. Her vises levert energi til bygget for hvert tiltak som spesifikk energibruk for et år.



Figur 79: Følsomhetsanalyse av total energibruk

Resultatene fra følsomhetsanalysen viser at reduisering av lekkasjetallet utgjør den største reduksjonen i levert energi til bygget. Redusering fra TEK 10-nivå (1,5 luftskifter per time) til passivhus-nivå (0,6 luftskifter per time) ga en reduksjon på 37,03 kWh/m² per år. Ytterligere reduisering til ZEB-nivå (0,2 luftskifter per time) ga en reduisering av levert energi på ytterligere 10,04 kWh/m². Redusering av lekkasjetallet var en sentral parameter i modellkalibreringen i denne oppgaven. Resultatene fra kalibreringen og denne følsomhetsanalysen viser tydelig at man bør etterstrebe for å få et så tett bygg med så lavt lekkasjetall som mulig uten at dette går utover inneklimate.

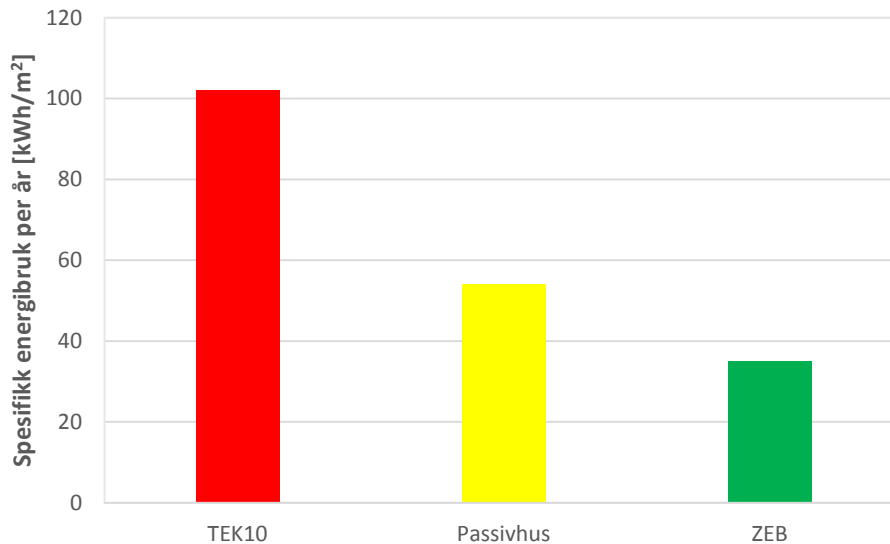
Snitteffekt på belysning utgjør også en betydelig forskjell. Redusering fra TEK 10-nivå (8 W/m²) til passivhus (4 W/m²), ga en reduisering av levert energi til bygget på 7,63 kWh/m² per år. Ytterligere reduisering til ZEB-nivå (2 W/m²), ga en videre reduisering på 3,91 kWh/m².

Redusering av luftmengdene fra TEK 10-nivå (10/3 m³/(h·m²)) til passivhus-nivå (6/1 m³/(h·m²)) ga en reduisering på kun 0,1 kWh/m² per år, mens reduisering videre til ZEB-nivå (4/0 m³/(h·m²)) derimot ga en reduisering på 4,33 kWh/m². Det vil si at reduisering av luftmengdene utgjorde en større reduisering av energibruk enn belysningen fra passivhus- til ZEB-nivå.

Redusering av U-verdier utgjorde den minste forskjellen. Redusering fra TEK 10-nivå til passivhus ga en reduksjon på 2 kWh/m² per år. Ytterligere reduisering til ZEB ga en reduisering på 0,61 kWh/m². Redusering av U-verdier ble forsøkt i modellkalibreringen, men forsøket ble forkastet da effekten av redueringen er begrenset når bygget allerede er godt isolert. Dette bekrefter følsomhetsanalysen ved at redueringen til passivhus fra TEK 10 utgjør en større andel enn passivhus til ZEB. Det er verdt å merke seg at TEK 10-nivå regnes som godt isolert. Ved å studere figur 3 i kapittel 2.3, ser man at etterisolering av bygg eldre

enn 1987, TEK 87 og TEK 97 vil ha en betydelig større fordel av å etterisolerers enn et TEK 10 bygg.

Det er i denne følsomhetsanalysen kun studert fire parametere. Figur 80 viser levert energi til bygget ved å implementere alle de fire TEK 10-verdiene samtidig. Tilsvarende er gjort for passivhus- og ZEB-verdier.



Figur 80: Levert energi for TEK 10-, passivhus- og ZEB-nivå

Ved å endre parameterne for U-verdier, lekkasjetall, belysning og luftmengder til TEK 10, passivhus og ZEB-nivå, blir forskjellene i levert energi til bygget store. TEK 10-nivå er på 101,88 kWh/m² per år, mens passivhus- og ZEB-nivå er på henholdsvis 53,96 kWh/m² og 35,01 kWh/m². Som forklart i figur 79, er det det lekkasjetallet som står for det meste av økningen i TEK 10-nivået. Merk at også installering av energieffektiv belysning og ventilasjon til ZEB-nivå utgjør en betydelig reduksjon i energibruk per år, som vist i figur 79.

Teknisk utstyr var også en sentral parameter i modellkalibreringen. Ved å inkludere teknisk utstyr i følsomhetsanalysen, ville ZEB-nivå uansett vært uforandret. Dette fordi NS 3701-kravet for teknisk utstyr er det samme som for ZEB, det vil si snitt effektbehov på 6 W/m² [7]. Derfor er ikke teknisk utstyr inkludert.

Resultatene fra denne følsomhetsanalysen indikerer at det er mulig å redusere energibruken betraktelig i bygg ved å kun innføre enkelte tiltak. Videre i dette kapittelet blir sentrale parametere for energibruk i bygninger som var inkludert i simuleringsmodellen, men ikke inkludert i følsomhetsanalysen kort beskrevet.

Parametere som påvirker energibruk, men som ikke blir studert nærmere:

- *U-verdi vinduer*: TEK 97 krav er 1,6 W/(m²·K), mens NS 3701 krav er 0,8 W/(m²·K). I denne oppgaven er det brukt U-verdi på 0,71 W/(m²·K).
- *g-verdi vinduer og solskjerming*: g-verdi vil si total soltransmisjonen. Dette er kombinasjonene av glassrute og kunstig avskjerming [7].

- *Prosentandel vinduer og dører:* Denne andelen varierer stort fra bygg til bygg. Dette er av betydning på grunn av den relativt høye U-verdien i vinduer og dører i forhold til vegg. Se tabell 6.
- *Normalisert kuldebroverdi:* I bygg med mange dårlige kuldebroløsninger vil normalisert kuldebroverdi være $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. I passivhus med gode kuldebroløsninger kan normalisert kuldebroverdi være så lav som $0,02 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ [7].
- *Normalisert varmekapasitet:* I et bygg med lette konstruksjoner, for eksempel et trebygg, kan normalisert varmekapasitet være så lav som $15 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. For et tungt bygg med mye eksponert betong kan derimot normalisert varmekapasitet være hele $150 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ [7].
- *Spesifikk vifteeffekt (SFP):* For dårlige løsninger kan SFP være opp til $6 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$, mens kravet i NS 3701 er $1,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ [7]. SFP er ikke studert nærmere i denne oppgaven på grunn av at det ikke er mulig å lese av elforbruket til viftene i Energologi.
- *Teknisk utstyr:* Teknisk utstyr var i denne oppgaven sentral sammen med belysning i kalibreringen av elforbruket. Det er få prosjekter med målt energibruk til utstyr. Elforbruk i enkelt bygg tyder på at effektforbruket til utstyr er så høy som $15 \text{ W}/\text{m}^2$. Kravet i NS 3701 er $6 \text{ W}/\text{m}^2$. NS 3031-nivå (TEK 10) er $11 \text{ W}/\text{m}^2$, og var verdien simuleringsmodellen ble justert til. Teknisk utstyr er ikke tatt med i følsomhetsanalysen fordi NS 3701-nivå regnes i dag som laveste realistiske verdi, derfor er det ingen hensikt å sammenligne med ZEB-nivå da dette er det samme som NS 3701-nivå [7].
- *Virkningsgrad varmegjenvinner:* I underdimensjonerte aggregater med lite effektive gjenvinningstyper og ugunstig hastighetsprofil, kan virkningsgraden på varmegjenvinneren være så lav som 40 %. I roterende varmegjenvinnere med lave hastighetsprofiler og store varmeoverføringsflater, kan virkningsgraden være over 90 % i ZEB-prosjekter [7]. I denne oppgaven er virkningsgraden på den roterende varmegjenvinneren satt til 83 %.
- *Virkningsgrad varmesystem:* Her mens totalt systemvirkningsgrad regnet som et gjennomsnitt over et år. Dette tar hensyn til COP for varmepumpe, lagrings-, distribusjons- og avgivelstap [7].

