



| |
|-------------------|
| OPPGAVE NR. II |
|-------------------|

| |
|-------------------------|
| TILGJENGELIGHET Åpen |
|-------------------------|

OsloMet – storbyuniversitetet

Institutt for Bygg- og energiteknikk

Postadresse: Postboks 4 St. Olavs plass, 0130 Oslo

Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

Telefon: 67 23 50 00

www.oslomet.no

MASTEROPPGAVE

| | |
|--|--|
| MASTEROPPGAVENS TITTEL Analyse av solassistert varmepumpe i norske passivhus eneboliger | DATO 23. Mai 2019 |
| | ANTALL SIDER / ANTALL SIDER VEDLEGG 52 / 46 |
| FORFATTER Lars Øgar Rastad | VEILEDER Habtamu Bayera Madessa og Mehrddad Rabani |
| UTFØRT I SAMMARBEID MED OsloMet | KONTAKTPERSON Habtamu Bayera Madessa |

| |
|--|
| <p>SAMMENDRAG</p> <p>Det er gjort simuleringer og analyser av et modulert varmesystem hvor det er tatt i bruk solassistert varmepumpe.</p> <p>Undersøkelsene tar utgangspunkt i en bolig modulert i simuleringsprogrammet IDA ICE. Boligen representerer en gjennomsnittlig stor norsk enebolig hvor passivhuskrav blir ivaretatt. Varmeanlegg med solassistert varmepumpe er modulert, i tillegg til to andre prinsipp for oppvarming for sammenligning. Det er gjort simuleringer med hensyn til energibesparelse, dekningsgrader fra ulike energigivere i varmeanlegget og lønnsomhetsberegninger. Det er gjort undersøkelser med klimadata for Oslo, Kristiansand og Trondheim.</p> <p>Resultatene viser at solassistert varmepumpe kan dekke mer enn 85 % av varmebehovet til romoppvarming og oppvarming av varmt tappevann. Dette gir en energibesparing på over 60% sammenlignet med oppvarming utelukkende basert på elektrisitet. Lønnsomhetsberegninger viser en tilbakebetalingstid for anlegget til ca. 20 år.</p> |
|--|

| |
|-------------------------|
| 3 STIKKORD |
| Solassistert varmepumpe |
| IDA ICE |
| Passivhus enebolig |

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet høsten 2019 som avsluttende oppgave ved studiet Energi og Miljø i bygg ved OsloMet. Prosjektbeskrivelse er skrevet av forfatter, altså meg selv sammen med veileder, Habtamu for OsloMet.

Høsten 2018 hadde jeg tenkt å skrive om et helt annet tema enn temaet denne oppgaven omhandler. Etter samtale med Habtamu ved OsloMet sent høsten 2018 ble det valgt å skrive en oppgave om solassistert varmepumpe. Hovedgrunnen til at jeg valgte denne oppgaven er at jeg har stor interesse for fornybar energiproduksjon, hvor jeg tidligere har vært med på å skrive en bacheloroppgave om temaet fornybar energiproduksjon ved norske gårdsbruk. Her lærte jeg en hel del om bruk av solenergi til å lage elektrisitet. Solenergi for bruk av oppvarming var derimot nytt for meg. Gjennom arbeidet med denne oppgaven har jeg lært utrolig mye, blant annet om solfangere og mulige konfigurasjoner. Erfaringer gjort med IDA ICE er noe jeg trekker frem som ekstra læringsrikt. Arbeidet med oppgaven har tidvis gitt poser under øynene, lite søvn og et noe dårlig humør. Tidvis har arbeidet også gitt meg et driv til å fortsette, overskudd og godt humør ved at ting ser ut til å fungere som ønsket.

Jeg har lyst til å takke alle mine medstudenter på masterrommet for gode diskusjoner og kaffepauser. Også en takk til Mehrdad som har hjulpet meg med GenOpt og kommet med gode tilbakemeldinger av småfiks på figurer ol. En spesiell takk til min veileder Habtamu, som har gitt tilbakemeldinger og vist engasjement gjennom hele prosessen. Jeg vil også takke min samboer Anne for støtte og mye husarbeid ukene før innlevering.

Sammendrag

I en gjennomsnittlig norsk enebolig utgjør oppvarming omtrent 80% av den totale energibruken. Ved utbygning av nye boliger blir dette betraktelig redusert ved hjelp av god isolasjon, varmegjenvinning og tetting av bolig. Men selv med bruk av passive tiltak vil energibehov til oppvarming være betydelig. Særlig gjelder dette energibruk til oppvarming av varmt tappevann, som ikke blir redusert gjennom passive tiltak. Denne masteroppgaven analyserer et alternativ for å redusere energibruken til oppvarming i norske passivhus eneboliger gjennom å ta i bruk en solassistert varmepumpe.

Undersøkelsene tar utgangspunkt i en bolig modulert i simuleringsprogrammet IDA ICE. Boligen representerer en gjennomsnittlig stor norsk enebolig hvor passivhuskrav blir ivaretatt. Videre er det modellert et varmeanlegg med solassistert varmepumpe i IDA ICE gjennom ESBO, en funksjon i det samme programmet. Det er også satt opp varmeanlegg basert utelukkende på elektrisitet, samt et tradisjonelt solvarmeanlegg for sammenligninger. Det er gjennomført simuleringer av boligen med klimadata fra Oslo, Kristiansand og Trondheim.

Det er lagt spesielt vekt på mulig spart energi i forhold til et varmesystem basert på utelukkende elektrisitet. Resultater viser at bruk av solassistert varmepumpe med 9 m² solfanger vil redusere energibruken til oppvarming med opp til 58% sammenlignet med oppvarming basert på utelukkende elektrisitet. Dekningsgrader i varmeanlegg er også vurdert grundig, hvor solassistert varmepumpe er funnet til å kunne dekke over 90% av alt nødvendig varmebehov.

Varmeanlegget er optimalisert med bruk av GenOpt, et program som kan brukes sammen med IDA ICE. Det er gjort optimalisering av fysiske parametere i varmeanlegget, som størrelse på solfanger, volum av akkumulatortank, massestrømmer mm. Dette er gjort både med hensyn til økonomi og lønnsomhet.