9.3 utfordringer ved modellkalibrering

Kalibreringen av simuleringsmodellen mot målt energibruk til oppvarming og elforbruk i denne oppgaven, er utført som skissert i figur 7. Det vil si som et parameterstudium basert på målinger fra Energologi med månedsverdier. Målinger basert på månedsverdier kan imidlertid føre til at signifikante feil på times- eller dagbasis lett blir oversett, slik at selve utgangspunktet for kalibreringen blir feil [36]. Det ble i denne oppgaven oppdaget at energibruken til varmebatteriet fra 17-20 mai 2013 besto av grove målefeil. Denne feilen var så grov at den førte til at totalt varme levert fra varmepumpe og el-kjel i mai var høyere enn vintermånedene desember, februar og mars. Denne feilen ble derfor oppdaget og korrigert.

Dette gir likevel en indikasjon på at målefeil kan forekomme og det kan derfor ikke utelukkes at Energologi inneholder flere feil som ikke er blitt oppdaget.

Bygget var helt nytt ved starten av målingene. Det kan dermed hende at de tekniske installasjonene i bygget ikke var tilstrekkelig innregulert. Energioppfølging av bygg kort tid etter bygging blir ofte lite representativt for bruksfasen [21]. Dette blir da en ekstra utfordring ettersom kalibreringene av modellen er basert på kun ett år med målinger.

Målingene fra Energologi er lite spesifikke. Dette gjelder spesielt elforbruket, der Energologi gir en måling per time for sonene *passivhus*, *ikke-passivhus*, *kantine*, *teknisk rom* og *varmepumpe*. Energologi sier dermed ingenting om hva som forårsaker elforbruket. Det vil si for eksempel hvor mye som kommer fra belysning og teknisk utstyr. Som beskrevet i kapittel 5.2 og skissert i figur 6, er det anbefalt at nye yrkesbygg har en målestruktur som gjenspeiler samme inndeling i energiposter som NS 3031 [7]. Dette inkluderer blant annet egen måling for belysning, teknisk utstyr og vifter. Det viste seg at endringen av snitt effektbehov for belysning og teknisk utstyr bidro mye i kalibreringen av simuleringmodellen. Disse verdiene er i kalibreringen endret fra NS 3701- til NS 3031-nivå. Dette førte til at det totale elforbruket over et år er innenfor 1 % fra de målte verdiene. Avviket for det spesifikke elforbruket ble derimot på nesten 8 % på grunn av areal avvik på 273 m² mellom simuleringmodell og virkelig bygg, som forklart i kapittel 7.4. Derimot er det ingen garanti for at elektrisitet til belysning og utstyr i simuleringen stemmer med det virkelige forbruket for disse, ettersom dette ikke kan måles i Energologi. Dette påvirker også oppvarmingsbehovet til bygget, ettersom teknisk utstyr og belysning er viktige varmekilder i passivhus. Dette er derfor et stort usikkerhetsmoment i kalibreringen.

Raftery et al. definerer et anbefalt kilde hierarki til bruk i modellkalibreing. I rangert rekkefølge ser denne listen ut slik: (1) Dataloggede målinger; (2) Kortsiktige målinger; (3) Direkte observasjoner; (4) Intervju med operatører; (5) Driftsdokumenter (drift og vedlikehold dokumenter); (6) Som-bygget-tegninger; (7) Benchmarking studier og best praksis guider; (8) Standarder, spesifikasjoner og retningslinjer; (9) Prosjektert informasjon (initial modell) [36]. I denne rangeringen kommer bruk av standarder helt nede på 8. plass. I mangel av informasjon om teknisk utstyr og belysning fra de høyere rangerte kildene, måtte likevel standard verdier benyttes i denne oppgaven, som dermed minker troverdigheten til kalibreringen.

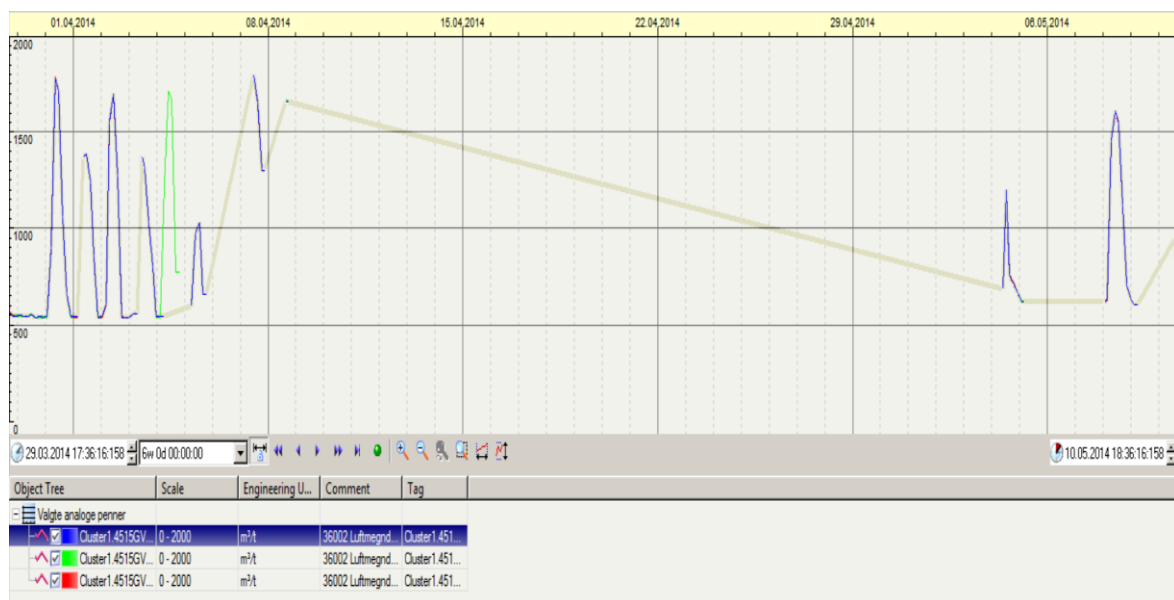
Energibruken til oppvarming ble graddagskorrigert etter *graddagsmetoden* på grunn av den milde måleperioden. Ulemper med denne metoden er beskrevet i kapittel 5.5.2. De viktigste ulempene/utfordringene er at dette er en årstasjonær beregning som kun tar hensyn til døgnmiddeltemperatur, sommermånedene inngår i beregningen av graddagstallet selv om det ikke er oppvarmingsbehov da og at metoden kan regnes som unøyaktig for energieffektive bygg. Dette er likevel klimakorrigerings-metoden som blant annet blir brukt av Enova [7].

Samspeillet mellom varmepumpa og el-kjelen i Energologi har også vært en stor utfordring. Kondensatorvarme fra varmepumpa dekker varmebehovet i bygget med 100 % i april 2013. I januar 2014 dekker kondensatorvarmen kun 20 %, resterende 80 % av varmebehovet dekkes fra el-kjelen. Dette er trolig en målefeil. Løsningen på dette i kalibreringen, ble å legge

sammen kondensatorvarmen og varmen fra el-kjelen og kun fokusere på den totale energibruken.

Kalibrering av simuleringsmodellen mot luftmengdene var en enklere prosess enn kalibreringen mot energibruk til oppvarming og elforbruk. Dette fordi i kalibreringen mot luftmengdene ble SD-anlegget benyttet istedenfor Energologi. Som figurene 54, 55, 57 og 76 viser, var SD-anlegget oversiktlig samtidig som det var detaljert og mulighetene mange. Kalibreringen ble løst ved å logge luftmengder for hver etasje og sammenligne dette mot de simulerte luftmengdene for hver etasje. Sonene i 1. og 2. etasje hadde ikke navn i det behovsstyrte ventilasjonssystemet, som vist i figur 15. Dette var imidlertid ikke noe problem, da luftmengdene i hver etasje ble summert sammen. Det er likevel verdt å nevne at det i SD-anlegget var en del manglende målinger.

Figur 81 viser et skjermbilde fra SD-anlegget hvor de loggede luftmengdene for nesten hele april mangler.



Figur 81: Skjermbilde fra SD-anlegg som viser at loggede luftmengder mangler for nesten hele april

Dette problemet ble løst ved å velge uker hvor det var minst mangler. Dette gjaldt også for temperaturer i de studerte rommene og tur- og returtemperatur til varmepanelene.

EnergyPlus, simuleringsprogrammet som er brukt i denne oppgaven, er svært detaljert som forklart i kapittel 5.1. Det kan dermed være en utfordring i seg selv å skaffe til rette presis og grundig inndata til de tekniske installasjonene i bygget.

10 Konklusjon

Formålet med oppgaven var å dokumentere energiytelser og inneklime i en kontorbygning bygd etter passivhusstandard. Samt også undersøke hvilke parametere som påvirker energibruk i passivhus. Dette ble utført ved å måle energibruken i energioppfølgingssystemet Energologi og logging av luftmengder og temperaturer fra SD-anlegget.

Simuleringsprogrammet EnergyPlus ble brukt til å lage en simuleringsmodell av kontorbygget. Videre ble energibruken og luftmengdene i simuleringsmodellen kalibrert mot målte og loggede verdier fra Energologi og SD-anlegg.