Med hensyn til økonomi er solfangerarealet satt til 6, 8 og 12 m², hvor 12m² er funnet til å gi høyest avkastning. Differanse mellom LCC med utelukkende elektrisitet til oppvarming og bruk av solassistert varmepumpe er funnet til 78.362,- nok, hvor anlegget har en tilbakebetalingstid på 20 år. Med bruk av 12 m² solfanger kan SAHP dekke 84% av all varmebehovet til boligen, og reduserer kjøpt energi til oppvarming med 63,4%.

Abstract

In an average Norwegian residential house, heating accounts for approximately 80% of the total energy consumption. In newer housings, this is considerably reduced by means of good insulation and heat recovery. But even with the use of passive measures, energy requirements for heating will be considerable. This applies in particular to energy use for heating of domestic hot water, which is not reduced through passive measures. This master thesis analyzes an alternative for reducing the energy consumption for heating in Norwegian passive houses by using a solar assisted heat pump.

The studies are based on a residential house modulated in the simulation program IDA ICE. The home represents an average sized Norwegian detached house that meets the requirements given by Norwegian standard for passive house. Furthermore, a heating system with solar assisted heat pump is modeled with ESBO, a function in IDA ICE. A heating system that uses exclusively electricity, as well as a traditional solar heating system is modulated as comparisons. There have been done simulations of the house with climate data from Oslo, Kristiansand and Trondheim.

Initial studies about energy savings with solar assisted heat pump in comparison to a heating system based on exclusively electricity showed that the use of solar-assisted heat pump will reduce the energy consumption for heating by up to 58%. Coverage of various energy sources in the heating systems is also considered thoroughly, where the solar assisted heat pump is able to cover more than 90% of all required heating required for the house.

The heating system is optimized with the use of GenOpt, a program that can be used with IDA ICE. There has been done optimization of the various parameters in the heating system, such as the size of the solar collector, the volume of the storage tank, the mass flows, etc.. This has been done both regarding economy and energy profitability. With regard to energy, the results showed that a large solar collector is optimal.

In terms of economy, the solar area is set to 6, 8 and 12 m², where 12m² is found to yield the highest return. The difference between LCC heating exclusively based on electricity and with heating with a solar assisted heat pump is found to 78.362 NOK, where the plant has a payback period of 20 years. With the use of 12 m² solar collector, SAHP can cover 84% of all home heating needs and reduce purchased energy for heating by 63.4%.

Innholdsfortegnelse

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Innledning | 1 |
| 1.1 | Bakgrunn | 1 |
| 1.2 | Målet med oppgaven | 1 |
| 1.3 | Gjennomføring | 1 |
| 1.4 | Begrensninger | 1 |
| 2 | Teori | 2 |
| 2.1 | Passivhus | 2 |
| 2.2 | Solfanger | 2 |
| 2.3 | Varmepumpe | 5 |
| 2.4 | Solassistert varmpumpe | 7 |
| 2.5 | Simuleringsverktøy | 8 |
| 3 | Metode..... | 10 |
| 3.1 | Bygningsmodell | 10 |
| 3.2 | SAHP varmeanlegg, prinsipp og implementering i ESBO | 16 |
| 3.3 | Økonomi | 22 |
| 3.4 | Optimalisering..... | 24 |
| 3.5 | Behandling og presentasjon av resultater..... | 27 |
| 4 | Resultater og diskusjon | 29 |
| 4.1 | Varmebehov til boligen | 29 |
| 4.2 | Energisimuleringer før optimalisering | 30 |
| 4.3 | Resultater fra optimalisering | 37 |
| 4.4 | Lønnsomhet..... | 43 |
| 5 | Konklusjon | 46 |
| 6 | Videre arbeid | 47 |
| | Referanser | 49 |

Vedlegg

| | |
|------------|--|
| Vedlegg A, | Passivhuskrav:..... |
| Vedlegg B, | Algoritme fra GenOpt |
| Vedlegg C, | Areal eneboliger fra SSB |
| Vedlegg D, | Temperaturer fra brukt klimafil |
| Vedlegg E, | Årsmiddeltemperatur fra byggdetaljer 451.021..... |
| Vedlegg F, | Driftstider for småhus fra SN/TS 3031..... |
| Vedlegg G, | Helligdager |
| Vedlegg H, | SAHP i ESBO |
| Vedlegg I, | Andre varmelegger i ESBO |
| Vedlegg J, | Energipriser fra SSB..... |
| Vedlegg K, | Prisindikasjon fra leverandør |
| Vedlegg L, | Betingelse for dekningsgrad optimalisering |
| Vedlegg M, | Passivhuskrav satt opp mot simulert energibehov til oppvarming |
| Vedlegg N, | Vurdering av tap og faktisk spart energi til oppvarming |
| Vedlegg O, | Total levert energi til boligen..... |
| Vedlegg P, | Resultater alle caser før optimalisering |
| Vedlegg Q, | Passivhuskrav for energiforsyning |
| Vedlegg R, | Dekningsgrad av varmekilder for et døgn i hver årstid. |
| Vedlegg S, | Parametere etter optimalisering |
| Vedlegg T, | Resultat av optimalisering 70% dekningsgrad Kristiansand |
| Vedlegg U, | Total levert energi til boligen etter optimalisering..... |
| Vedlegg V, | Tabell sammenligning før og etter optimalisering (Lønnsomhet) |
| Vedlegg W, | Dekningsgrader for varmekilde etter opt mht. økonomi |
| Vedlegg X, | Dekningsgrader av ulike energikilder før optimalisering..... |

Ordforklaring

Solassistert varmepumpe (SAHP). Av engelsk solar assisted heat pump. System hvor varmekilde til en varmepumpe består av solvarme levert av en solfanger.

Varmtvannstank. Tank som mottar varme fra ulike varmekilder i varmeanlegget. Brukes også som varmekilde til radiatorer, varmt tappevann og ventilasjonsvarme.

Soltank. Tank som mottar varme fra solfanger. I et solassistert varmepumpeanlegg vil dette også være varmekilden til en varmepumpe.