Energimålingene fra Energologi inneholdt en del feil, noe som gjorde det vanskeligere å se klare sammenhenger. Eksempler på avvik detektert er at varmebatteriet har svært høye verdier fra 17-20 mai 2013, som igjen førte til at mai er måneden med klart høyest energibruk. Dette ble korrigert ved lineær interpolering mellom verdier fra andre måneder og utetemperatur. Det var de korrigerede målingene som ble brukt videre i oppgaven. I tillegg er det usikkerhet rundt samspillet mellom varmepumpe og el-kjel. Varmepumpa har 100 % dekning av varmebehovet i april og mai (2013), mens el-kjelen dekker henholdsvis 80 % og 77 % av varmebehovet i januar og februar (2014). Dette ble løst ved å summere kondensatorvarme fra varmepumpa og varme fra el-kjelen. Dette ble regnet som oppvarmingsbehovet, ettersom det også var usikkerhet rundt oppvarmingen av varmtvann. Elektrisitet til kompressoren til varmepumpa er ikke studert videre på grunn av ustabile målinger. Målt energibruk til oppvarming er dermed kondensatorvarme fra varmepumpe og varme fra el-kjelen i både målingene og simuleringene. Målt energibruk til oppvarming ble graddagskorrigert mot 2011 klima på grunn av den milde vinteren i 2013/2014.

Innledende simuleringer med inndata fra NS 3701 og TEK 10 hadde en spesifikk energibruk per år til oppvarming på 46,73 kWh/m² og elforbruk på 38,74 kWh/m². Tilsvarende resultater for den graddagskorrigerede målingen var 19,92 kWh/m² og 50,47 kWh/m². Etter nærmere undersøkelser viste det seg at lekkasjetallet var lavere i virkeligheten enn i modellen, samt at ikke hele bygget var leid ut. I tillegg ble snitt effektbehov fra teknisk utstyr og belysning endret til NS 3031-nivå. Den kalibrerte simuleringsmodellen endte da opp med spesifikk energibruk per år til oppvarming på 21,87 kWh/m² og elforbruk på 54,71 kWh/m². Total energibruk per år (i MWh) var under 1 % i avvik for både energibruk til oppvarming og elforbruk mellom målinger og kalibrert simuleringsmodell. Årsaken til det større avviket for de spesifikke energibruk-resultatene, er på grunn av et areal avvik på 273 m² mellom simuleringsmodell og areal fra Energologi.

Varmepanelene integrert i Caverion KlimaTak er ikke studert i detalj, da mulighetene for nærmere studie var begrenset både i Energologi og SD-anlegg.

Logging av luftmengdene i ventilasjonssystemet viste at snittet i driftstiden lå på ca. 14 000 m³/h. Anlegget er prosjektert til 24 290 m³/h. I simuleringsmodellen lå luftmengdene i driftstiden på ca. 11 000 m³/h. Simuleringsmodellen ble ytterligere kalibrert ved å endre belastningen og spesifikke luftmengder til NS 3031-nivå i de ulike etasjene, for å kalibreres mot de målte verdiene. Dette førte til at de simulerte luftmengdene økte til ca. 14 000 m³/h i driftstiden, og dermed var på samme nivå som de målte verdiene.

Inneklimasimuleringen viser at det oppstår overoppheting på varme sommerdager. Dette er imidlertid simulert uten kjølebatteri, døgkontinuerlig ventilasjon eller økt infiltrasjon (åpning av vinduer). Evaluering av inneklima i EnergyPlus ved Fanger og adaptiv komfortmodell basert på NS 15251 viser at kategori II, som regnes som anbefalt nivå for nye bygninger, er tilfredsstilt fra 42-82 % av driftstiden ved Fanger og 91-96 % av driftstiden ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251. Tilsvarende tall for kategori III, som regnes som akseptable forhold, er 72-92 % av driftstiden ved Fanger og 96,3-99,6 % ved adaptiv komfortmodell basert på NS 15251. De lave tallene ved Fanger skyldes møterommet som er simulert med høy personbelastning og drift gjennom hele dagen, slik at resultatene er et worst-case-scenario. Disse resultatene tyder dermed på at inneklima er tilfredsstillende i bygget.

Fra parameterstudium og følsomhetsanalysen konkluderes det med at lekkasjetallet har størst innvirkning på energibruk av de studerte parameterne i denne oppgaven. Ved å endre fra TEK 10- til NS 3701-nivå for lekkasjetall, sank spesifikk energibruk per år med 37,03 kWh/m². Ekstra isolering for bedre U-verdier er mindre viktig hvis bygget allerede tilfredsstiller minimum TEK 10-kravet.

Utfordringer ved modellkalibrering er blant annet at bruk av månedsverdier for energibruk kan føre til signifikante feil ikke oppdages. I tillegg mangler detaljerte målinger for elektrisitetsforbruket i Energologi, slik at man ikke vet hva som spesifikt er belysning, teknisk utstyr, vifter osv. Dermed måtte standardverdier benyttes. I tillegg er det en utfordring i seg selv å skaffe grundig og presis inndata til de tekniske installasjonene i et så detaljert simuleringsprogram som EnergyPlus.

11 Videre arbeid

På basis av utført arbeid og utfordringer gjennom arbeidet med denne masteroppgaven, kan følgende punkter foreslås til videre arbeid:

- Fortsette å måle energibruk til bygget, slik at datagrunnlaget mot kalibreringen blir mer representativt for bruksfasen til bygget.
- Undersøk samspillet mellom varmepumpa og el-kjel over en lengre periode, samt også forholdet mellom kondensatorvarme og el til kompressor til varmepumpa.
- Studere inneklima i bygget ved manuelle målinger og intervjuer av brukerne av bygget.
- Nærmere studie av varmepanelene integrert i Caverion KlimaTak med hensyn på komfort.
- Undersøke om det er mulig å modernisere Energologi, slik at elektrisitetsforbruket til belysning, teknisk utstyr, vifter osv. kan leses av individuelt.
- Legge inn kjøling i simuleringsmodell, slik at temperaturene blir tilnærmet lik temperaturene i bygget hele året.
- Undersøke varmtvannsforbruket til bygget nærmere, og samtidig legge inn dette i EnergyPlus.
- Undersøk muligheter for å oppnå ZEB-balanse.