Alternativt varmeanlegg. I denne oppgaven en betegnelse gitt av alle varmeanlegg som ikke utelukkende baserer seg på elektrisitet.

Tradisjonelt solfangeranlegg: Et varmeanlegg hvor solfanger leverer varme direkte til varmtvannstank.

Nomenkatur

| Symbol | Beskrivelse | Enhet |
|-------------|---|-------------------------------------|
| η_{sf} | Virkningsgrad solfanger | [-] |
| η_0 | Virkningsgrad uten temperaturdifferanse mellom væske og lufttemperatur (optisk virkningsgrad) | [-] |
| k_1 | Varmetapskoeffisient, termisk ledningsevne | [W/(m ² ·K)] |
| k_2 | Varmetapskoeffisient, stråling | W/(m ² ·K ²) |
| \bar{T}_v | Midlere væsketemperatur i solfanger (gjennomsnitt tur – retur) | [°C] |
| T_L | Lufttemperatur rundt solfanger | [°C] |
| E_g | Solintensitet | [W/m ²] |
| LCC | Livssyklus kostnad | [NOK] |
| $dLCC$ | Differanse mellom LCC mellom to tiltak | [NOK] |

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I en gjennomsnittlig norsk husstand står romoppvarming og oppvarming av varmtvann for omtrent 80 % av det totale elektrisitetsforbruket, hvor gjennomsnittlig total strømbruk for en enkelt enebolig er i overkant av 20.000 kWh per år [1] [2]. Med 1 183 710 boliger i hele landet, gir dette et totalt strømforbruk på omtrent 19 terrawatt time, kun til oppvarming av eneboliger [3]. Dette tilsvarer omtrent 13 % av Norges totale energiproduksjon [4]. Denne masteroppgaven undersøker et mulig tiltak for å få ned energibruken i norske boliger ved å bruke en solassistert varmepumpe. Ved å redusere energibruk i boliger, kan dette gi store samfunnsmessige gevinster, blant annet ved å bidra til et redusert klimagassutslipp. For brukeren av boligen, kan et redusert energibruk føre til økonomiske gevinster. Det er ikke funnet noen tidligere studier av solassistert varmepumpe under norske forhold.

1.2 Målet med oppgaven

Målet med oppgaven er å undersøke om et varmesystem basert på solassistert varmepumpe kan brukes under norske forhold, og om dette er en gunstig løsning for romoppvarming og oppvarming av varmt tappevann i eneboliger. Dette skal undersøkes med hensyn til økonomi og energieffektivitet, hvor varmesystemet vil bli satt opp mot to andre varmesystemløsninger.

1.3 Gjennomføring

Undersøkelsene blir gjort ved simuleringer, hvor IDA ICE er valgt som simuleringsverktøy. IDA ICE ble valgt på grunn av tidligere kjennskap til programmet, i tillegg til at egendefinerte varmeanlegg kan bli satt opp i programmet. Det er laget en modell av en typisk, norsk enebolig som tilfredsstillende passivhusstandard i IDA ICE. Et varmeanlegg med solassistert varmepumpe implementeres i modellen gjennom ESBO, en funksjon i IDA ICE som lar brukeren lage egendefinerte varmeanlegg. Det vil videre bli gjort energisimuleringer av det aktuelle systemet, samt to andre varmesystem for sammenligning. Videre blir det gjort økonomiske betraktninger gjennom å sammenligne livssyklus kostnader for to av systemene.

1.4 Begrensninger

Undersøkelsene er begrenset til et enkelt hus, med tre ulike klimadata. Sammenligninger mellom andre prinsipper for oppvarming er begrenset til oppvarming med kun elektrisitet og oppvarming med et tradisjonelt solfangeranlegg. Økonomiske undersøkelser er begrenset til å sammenligne oppvarming med kun elektrisitet og oppvarming med solassistert varmepumpe for nybygg. Alle resultater bygger på simuleringer, hvor det ikke er gjort noen målinger av et faktisk anlegg. Oppgaven gir mest utbytte til lesere med noe forkunnskap angående energi og effekt begrep, IDA ICE, termodynamikk, varmepumpe og solvarme.

2 Teori

Det vil i dette kapittelet bli gjort rede for generelle virkemåter for komponentene som brukes i solassistert varmepumpe. I tillegg vil passivhusbegrepet og ulike simuleringsverktøy bli forklart. Hensikten med kapittelet er å hjelpe leseren med å forstå relevante betraktninger og valg gjort metode- og resultatkapitel.

2.1 Passivhus

Et passivhus er et hus hvor det totale energibehovet til boligen er omtrent 25% sammenlignet med et vanlig hus [5]. Det reduserte energibehovet er et resultat av passive tiltak for oppvarming, som for eksempel gode u-verdier, utnyttelse av solenergi, tette ytterkonstruksjoner og gjenvinning av ventilasjonsvarme. For at en boligbygning skal karakteriseres som passivhus, må bygget tilfredsstille krav gitt i NS 3700 [6]. De tre viktigste kravene omhandler varmetap, oppvarmingsbehov og energiforsyning.

Krav for maksimalt energibruk til romoppvarming (oppvarmingsbehov) er gitt ved formel, vist i vedlegg A.1. Kravet er avhengig av årsmiddeltemperatur, og dermed indirekte avhengig av hvor i landet en bolig er plassert. Om boligen befinner seg i et område med høy årsmiddeltemperatur stilles det strengere krav til energibruk sammenlignet med om bygget befinner seg i et område med lav årsmiddeltemperatur.

Krav til energiforsyning er gitt ved at mengde levert elektrisk og fossil energi skal være mindre enn totalt netto energibehov, fratrukket 50% av netto energibehov til varmtvann. Kravet er vist ved formel i vedlegg A.2. Det stilles også krav angående varmetapstall for transmisjon og infiltrasjon, avhengig av boligens bruksareal. Vedlegg A.3 viser høyeste tillatte varmetapstall for passivhus.

Varmebehovet til en bolig kan forenkles til $\text{Varmebehov} = \text{Varmetap} - \text{Varmetilskudd}$, hvor varmetilskudd er summen av internlaster og passiv solvarme gjennom fasade og vinduer, mens varmetap er summen av varmetap gjennom bygningskroppen samt varmetap gjennom ventilasjon. Siden et passivhus har et lavt varmetap gjennom bygningskroppen, vil internlaster spille en relativt større rolle for varmebehovet i boligen, sammenlignet med en vanlig bolig.

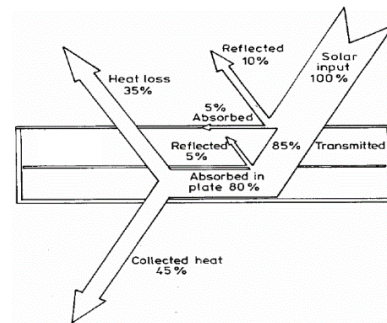
Passive tiltak reduserer ikke energibehovet til oppvarming av varmt tappevann. Den relative energibruken til å varme opp tappevann vil derfor være betydelig større i ett passivhus, sammenlignet med et vanlig hus.

2.2 Solfanger

En solfanger er en innretning som gjør strålingsvarme fra solen om til varmeenergi. En solfanger kan ha en rekke bruksområder som for eksempel prosessvarme, oppvarming av badebasseng, produksjon av elektrisitet og oppvarming av bolig. Det finnes flere typer

solfangere med ulike bruksområder. Til boliger i Norge er det i hovedsak to typer solfangere som er brukt, plan solfanger og vakuumsrørsolfanger [7]. Utildekket solfanger er også noe brukt, blant annet til oppvarming av svømmebasseng. Disse solfangerne består alle av en absorbatoren som omgjør solinnstråling til varme. Varmen blir videre overført til en varmbærer, gjerne vann eller en blanding av vann og frostvæske som transporterer varmen til der den skal brukes, gjerne en varmtvannstank. Solfangere kan være enten passive eller aktive. Passive solfangere bruker termodynamikk for å transportere varmbærer i solkretsen, mens aktive solfangere bruker pumpe. Det er her valgt å kun se på aktive solfangere, da dette er mest egnet til undersøkelsene som skal gjøres.

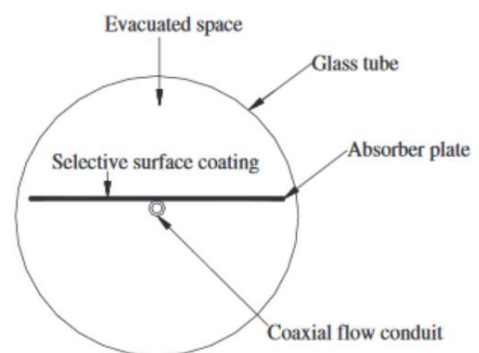
Figur 1 viser prinsippskisse av en typisk plan solfanger, sett som snitt hentet fra [8]. Solstråler treffer et dekklag, som regel glass eller plastikk, før strålingen varmer et varmeledende material som fungerer som solfangerens absorbatoren. Dekklaget fanger varme som ellers ville strålt tilbake til omgivelsene. Plan solfanger kan operere med høyere temperaturer sammenlignet med utildekket solfanger og er den mest brukte solfangertypen i Norge [9]. Bruksområder er blant annet oppvarming / forvarming av varmt tappevann og romoppvarming i bolig.



Figur 1: Snitt - prinsippskisse av en plan solfanger

Utildekket solfanger følger samme prinsipp som flat solfanger, med den forskjellen at det ikke er plassert et dekklag over absorbatoren. Utildekket solfanger er en enkel og rimelig metode å utnytte solenergi på. Ulempen er høyt varmetap mellom solfanger og omgivelsene. Dette fører til at solfangeren kun kan operere med relativt lave temperaturer, og gir lav virkningsgrad dersom temperaturdifferansen mellom omgivelsene og solfangeren er høy.

Det finnes flere typer vakuumsrørsolfangere, hvor det her blir presentert vakuumsolfanger med direkte gjennomstrømning. I vakuumsolfangere befinner absorbatoren seg inne i et rør omringet av vakuum, som vist i Figur 2 hentet fra [10]. Varmebæreren blir varmet opp ved at solstråler treffer absorbatoren som varmer opp varmbæreren i et mindre rør som er plassert på absorbatoren. På grunn av vakuum mellom varmbærer og omgivelsene er det svært lite varmetap til omgivelsene. Dette gjør at vakuumsolfanger kan operere med høye temperaturer. Vakuumsolfangere er generelt noe dyrere enn plan solfanger.



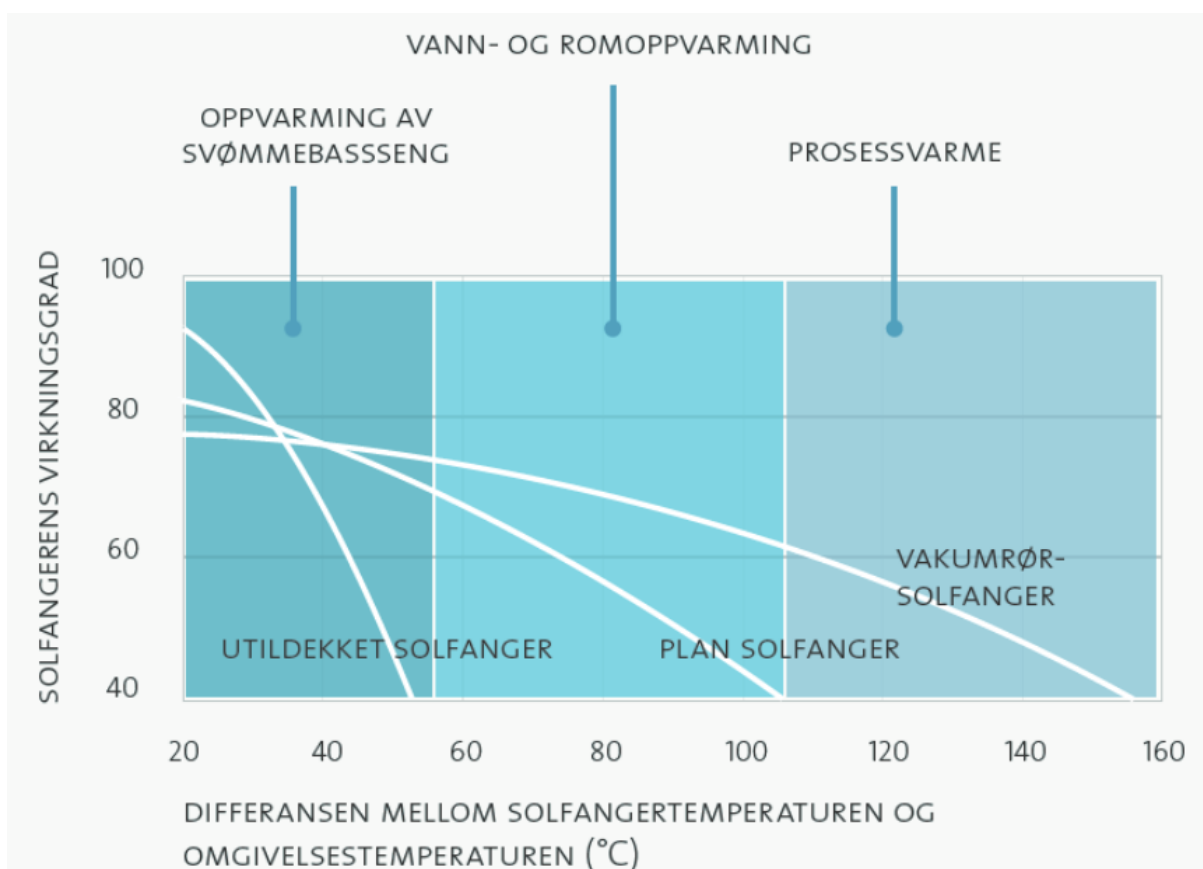
Figur 2: Snitt av en direkte gjennomstrømningsvakuumsolfanger