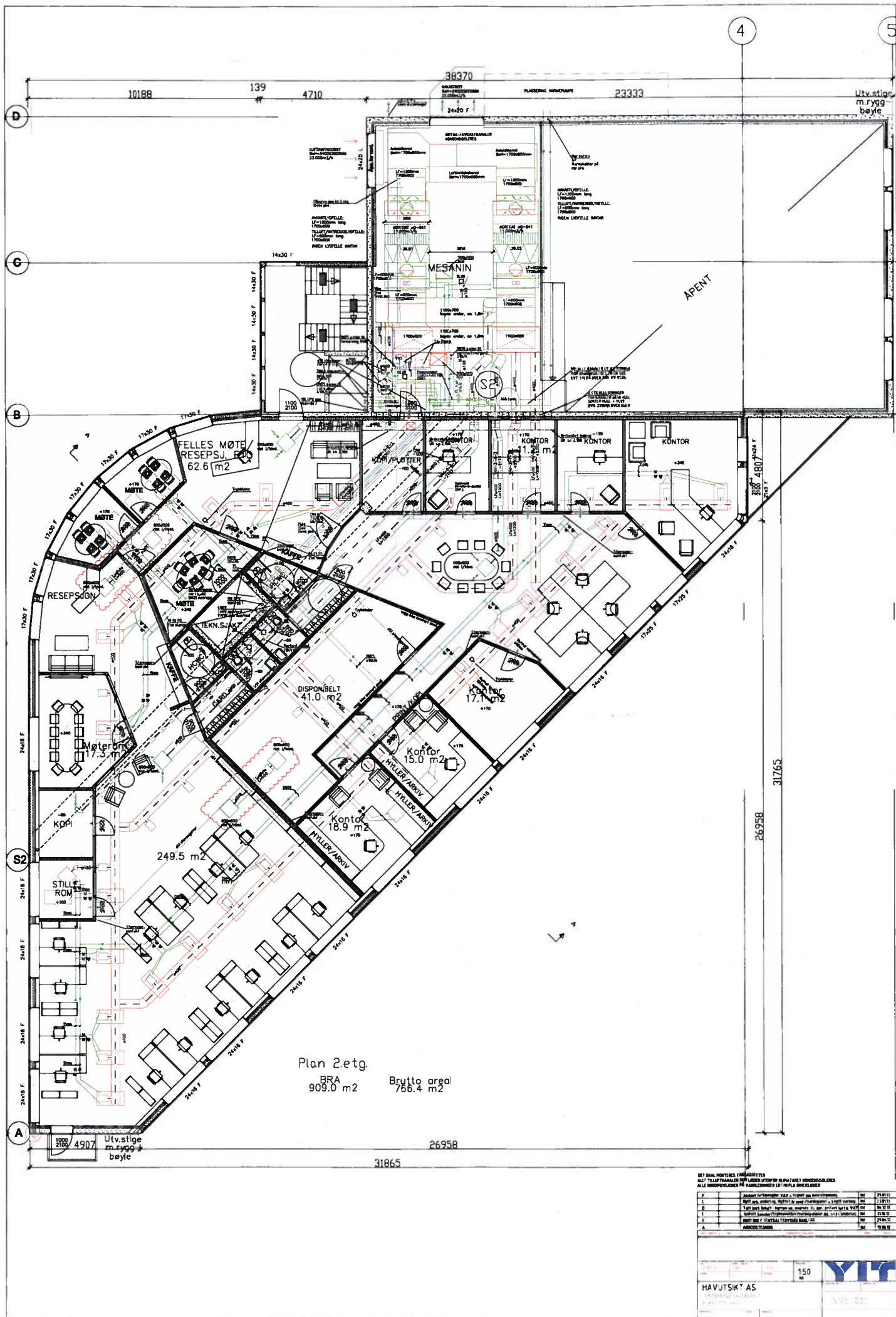
Referanser

1. Dokka, T.H. and I. Andresen, *Energieffektive boliger for fremtiden: en håndbok for planlegging av passivhus og lavenergi boliger*. 2012, Trondheim: Sintef Byggforsk. 90 s. : ill.
2. Senter for fornybar energi. *Energibruk og energieffektivisering*. [cited 2013 12.12]; Available from: http://www.sffe.no/?page_id=63.
3. Lovdata. *Byggteknisk forskrift (TEK 10)*. [cited 2013 12.12]; Available from: http://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2010-03-26-489/KAPITTEL_3-5-1#%C2%A714-7.
4. Novakovic, V., *Forelesning TEP15 Bygningsautomatisering*.
5. Olje- og energidepartementet. *Meld. St. 21 (2011-2012)*. [cited 2013 12.12]; Available from: <http://www.regjeringen.no/nb/dep/md/dok/regpubl/stmeld/2011-2012/meld-st-21-2011-2012/7.html?id=682962>.
6. Norsk Standard, *NS 3701:2012 Kriterier for passivhus og lavenergi bygninger - Yrkesbygninger*.
7. Dokka, T.H. and C. Grini, *Etterprøving av bygningers energibruk*. 2013.
8. Wall, J., *Energiforsyningsløsninger for lavenergi yrkesbygg i Norge*. 2012, Norwegian University of Science and Technology.
9. Passivhaus Institut. [cited 2013 01.10]; Available from: <http://www.passiv.de/>.
10. *Hva handler Kyotopyramiden om?* [cited 2013 16.12]; Available from: <http://www.bygge-passivhus.no/passivhus/hva-handler-kyotopyramiden-om>.
11. Norsk Standard, *NS 3700:2013 Kriterier for passivhus og lavenergi bygninger - Boligbygninger*.
12. Norsk Standard, *NS 3031:2007 Beregning av bygningers energiytelse - Metode og data*.
13. SINTEF. *Varmepumpesystemer for bygninger av lavenergi- og passivhusstandard*. [cited 2014 15.05]; Available from: <http://www.sintef.no/Projectweb/Annex32/Lavenergi boliger passivhus/>.
14. SINTEF and COWI, *State-of-the-Art Analysis of Nearly Zero Energy Buildings*. 40 IEA HPP Annex 40, 2013.
15. Enova. *Bytt til 3-lags lavenergivindu*. [cited 2013 01.12]; Available from: <http://www.enova.no/radgivning/privat/rad-om-produkter-og-losninger/tiltak-i-bygningskroppen/bytt-til-3-lags-lavenergivindu/bytt-til-3-lags-lavenergivindu/99/123/>.
16. Enova. *Slik reduserer passivhuset behovet for romoppvarming*. [cited 2013 01.10]; Available from: <http://www.enova.no/radgivning/privat/energismarte-rad-for-din-bolig/fremtidens-bolig/hva-er-spesielt-med-passivhuset/slik-reduserer-passivhuset-behovet-for-romoppvarming/176/202/>.
17. <http://www.programbyggerne.no/>, SIMIEN.
18. Smedegård, O., *Analyse av forenkla vassborne varmedistribusjonssystem for større bygninger*. 2012, Norwegian University of Science and Technology.
19. Thomsen, J., M. Berge, and S. Byggforsk, *Inneklima i energieffektive boliger - en litteraturstudie*. 2012: p. 48.
20. Halvarsson, J., *Forelesning TEP14 Inneklima og klimatisering av bygninger*.
21. Klinski, M., et al., *113 Systematisering av erfaringer med passivhus - oppfølging*. 2012: p. 72.
22. Torcellini, P., et al., *Zero energy buildings: A critical look at the definition*. National Renewable Energy Laboratory and Department of Energy, US, 2006.
23. Marszal, A.J., J.S. Bourrelle, and J. Nieminen, *North European understanding of zero energy/emission buildings*. 2010.
24. The Research Centre on Zero Emission Buildings. *ZEB-nytt nr. 1 2013*. [cited 2013 06.10]; Available from: www.bnl.no/getfile.php/Filer/Publikasjoner/nyhetsbrev%202013-01.pdf.
25. The Research Centre on Zero Emission Buildings. [cited 2013 05.10]; Available from: <http://zeb.no/index.php/about-zeb>.
26. The Research Centre on Zero Emission Buildings. *ZEB - Annual Report 2012*. [cited 2013 01.10]; Available from: <http://www.zeb.no/images/ZEB%20Annual%20report%202012.pdf>.

27. IEA ECBCS Annex 53. *Total Energy Use in Buildings-Analysis and evaluation methods*. [cited 2013 15.10]; Available from: <http://www.ecbcsa53.org/>.
28. Yu, Z., et al., *A systematic procedure to study the influence of occupant behavior on building energy consumption*. *Energy and Buildings*, 2011. **43**(6): p. 1409-1417.
29. IEA ECBCS Annex 53. *Total Energy Use in Buildings: Analysis & Evaluation Methods*. [cited 2013 16.10]; Available from: <http://www.ecbcs.org/annexes/annex53.htm>.
30. NTNU and SINTEF, *ENØK I BYGNINGER Effektiv energibruk*. 2007.
31. *Energieffektivisering i yrkesbygg*. [cited 2013 01.11]; Available from: <http://www.energirad-innlandet.no/bygninger/energieffektivisering-i-yrkesbygg>.
32. Enova. *Energioppfølging i næringsbygg*. [cited 2013 01.11]; Available from: <http://www2.enova.no/publikasjonsoversikt/file.axd?id=97&rand=ed4bc2f3-8ab6-49bf-9f99-b6e8d199ed62>.
33. Klein, L., et al., *Coordinating occupant behavior for building energy and comfort management using multi-agent systems*. *Automation in Construction*, 2012. **22**: p. 525-536.
34. IEA ECBCS Annex 53. *Total Energy Use in Buildings - Analysis and Evaluation - Newsletter No. 3*. [cited 2013 20.10]; Available from: http://ecbcsa53.org/DownloadFile?mod=upload&req=file&fileName=Annex53_Newsletter_n_o_3_1103ver3.pdf.
35. U.S. Department of Energy. *EnergyPlus Energy Simulation Software*. [cited 2013 01.09]; Available from: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm.
36. Raftery, P., M. Keane, and J. O'Donnell, *Calibrating whole building energy models: an evidence-based methodology*. *Energy and Buildings*, 2011. **43**(9): p. 2356-2364.
37. Høseggen, R.Z., *Dynamic use of the building structure-energy performance and thermal environment*. 2008, Norwegian University of Science and Technology.
38. energidirektorat, N.v.-o., *Evaluering av modeller for klimajustering av energibruk*. 2014.
39. Norsk Standard, *NS-EN ISO 7730 Ergonomi i termisk miljø Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort*.
40. Norsk Standard, *NS-EN 15251:2007 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*
41. ENEOR. [cited 2013 16.12]; Available from: <http://www.eneor.com/moyens/metrologie>.
42. U.S. Department of Energy. *EnergyPlus Engineering Reference*. [cited 2013 01.09]; Available from: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>.
43. Enova. *Drømmebygget med innovativ varmeløsning*. [cited 2013 01.11]; Available from: <http://www.enova.no/innsikt/historier/varmehistorier/drommebygget-med-innovativ-varmelosning/433/1264/>.
44. Caverion. *Energologi*. [cited 2013 14.12]; Available from: http://www.byggalliansen.no/dokumenter/08_april/behovsstyring_energologi-anders_bredesen.pdf.
45. Caverion. *KlimaTak*. [cited 2013 15.12]; Available from: <http://www.caverion.no/nn/nor/fagomr%C3%A5der/klima/klimatak>.
46. Burud, J.P. *Passivbygget Havutsikt med innovativ varmeløsning*. [cited 2014 05.05]; Available from: enovakonferansen.enova.no/upload_images/1F983AC14E7D44699AE171BE8816D2EF.pdf.
47. Bioforsk. *Klimadata - Landvik*. [cited 2013 16.12]; Available from: <http://lmt.bioforsk.no/lmt/index.php?type=&weatherstation=29&loginterval=1&tid=1336470674>.
48. Siemens. *Energimåler til vannbårne anlegg*. [cited 2013 01.12]; Available from: http://w3.siemens.no/home/no/no/sector/infrastructure/building/hvac/documents/energim%c3%a5ler_vannb%c3%a5rne_anlegg.pdf.