Virkningsgraden til en solfanger er gitt ved formel 1, hentet fra [7].

$$\eta_{sf} = \eta_0 - k_1 \frac{(\bar{T}_v - T_L)}{E_g} - k_2 \frac{(\bar{T}_v - T_L)^2}{E_g} \quad (1)$$

Hvor η_{sf} er total virkningsgrad solfanger, η_0 er optisk virkningsgrad, k_1 og k_2 er Varmetapskoeffisienter, \bar{T}_v Midlere væsketemperatur i solfanger T_L er lufttemperatur rundt solfanger og E_g er Solintensitet.

Figur 3 viser virkningsgraden til en utildekket solfanger, en plan solfanger, og en vakuumsolfanger ved forskjellige temperaturdifferanser mellom solfanger og omgivelse.



Figur 3: Virkningsgrad for ulike solfangere ved ulike temperaturdifferanser mellom omgivelse og solfangertemperatur [9].

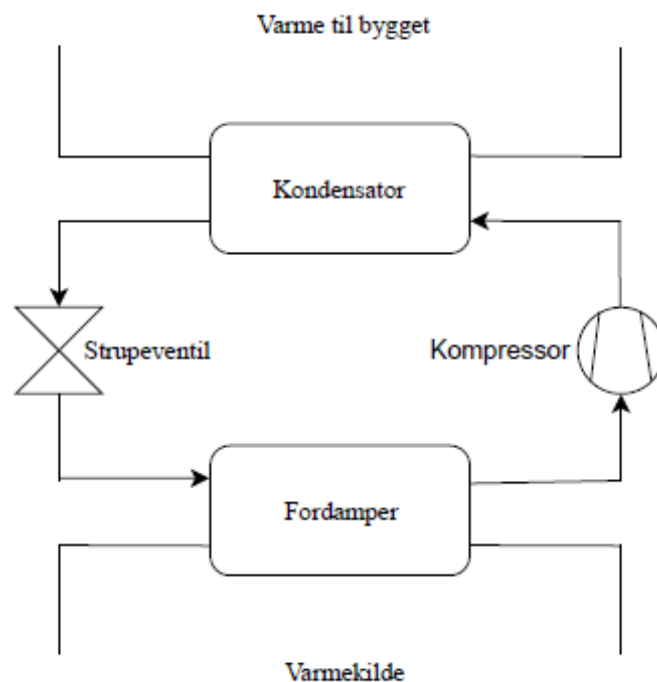
Vakuumsolfangere gir mindre varmetap til omgivelsene på grunn av vakuum mellom varmemediet og omgivelsene. Den optiske virkningsgraden er generelt noe høyere for plan solfanger. Figur 3 viser at plane solfangere har en bedre virkningsgrad enn vakuumsolfangere dersom temperaturdifferansen ikke oversiger 40 kelvin. Det er viktig å understreke at virkningsgraden til en solfanger varierer mellom ulike produsenter og kvalitet på produktet som leveres.

For å produsere varme ved hjelp av en solfanger er det en forutsetning at solfangeren blir eksponert for solinnstråling. I Norge varierer den årlige solinnstrålingen mellom ca. 1100 kWh/m² i sør og 700 kWh/m² i nord [9]. Solinnstråling er avhengig av årstid og tid på døgnet. I tillegg vil helningsvinkelen mot horisontalplanet og asimutvinkelen (orientering) påvirke den årlige solinnstrålingen som treffer en solfanger. Tidspunkt hvor solfangeren er eksponert for høy solinnstråling, er ikke nødvendigvis samtidig som varmebehovet til en bygning er høyt. For å fordele produsert varme over et døgn, må det bli brukt en form for lagring av varmen. Dette blir som regel gjort ved hjelp av en akkumulatortank.

I varme perioder med mye sol kan det oppstå overoppheting i enten akkumuleringstank eller i væsken i solfangeren. Dette problemet oppstår dersom det produseres mer varme enn hva som blir brukt. Det finnes flere måter å løse dette problemet på, hvor en enkel og rimelig løsning er å automatisk tappe varmtvann dersom temperaturen i tanken overstiger 95 °C [7].

2.3 Varmepumpe

En varmepumpe transporterer varme fra et lavere temperaturnivå til et høyere temperaturnivå. Dette blir gjort ved å utnytte at temperaturen til en væske er avhengig av trykk, og at faseendring av en væske frigir, eller krever mye energi avhengig om en væsken fordampes eller kondenserer. Figur 4 viser en enkel skisse av en varmepumpe og dens hovedkomponenter.



Figur 4: Varmepumpe med hovedkomponenter.

Som Figur 4 viser består en varmepumpe av fire hovedkomponenter; fordamper, kompressor, kondensator og strupeventil. Disse er koblet sammen i en lukket krets. Væsken som sirkulerer

i kretsen blir kalt arbeidsmedium. Arbeidsmediet har egenskaper som gjør at metningspunktet (kokepunktet) er godt egnet til en varmepumpeprosess. Fordamperen tar opp varme fra en varmekilde gjennom en varmeveksler. Denne varmen gjør at væsken i fordamperen kondenserer. Dampen blir så sugd inn i kompressoren. Kompressoren øker trykket til dampen, noe som fører til at dampen får en høyere temperatur. Dampen blir videre avkjølt gjennom kondensatoren via en ny varmeveksler, og varme blir avgitt til bygget. Arbeidsmediet, som nå er væske, blir deretter sendt gjennom strupeventilen som reduserer trykket, noe som gjør at temperaturen synker. Fordamperen vil deretter mota den kalde væsken og igjen ta opp varme fra varmekilden. Dette fører til at varmekilden blir kjølt ned. Varmekilden til fordamperen er typisk uteluft eller en frostsikker væske varmet opp gjennom et borehull. Det er også mulig å bruke solvarme som varmekilde.

For å drive denne prosessen kreves det energi i form av elektrisitet. Forholdet mellom avgitt effekt i form av varme og effektforbruket i form av elektrisitet gir COP (Coefficient Of Performance). COP kan uttrykkes ved formel 2.

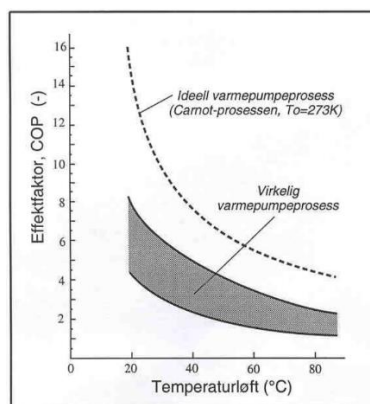
$$COP = \frac{\text{Varme avgitt}}{\text{El tilført}} \quad (2)$$

Avgitt varme finner sted i kondensatoren, og tilført effekt finner sted i kompressoren. Derfor kan COP også uttrykkes ved formel 3.

$$COP = \frac{Q_{\text{kondenser}}}{W_{\text{kompressor}}} \quad (3)$$

Den øvre teoretiske grensen for virkningsgraden (COP) til en varmepumpe er gitt gjennom Carnots kretsprosess [11]. Gjennom Carnots kretsprosess kommer det frem at den teoretiske virkningsgraden til en varmepumpe reduseres med økt temperaturdifferanse mellom fordamper og kondenser.

Figur 5 viser teoretisk og typiske virkelige virkningsgrad i en varmepumpe med hensyn på temperaturdifferanse, hentet fra [11].



Figur 5: COP ved ulike temperaturløft for en Carnots, og virkelige varmepumpeprosess

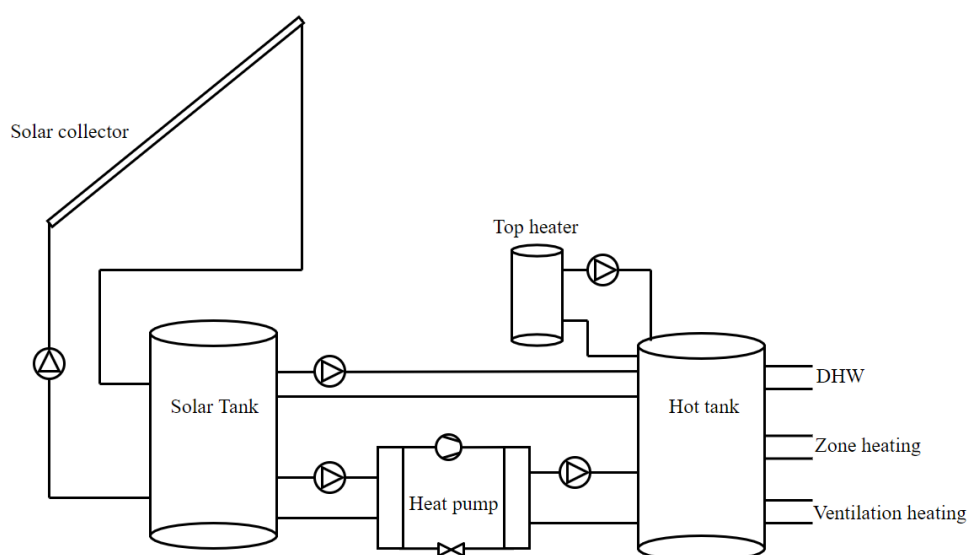
2.4 Solassistert varmepumpe

Solassistert varmepumpe, eller SAHP har som hensikt å kombinere solfanger og varmepumpe for å øke effektiviteten til både varmepumpen og solfangeren [12]. Varmen som produseres brukes til oppvarming av varmtvann og / eller romoppvarming. Energiutbytte fra solfangeren blir høyere ved at lavere temperatur ut fra solfangeren kan bli brukt som nyttbar energi til varmepumpens fordampere. Dette øker antall timer solfangeren kan være i drift, og dermed det årlige energiutbytte. I tillegg vil temperaturen på energibæreren som strømmer inn i solfangeren være lav, noe som reduserer tap til omgivelsene. Timer med relativt lave temperaturer ut fra solfangeren blir brukt til å forbedre varmepumpens COP ved å heve temperaturen i varmepumpens fordampere. Det er mulig å benytte luft / luft, luft / væske og væske / vann varmepumpe i et SAHP system. Det er i denne oppgaven valgt å undersøke væske / vann varmepumpe.

Undersøkelser av solassistert varmepumpe dateres tilbake til 1980 tallet, hvor flere studier er senere blitt gjennomført. Den samlede konklusjonen er at energibesparing ved SAHP er større enn ved bruk av et tradisjonelt solfangersystem til oppvarming av varmt tappevann [12]. Det er derimot ikke funnet noen tidligere studier av hvordan SAHP fungerer under norske forhold.