49. eKlima. [cited 2013 09.12]; Available from: http://sharki.oslo.dnmi.no/portal/page?_pageid=73,39035,73_39049&_dad=portal&_schema=PORTAL.
50. Enova. *Historiske graddagstall*. [cited 2014 25.03]; Available from: <http://www.enova.no/radgivning/naring/kundenare-radgivere/bygningsnettverket/graddagstall/historiske-graddagstall/290/429/>.
51. Styrvold, S.B., *Husbygger med landets mest energieffektive næringsbygg*, in *Byggmesteren*. 2014.
52. Havutsikt. [cited 2014 01.06]; Available from: <http://version-1.havutsikt.yourwebisonline.com/bygget>.
53. Holøs, S., M. Maltha, and M. Berge, *Helse og inneklime i passivboliger - Forskningsbehov, risiko og muligheter*. 2013: p. 55.
54. Forbrukerrådet. *Årsmiddeltemperatur*. [cited 2014 02.06]; Available from: http://www.forbrukerradet.no/annet/tester-og-kj%C3%B8petips/produkter/_attachment/1155526?_ts=140e3be0732.

Vedlegg 1: Plantegninger datert 29.01.2013



DET SKAL FORSTÅS AV DESSERTE TITEL
 ATTE TEIPLANERNE ER UTSKUTTET OG IKKE ER HENDELSESLIG
 ALLE DIMENSJONER ER VÅRSLINGEN I 1:100 PÅ PLANENE

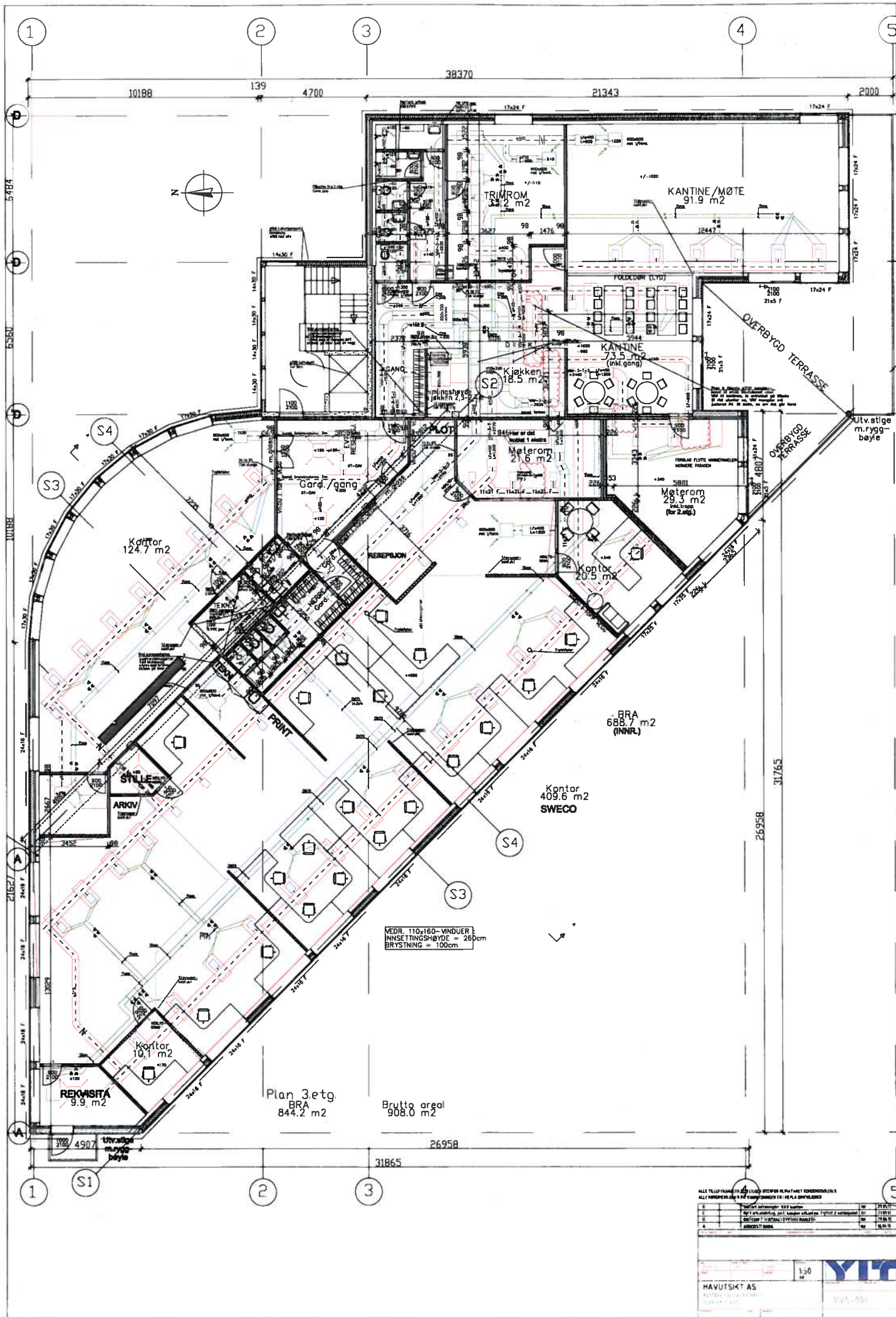
Rev.	Årsak	Dato	Utarbeidet av
1	Opprinnelig utarbeidelse	2010	YIT
2	Endring av detaljer	2010	YIT
3	Endring av detaljer	2010	YIT
4	Endring av detaljer	2010	YIT
5	Endring av detaljer	2010	YIT
6	Endring av detaljer	2010	YIT
7	Endring av detaljer	2010	YIT
8	Endring av detaljer	2010	YIT
9	Endring av detaljer	2010	YIT
10	Endring av detaljer	2010	YIT

150

YIT

HAVUTSIKT AS
 ANTONTING, TEIPLANER
 PÅS 1710 101

VVI 005



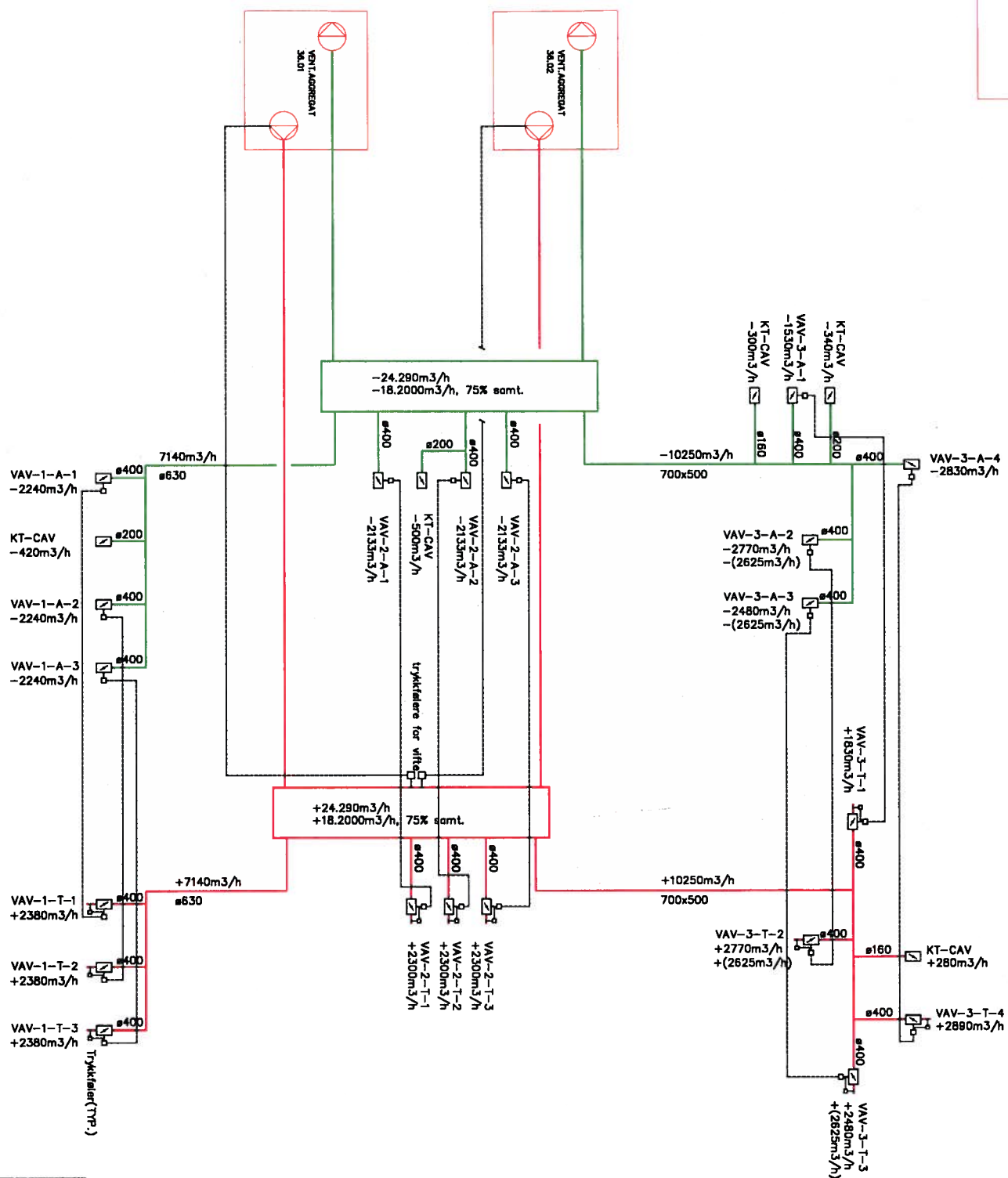
VEDR. 110x160-VINDUER
 INNSÆTTINGSØYDE = 265cm
 BRYSTNING = 100cm

Plan 3 etg
 BRA 844.2 m²
 Brutto areal 908.0 m²

ALLE TELLERFRÅG OG ØYER BEHOVER BEHATNINGSDOKUMENTASJON I ALLE HENSICHTER OG PÅ FØLGENDE MÅTTE: HELE A OPPLYSNINGER			
B	Bygghetning	1:50	19/11/11
C	Bygghetning (inkl. kabinett og innredning)	1:50	19/11/11
D	Bygghetning (inkl. kabinett og innredning)	1:50	19/11/11
A	Bygghetning (inkl. kabinett og innredning)	1:50	19/11/11

MAVUTSIKT AS	150	YIT
PROSJEKTLEDER	150	VVL-001

Vedlegg 2: Systemskjema VAV datert 29.01.2013



FORKLARING TIL VAV NUMMER:
 VAV-ETASJE-TILUFT/AVTREKK-NR
 ALLE VAV #400 DIM.

REV	NO	BR	REVISJON	REVISJON	REVISJON	REVISJON
E						29.04.10
D						23.03.10
C						04.03.10
B						31.03.10
A						19.04.09

HAVUTSIKT AS
 KONTORBYGG SALTVEKET
 SYSTEMLØSING VENTILASJON VAV

VVS-011

Vedlegg 3: Varmepumpe teknisk data

AWR-HT /CA-E /0262

Versione Software: NewELCA - Ver. 2.20.0.0
 Versione report: 2.0.0.5
 Versione DB: 2.39.0.0
 Utente: Eri Svein



YTELSER

KJØLEMODUS

Kjølekapasitet	[kW]	79,8
Totalt tilført kW	[kW]	22,4
EER	-	3,56
ESEER	-	3,38

VARME-MODUS

Varmekapasitet	[kW]	65,0
Totalt tilført kW	[kW]	25,1
COP (Effektfaktor)	-	2,59

BETINGELSER NEVNT

	TA	Ford. Tinn	Ford. Tut	Kond. Tinn	Kond. Tut
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Kjøling	27	12,0	7,0		
Varme	-5,0			48,0	53,0

DEL-LAST

Last	[%]	100	75	50	25
Luft Temp. °C	[°C]	27,0	27,0	25,0	20,0
Kjølekapasitet	[kW]	79,8	59,8	39,9	20,0
Totalt tilført kW	[kW]	22,4	17,2	11,5	5,7
EER	-	3,56	3,47	3,47	3,53

DEL-LAST

Last	[%]	100	75	50	25
Luft Temp. °C	[°C]	7,0	7,0	7,0	7,0
Varmekapasitet	[kW]	65,0	48,8	32,5	16,2
Totalt tilført kW	[kW]	20,6	15,6	10,8	6,1
COP	-	3,15	3,12	3,01	2,67

FODAMPER

Type	Nr.	Tilkoblingstype	Tilkobling_diameter
PLATEVEKSLER	1	GAS	2"
Ford. Tinn	[°C]		12,0
Ford. Tut	[°C]		7,0
Væske			VANN
Glycol	[%]		0
Begroings faktor	[m ² °C/W]		0,000000
Væskegjennomstrømming	[m ³ /h]		13,7
Trykkfall	[kPa]		15,9



AWR-HT /CA-E /0262

Versione Software: NewELCA - Ver. 2.20.0.0
 Versione report : 2.0.0.5
 Versione DB : 2.39.0.0
 Utente : Eri Svein



KONDENSATORER

Type	Nr.	Type tilkobling	Tilkoblingsdiameter
	0		
Kond. Tinn	[°C]		48,0
Kond. Tut	[°C]		53,0
Væske			
Glycol	[%]		0
Begroings faktor	[m ² °C/W]		0,000000
Væskegjennomstrømmning	[m ³ /h]		11,33
Trykkfall	[kPa]		10,78

KOMPRESSORER

Type	SCROLL
Nr.	2
Antall kapasitetstrinn	2
Min. kap. trinn	50
Antall kjølekretser	2
Type regulering	STEPS
Kuldemedie	R407C

VALG AV COIL

		Kjøling	Varme
Viftetype		AKSIAL	
Antall vifter		8	8
Væskegjennomstrømmning	[m ³ /s]	10,6	10,6
ESP (Rådende vinder RPT001)	[Pa]	0	0
Forbruk	[kW]	0,25	0,25

STØYNIVÅ

SOUND POWER LEVEL

63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Totalt tilført
[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
92	89	86	84	84	78	73	65	87

LYDTRYKSKALULERING

63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Totalt tilført
[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB(A)]
60	57	54	52	52	46	41	33	55

Avstand 10

ELEKTRISKE DATA

Stømtilførsel	[V/ ph /Hz]	400/3/50+N
SA	[A]	204,3
FLA	[A]	65,8
Tilført kW	[kW]	38



AWR-HT /CA-E /0262

Versione Software: NewELCA - Ver. 2.20.0.0

Versione report : 2.0.0.5

Versione DB : 2.39.0.0

Utente : Eri Svein



PRATIca

DIMENSIONER OG VEKT

Lengde	[mm]	2745
Høyde	[mm]	1620
Bredde	[mm]	1120
Vekt	[kg]	940

FRITT OMRÅDE

Side med el.skap	[mm]	600
Motsatt side av el.	[mm]	600
Kondensatorside	[mm]	1000
Motsatt side av kondensator	[mm]	1000



Vedlegg 4: El-kjel teknisk data

Termo Extra TE 30 – 96 kW

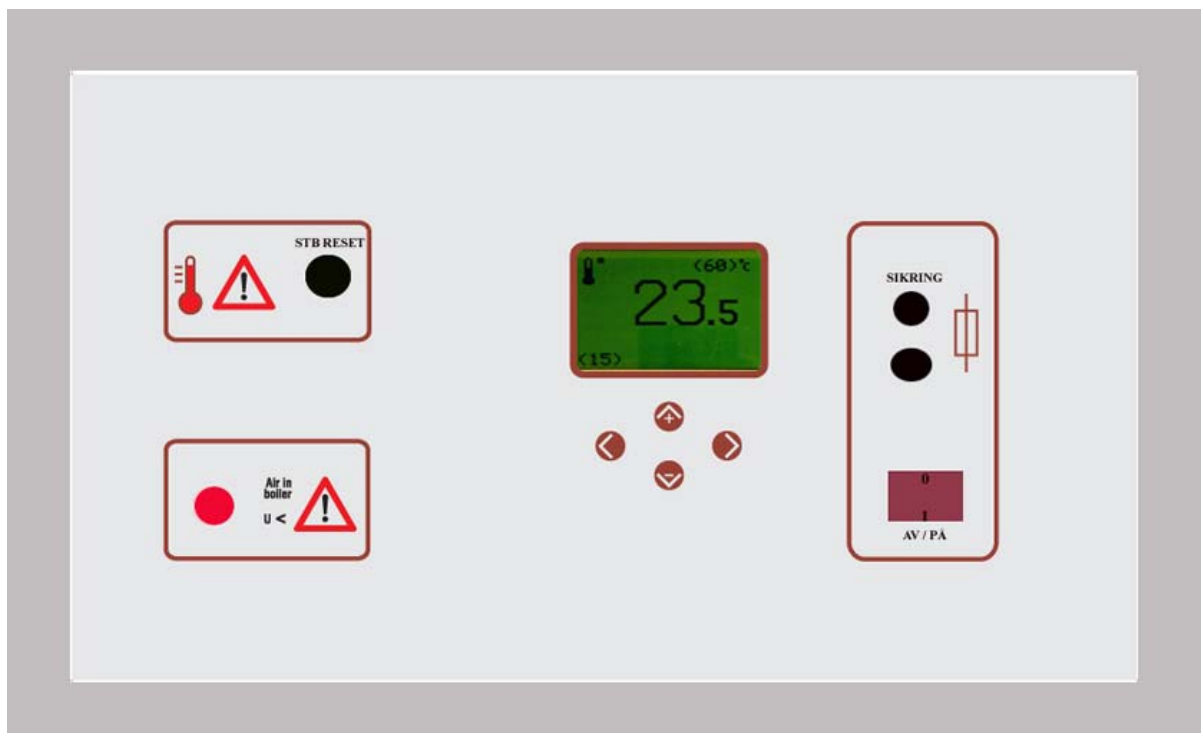
Kontrollpanel

Sikkerhetstermostat (STB) manuell reset

Feilsignal: - *luft i kjelen* – *lav spenning*

Styrestrømsikring 2 x 2,5A

Av / På bryter



Oppstart

Kjelen startes ved å slå på styrestrømsbryteren i front på kjelen. Et rødt lys i bryteren indikerer at spenningen er på. Displayet vil etter få sekunder vise virkelig vanntemperatur, samt innstilt temperatur i parentes. På linjen under vises innkoblet trinn.