Det finnes flere måter å designe et SAHP system på ved å endre komponenter og styring. To hovedgrupper er direkte og indirekte system. I et direkte system vil solfangeren fungere som fordampere til varmepumpen i varmepumpens lukkede krets, mens det i et indirekte system vil være en varmeveksler som skiller fordampere og kretsen til solfangeren [12].

Figur 6 under viser prinsippskisse av en mulig konfigurering av et indirekte SAHP system, hvor varmekilden til fordampere blir realisert med en soltank. Aktivering av pumper avhenger av varmebehov og temperaturer i anlegget. Skissen er laget av forfatter.



Figur 6: Prinsippskisse av mulig konfigurering av et indirekte SAHP system

2.5 Simuleringsverktøy

Energibehovet til en bygning avhenger av en rekke faktorer, blant annet byggets areal, internlaster, klimaprofil og bygningsfysiske parametere som u-verdier og lufttetthet. For å ta hensyn til alle disse faktorene på en effektiv måte kan simuleringsprogrammer bli brukt. Det blir i dette kapittelet presentert noen av de mest brukte simuleringsprogrammene for energiberegninger i Norge.

2.5.1 IDA ICE

IDA ICE (IDA Indoor Climate and Energy) er et program utgitt av EQUA Simulation AB. Programmet utfører dynamiske simulering av innendørs klima og energibruk i en bygning [13]. Programmet brukes også til å utføre dagslysberegninger. IDA ICE gir brukeren mulighet til å modulere bygninger i selve programmet, men det er også mulig å importere IFC-filer fra tredjepartsprogrammer. Brukeren har stor frihet til å velge ønskede bygningsfysiske parametere og komponenter, som solskjerming, kuldebroverdier, veggoppbygning osv. IDA ICE kommer i en standard og en ekspert versjon. I denne oppgaven er ekspertversjonen av programmet brukt. I ekspertversjonen kan brukeren sette opp egendefinerte ventilasjonsanlegg, varmeanlegg og styring ved bruk av et stort utvalg komponenter tilgjengelig i programmet. Oppsett av egendefinerte anlegg skjer gjennom IDA ESBO (Early stage bulding optimisation), som er implementert i ekspertversjon av IDA ICE.

Brukeren kan selv bestemme hvilke resultater som skal vises, ut fra hva som er relevant for den enkelte undersøkelsen. Dette kan for eksempel være luftmengder, temperaturer, massestrøm gjennom en enkelt pumpe eller utgang av en enkelt regulator. Resultater kan bli behandlet i selve programmet, eller enkelt lastes ned til et Excel-ark.

IDA ICE bruker klimadata fra ASHRAE IWEC 2 (International Weather for Energy Calculations, version 2), som består av typiske værforhold ved 3012 ulike steder utenfor USA og Canada [14]. IWEC tar utgangspunkt i værdata hentet fra National Climatic Data Center. På hjemmesidene til IDA ICE er det vist til valideringer av klimafilene og av programmet [15].

2.5.2 SIMIEN

SIMIEN er utgitt av ProgramByggerne som utvikler teknisk programvare. Programmet beregner og vurderer inneklimate og energibruk i bygninger. Brukeren kan evaluere bygningen opp mot norske byggeforskrifter, og vurdere byggets energimerke. Oppvarmingsanlegg, romkjøling og ventilasjonsanlegg kan dimensjoneres, og det er mulig å gjøre lønnsomhetsvurderinger av tiltak på bygningen som settes opp [16]. Brukeren av programmet setter opp et bygg gjennom en eller flere soner, hvor det ikke er et visuelt grensesnitt som viser bygget i 3D. Programmet beregner tilstanden i sonen en gang hvert 15 minutt. SIMIEN er enkelt å bruke og relativt lite tidkrevende sett opp mot andre energisimuleringsprogrammer. Dette sammen med muligheten til evaluering mot norske forskrifter gjør programmet godt egnet til dokumentasjon på en rask og enkel måte, og er derfor mye brukt i Norge.

Muligheten for brukerdefinerte endringer av bygget i SIMIEN er få sammenlignet med IDA, TRANSYS og EnergyPlus. Dette gjelder særlig varme- og ventilasjonsanlegget, hvor ulike systemer kan dimensjoneres, men ikke bli satt opp i detalj.

2.5.3 Transys

Transys er et simuleringsprogram utgitt av University of Wisconsin, og er under kontinuerlig utvikling. Programmet har vært tilgjengelig i 40 år og bygger på et prinsipp om å simulere et helt system ved å dele systemet opp i flere individuelle svarte bokser [17]. Programmet er basert på en modulær struktur, og gjenkjenner flere ulike programmeringsspråk. Brukeren kan lage egendefinerte koder som programmet leser, noe som gjør programmet veldig fleksibelt. I tillegg har Transys et bibliotek som inneholder en rekke komponenter som typisk brukes i energiberegninger. Programmet er blant annet egnet til undersøkelser av komplekse termiske forløp, HVAC systemer og energiberegninger med og uten bruk av fornybare energikilder. Ulempen med TRANSYS er at brukeren må ha detaljert informasjon om bygget, og vite hvor denne informasjonen skal legges. I tillegg kan ikke TRANSYS hente data fra AutoCad, noe som er mulig i IDA ICE og Energy Plus [18].