Luft i kjelen (*Air in boiler*)

Hvis det registreres luft i kjelen lyser feilsignal og kjelen kobles ut. Således er kjelen beskyttet mot vannmangel . Kobles inn automatisk når luft er fjernet(utlufting).

Feil – spenning

Dersom nettspenningen faller under 180V , lyser feilsignal og kjelen kobles ut for å beskytte elektronikk og kontaktorer . Driften gjenopptas automatisk når spenningen igjen er normal.

Sikkerhetstermostat (*STB*)

Ved overopphetning utløser *STB* ved 110°C . Manuell reset.

Innstilling av regulatoren

901 315 er en elektronisk regulator for styring av elektrokjeler i 7-trinn.

Binær proporsjonal og integrerende temperaturregulering med belastningsvakt.

Innganger (0-10V.) for ekstern styring av temperatur eller trinn (effekt).

Inngang for eksternt Start/Stop. Utganger (0 – 10V) for indikering av innstilt temperatur, eller trinn (effekt).

Regulatoren er forhåndsinnstilt fra fabrikk med turvannstemperatur på 60°C og en trinntid på 40 sekunder. Ønsker man å endre innstillingene, gjøres dette på følgende måte:

Innstilling av temperatur:

Innstilling av ønsket temperatur gjøres på kjelens front. Virkelig temperatur vises og innstilt temperatur vises i parentes. Kjeltemperaturen kan også styres eksternt via en analog inngang (0 – 10V) / 20-99°C. Den innstilte temperaturen på regulatoren (intern) blir da å betrakte som en maksimaltemperatur.

En hysteresis på 2° er lagt inn i den proporsjonelle reguleringen dvs. ved normal drift kan temperaturen svinge 2° før effektrinn kobles inn eller ut. Integrering minsker temperaturavviket til mindre enn 1°. Integreringstiden er avhengig av innstilt trinntid og kan ikke stilles manuelt.

Ønsket kjeltemperatur er stillbar mellom 20-99°C. Ved å taste: + eller - knappen velges ønsket temperatur. Holdes knappen inne vil verdien endres raskere. Ny temperatur lagres og vises i display etter ca. 10 sek.

Trinntid:

Trinntiden er stillbar mellom 20 – 250 sekunder for innkobling av effektrinn.

Trinntiden ved innkobling er fra fabrikk satt til 40sek. Ønskes denne endret, gjør følgende: Med et tast på: < fremkommer menyen "**Informasjon**" :



Tast: ∇ fram til "service" deretter: $>$ tast: ∇ til "tid" tast: $>$ Når linjen er markert endres tiden med tast: ∇ \wedge og lagres med : $<$ Displayet vil nå vise:



Ved å taste 2 ganger på: ∇ knappen vil regulatoren gå tilbake til normal visning, "Temp/Effekt".

Effektbegrensning:

Om kjelen er for stor for anlegget eller man av en annen grunn ønsker mindre effekt kan dette gjøres ved å begrense antall effekttrinn.

Ekstern inn-/utkobling av kjele

Regulatoren er utstyrt med inngang for ekstern inn-/utkobling av kjelen. Denne inngangen kan blant annet benyttes av E-verkene i forbindelse med avbrudd i el-leveransen ved tilfeldig kraft. Tilkobles på klemme 25-26.

Utekompensering

Regulatoren er forberedt for styring avhengig av utetemperaturen.

(uteføler må monteres – ekstra utstyr)

NB! Om utetemperaturføler er innkoblet er det ikke mulig å påvirke turtemperaturen.

Belastningsvakt

Om anlegget utstyres med strømtransformatorer (ekstra utstyr) kan kjelens strømforbruk begrenses slik at byggets totale strømforbruk ikke overskrides. For innstilling av belastningsvakten, se avsnitt: beregninger, strømgrense og strømmarginal.

Hvis kjelen begrenses pga for stort forbruk, vil lysdioden på panelet blinke. I tillegg vil displayet vise : **Strøm E**.

Alarm

Ved feil blinker lysdioden sakte og displayet forteller hva slags feil som er oppstått.

Mulige feil:

- *Giver feil*: kortslutning eller brudd i følerkabel
- *Alarm effekt*: sikkerhetstermostat utløst
- *StrømE*: kjel begrenset pga for høyt forbruk (effektregulering)
- Lav matespenning

Fjernstyring via SD-anlegg

Kjelen har mulighet for fjernstyring av temperatur eller av trinn (effekt) fra SD-anlegg. Dette gjøres med analogt signal, 0-10V.

Temperaturstyring:

For temperatur tilsvarer 0V = 20°C og 10V = 120°C.

Temperaturområde for Norge er 30 - 99°C, som tilsvarer 1,0V - 8,0V.

Temperatur i °C ved ulike spenninger:

Spenning innsignal	Grader C	Spenning utsignal	Grader C
0V	20°	0V	20°
1V	30°	1V	30°
2V	37°	2V	40°
3V	44°	3V	50°
4V	51°	4V	60°
5V	60°	5V	70°
6V	67°	6V	80°
7V	75°	7V	90°
8V	84°	8V	100°
9V	91°	9V	110°
10V	99°	10V	120°

Effektstyring:

Effektssignalet henviser til antall innkoblede trinn, dvs.

0 trinn = 0V 7 trinn = 10V Se tabell nedenfor.

Trinn	7-trinns reg.		
1	1,4V		
2	2,9V		
3	4,3V		
4	5,7V		
5	7,1V		
6	8,5V		
7	10,0V		

Fra kjelen er det og mulig og hente ut signaler om innkoblet trinn (effekt) eller aktuell kjeletemperatur. Utsignal: 0 -10V.

Tekniske data regulator

Matespenning	230V \pm 10%
Eget forbruk	2 W
Relèutgang for kontaktorer	Max 2A 230 V max 8A totalt
Relèutgang driftrelè	Max 2A 230 V (potensialfri kontakt)
Relèutgang alarmrelè	Max 2A 230 V (potensialfri veksel kontakt)
Analoge 0 – 10 V utganger	Max 1 mA, 0-10V=20-120°C er/bør, 0-100% ekt
Kjelføler, type 200 232	NTC 22 k Ω
Innganger impedans	
Analoge 0 – 10 V innganger	Min 10 k Ω . Max strøm inn 1 mA.
Digital inngang (start/stopp)	Max 10 k Ω . Krever signal fra fri kontakt.
Max kontaktresistans	100 Ω

Tilbehør

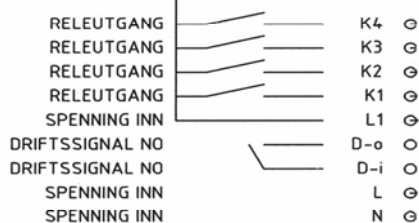
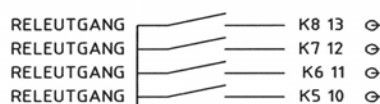
Strømtrafo for belastningsvakt	3 stk. type 200 018
Strømtrafo for effektvisning	1 stk. type 200 018
Uteføler , type:200 035	

KimSafe Regulator Type. 901 315

- 36 STRØMTRAFØ L3
- 35 STRØMTRAFØ L2
- 34 STRØMTRAFØ L1
- 33 FELLES STRØMTRAFØ
- ⊖ 32 STRØMTRAFØ
- ⊖ 31 STRØMTRAFØ
- 30 UTEFØLER
- 29 UTEFØLER
- ⊖ 28 KJELEFØLER
- ⊖ 27 KJELEFØLER
- 26 START STOPP
- 25 START STOPP
- 24 INNGANG 0V
- 23 INNGANG +10V
- 22 UTGANG 0V
- 21 UTGANG +10V

7-trinn binær:

K1 gruppe 1
K2 gruppe 2
K3 gruppe 3



Vedlegg 5: SIMIEN-simulering datert 14.02.2012



SIMIEN

Evaluering passivhus

Simuleringsnavn: Passivhusevaluering

Tid/dato simulering: 10:30 14/2-2012

Programversjon: 5.008

Brukernavn: Flerbruker

Firma: YIT

Inndatafil: W:\...\Havutsikten - Passivhusstandard - Uten trappeoppgang.smi

Prosjekt: Havutsikten

Sone: Alle soner

Resultater av evalueringen	
Evaluering mot passivhusstandarden	Beskrivelse
Varmetapsramme	Bygningen tilfredstiller kravet for varmetapstall
Energiytelse	Bygningen tilfredstiller krav til energiytelse
Minstekrav	Bygningen tilfredstiller minstekrav til enkeltkomponenter
Luftmengder ventilasjon	Luftmengdene tilfredstiller minstekrav gitt i prosjektrapport 42 (tabell 2)
Samlet evaluering	Bygningen tilfredstiller alle krav til passivhus

Varmetapsbudsjett	
Beskrivelse	Verdi
Varmetapstall yttervegger	0,05
Varmetapstall tak	0,03
Varmetapstall gulv på grunn/mot det fri	0,03
Varmetapstall glass/vinduer/dører	0,14
Varmetapstall kuldebroer	0,03
Varmetapstall infiltrasjon	0,03
Varmetapstall ventilasjon	0,19
Totalt varmetapstall	0,50
Krav varmetapstall	0,50

Energiytelse		
Beskrivelse	Verdi	Krav
Netto oppvarmingsbehov	9,9 kWh/m ²	15,0 kWh/m ²
Netto kjølebehov	9,2 kWh/m ²	10,0 kWh/m ²
CO ₂ -utslipp	25 kg/m ²	25 kg/m ²



Simuleringsnavn: Passivhusevaluering

Tid/dato simulering: 10:30 14/2-2012

Programversjon: 5.008

Brukernavn: Flerbruker

Firma: YIT

Inndatafil: W:\...Havutsikten - Passivhusstandard - Uten trappeoppgang.smi

Prosjekt: Havutsikten

Sone: Alle soner

Minstekrav enkeltkomponenter		
Beskrivelse	Verdi	Krav
U-verdi yttervegger [W/m ² K]	0,10	0,15
U-verdi tak [W/m ² K]	0,08	0,13
U-verdi gulv mot grunn og mot det fri [W/m ² K]	0,08	0,15
U-verdi glass/vinduer/dører [W/m ² K]	0,71	0,80
Normalisert kuldebroverdi [W/m ² K]	0,03	0,03
Årsmidlere temperaturvirkningsgrad varmegjenvinner ventilasjon [%]	83	80
Spesifikk vifteeffekt (SFP) [kW/m ³ /s]:	1,50	1,50
Lekkasjetall (lufttetthet ved 50 Pa trykkforskjell) [luftvekslinger pr time]	0,50	0,60

Energibudsjett		
Energipost	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	11756 kWh	6,2 kWh/m ²
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	7062 kWh	3,7 kWh/m ²
2 Varmtvann (tappevann)	9548 kWh	5,0 kWh/m ²
3a Vifter	26408 kWh	13,9 kWh/m ²
3b Pumper	3940 kWh	2,1 kWh/m ²
4 Belysning	29840 kWh	15,7 kWh/m ²
5 Teknisk utstyr	35809 kWh	18,8 kWh/m ²
6a Romkjøling	13160 kWh	6,9 kWh/m ²
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	4278 kWh	2,2 kWh/m ²
Totalt netto energibehov, sum 1-6	141802 kWh	74,4 kWh/m²

Levert energi til bygningen (beregnet)		
Energivare	Levert energi	Spesifikk levert energi
1a Direkte el.	106415 kWh	55,8 kWh/m ²
1b El. Varmepumpe	12274 kWh	6,4 kWh/m ²
1c El. solenergi	0 kWh	0,0 kWh/m ²
2 Olje	0 kWh	0,0 kWh/m ²
3 Gass	0 kWh	0,0 kWh/m ²
4 Fjernvarme	0 kWh	0,0 kWh/m ²
5 Biobrensel	0 kWh	0,0 kWh/m ²
6. Annen ()	0 kWh	0,0 kWh/m ²
Totalt levert energi, sum 1-6	118689 kWh	62,3 kWh/m²



SIMIEN

Evaluering passivhus

Simuleringsnavn: Passivhusevaluering

Tid/dato simulering: 10:30 14/2-2012

Programversjon: 5.008

Brukernavn: Flerbruker

Firma: YIT

Inndatafil: W:\...\Havutsikten - Passivhusstandard - Uten trappeoppgang.smi

Prosjekt: Havutsikten

Sone: Alle soner

Referanseinformasjon beregning	
Evaluering mot passivhusstandarden	Beskrivelse
Beregning	Utført etter Prosjektrapport 42 med validert dynamisk timesberegning etter reglene i NS 3031
Kommune, gårds- og bruksnummer	1002, 39, 261
Konstruksjon og plassering	Næringsbygg Havutsikt, Gismerøyveien 89
Tekniske installasjoner	VAV med vannbåren varmebatteri, vannbåren varmeelementer i taket, LED-belysning, tørrkjøler
Soneinndeling	Kontor: Landskap + cellekontor Møterom Trappeoppgang WC, garderobe og gang Kantine
Arealvurdering	

Dokumentasjon av sentrale inndata (1)		
Beskrivelse	Verdi	Dokumentasjon
Areal yttervegger [m ²]:	868	
Areal tak [m ²]:	824	
Areal gulv [m ²]:	750	
Areal vinduer og ytterdører [m ²]:	372	
Oppvarmet bruksareal (BRA) [m ²]:	1905	
Oppvarmet luftvolum [m ³]:	5145	
U-verdi yttervegger [W/m ² K]	0,10	
U-verdi tak [W/m ² K]	0,08	
U-verdi gulv [W/m ² K]	0,08	
U-verdi vinduer og ytterdører [W/m ² K]	0,71	
Areal vinduer og dører delt på bruksareal [%]	19,5	
Normalisert kuldebroverdi [W/m ² K]:	0,03	
Normalisert varmekapasitet [Wh/m ² K]	69	
Lekkasjetall (n50) [1/h]:	0,50	
Temperaturvirkningsgr. varmegjenvinner [%]:	83	



SIMIEN

Evaluering passivhus

Simuleringsnavn: Passivhusevaluering

Tid/dato simulering: 10:30 14/2-2012

Programversjon: 5.008

Brukernavn: Flerbruker

Firma: YIT

Inndatafil: W:\...\Havutsikten - Passivhusstandard - Uten trappeoppgang.smi

Prosjekt: Havutsikten

Sone: Alle soner

Dokumentasjon av sentrale Inndata (2)		
Beskrivelse	Verdi	Dokumentasjon
Estimert virkningsgrad gjenvinner justert for frostsikring [%]:	83,0	
Spesifikk vifteeffekt (SFP) [kW/m ³ /s]:	1,50	
Luftmengde i driftstiden [m ³ /hm ²]	8,0	
Luftmengde utenfor driftstiden [m ³ /hm ²]	1,0	
Systemvirkningsgrad oppvarmingsanlegg:	1,84	
Installert effekt romoppv. og varmebatt. [W/m ²]:	80	
Settpunkttemperatur for romoppvarming [°C]	20,0	
Systemeffektfaktor kjøling:	2,40	
Settpunkttemperatur for romkjøling [°C]	22,0	
Installert effekt romkjøling og kjølebatt. [W/m ²]:	41	
Spesifikk pumpeeffekt romoppvarming [kW/(l/s)]:	0,50	
Spesifikk pumpeeffekt romkjøling [kW/(l/s)]:	0,60	
Spesifikk pumpeeffekt varmebatteri [kW/(l/s)]:	0,50	
Spesifikk pumpeeffekt kjølebatteri [kW/(l/s)]:	0,60	
Driftstid oppvarming (timer)	12,0	

Dokumentasjon av sentrale Inndata (3)		
Beskrivelse	Verdi	Dokumentasjon
Driftstid kjøling (timer)	24,0	
Driftstid ventilasjon (timer)	12,0	
Driftstid belysning (timer)	12,0	
Driftstid utstyr (timer)	12,0	
Oppholdstid personer (timer)	12,0	
Effektbehov belysning i driftstiden [W/m ²]	5,00	
Varmetilskudd belysning i driftstiden [W/m ²]	5,00	
Effektbehov utstyr i driftstiden [W/m ²]	6,00	
Varmetilskudd utstyr i driftstiden [W/m ²]	6,00	
Effektbehov varmtvann på driftsdager [W/m ²]	0,80	
Varmetilskudd varmtvann i driftstiden [W/m ²]	0,00	
Varmetilskudd personer i oppholdstiden [W/m ²]	4,00	
Total solfaktor for vindu og solskjerming:	0,33	
Gjennomsnittlig karmfaktor vinduer:	0,20	
Solskjermingsfaktor horisont/bygningsutspring:	0,97	



SIMIEN

Evaluering passivhus

Simuleringsnavn: Passivhusevaluering

Tid/dato simulering: 10:30 14/2-2012

Programversjon: 5.008

Brukernavn: Flerbruker

Firma: YIT

Inndatafil: W:\...\Havutsikten - Passivhusstandard - Uten trappeoppgang.smi

Prosjekt: Havutsikten

Sone: Alle soner

Inndata bygning	
Beskrivelse	Verdi
Bygningskategori	Kontorbygg
Simuleringsansvarlig	André Dalene
Kommentar	