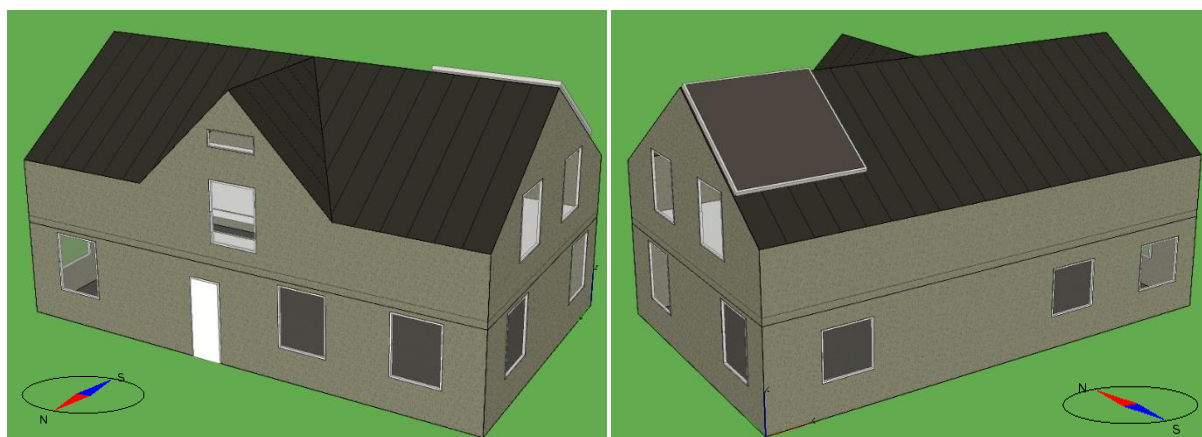
2.5.4 EnergyPlus

EnergyPlus er et energisimuleringsprogram som blant annet brukes til energiberegning for varme og kjølebehov, ventilasjon og belysning for hele bygninger. Programmet er basert på kommandolinjer, hvor brukeren gir programmet en input av kommandoer og får ut en output i form av en tekstfil [19]. For å få et visuelt grensesnitt må det bli brukt et tredjepartsprogram, som for eksempel Design Builder [18].

3 Metode

3.1 Bygningsmodell

Dette kapitlet gjør rede for bygningsmodellen som er satt opp i IDA ICE. Denne bygningsmodellen vil bli brukt som referansebygg for videre energisimuleringer, og er derfor grunnlaget for alle resultater i denne studien. Det blir blant annet presentert bygningsparametere som u-verdier, ventilasjonsluftmengder, kuldebroverdier med mer. Utgangspunktet for bygningsmodellen var en sone med en rekke initialverdier gitt fra IDA ICE. IDA ICE er et komplekst program, hvor mulighet for endringer av parametere og komponenter er veldig stor. Å liste opp alle parameterne med forklaringer vil være uhensiktsmessig og veldig tidskrevende. Kun inndata som er endret fra initialverdier og / eller som anses som spesielt viktige er kommentert. Varmeanlegget til boligen, satt opp i ESBO er greid ut i kapittel 3.2. Bygningsmodellen representerer en enebolig som tilfredsstillter passivhuskravet for oppvarmingsbehov, hvor Figur 7 viser 3D modell av boligen som er modulert.



Figur 7: Bilde av bygningsmodellen. Venste bilde viser bygget sett fra nord-vest, bilde til høyere viser bygget sett fra sør-vest

3.1.1 Input tabell

Nøkkeltall for boligen er gjengitt i Tabell 1 under.

Tabell 1: Inputtabell for bygningsmodellen i IDA-ICE, inkludert kommentarer

| Arealer | Verdi | Kommentar |
|---|---------|--|
| BRA [m^2] | 170 | Gjennomsnitt hentet fra SSB |
| Bygningsvolum [m^3] | 454 | |
| Gulvareal [m^2] | 170 | |
| Vindu og dørareal [m^2] | 28,2 | |
| Fasadeareal, fratrukket vindu og dører [m^2] | 155 | |
| Andel vindu og dører på fasaden [%] | 15,4 | Krav TEK17: ≤ 25 % |
| Bygningsfysiske parametere | Verdi | Kommentar |
| U-verdi vegg [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$] | 0,010 | Typisk verdi fra NS3700: 0.1-0.12 |
| U-verdi tak [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$] | 0,070 | Typisk verdi fra NS3700: 0.08-0.09 |
| U-verdi gulv [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$] | 0,072 | Typisk verdi fra NS3700: 0.08 |
| U-verdi vindu [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$] | 0,600 | Krav fra NS3700: ≤ 0.8 |
| U-verdi dører [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$] | 0,747 | Krav fra NS3700: ≤ 0.8 |
| Lekasjetall ved 50 Pa, [n_{50}] | 0.6 | Krav fra NS3700: ≤ 0.60 |
| Årsgjennomsnittlig virkningsgrad gjenvinner [h^{-1}] | 80 % | Krav fra NS3700: ≥ 80 % |
| Luftmengder [$\frac{l}{s}$] | 65,06 | Hentet fra byggforsk: 1,44 [$\frac{m^3}{(s \cdot m^2)}$] |
| Tilluftstemperatur [$^{\circ}C$] | 15 - 19 | Utekompensert |
| Total SFP tilluft og avtrekk [$\frac{kW}{(\frac{m^3}{s})}$] | 1,5 | Krav fra NS3700: $\leq 1,5$ |
| Normalisert kuldebroverdi [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$] | 0,03 | Krav fra NS3700: $\leq 0.03^*$ |

3.1.2 Areal soneinndeling

Det er valgt å bruke et bruksareal (BRA) likt gjennomsnittlig bruksareal for en norsk enebolig. Med bruk av data hentet fra SSB er det funnet at en norsk enebolig har et gjennomsnittlig bruksareal på 170 m² [20]. Vedlegg C viser graf for fordeling av andel norske eneboliger ut fra BRA. Det er valgt å dele bygget opp i to soner, en for 1.etasje og en for 2. etasje.

3.1.3 Klimadata og beliggenhet

Det blir gjort undersøkelser for tre ulike klimaprofiler. Lokasjonene som er valgt er Oslo, Kristiansand og Trondheim. Disse tre byene kan representere store deler av Østlandet, Sørlandet og Midt-Norge. Det er brukt klimadata fra IWEC 2, lastet ned gjennom IDA ICE. IWEC 2 har ikke klimadata fra Oslo. For Oslo er det brukt klimadata fra Fornebu, som er i umiddelbar nærhet av Oslo. Vedlegg D viser sammendrag av temperaturer i klimafilene hentet fra IDA ICE.

Årsmiddeltemperaturer som er brukt ved utregning av maks energibruk til oppvarming i henhold til passivhuskrav er hentet fra byggdetaljer 451.021 vist i Vedlegg E [21]. Årsmiddeltemperaturen i klimadata fra IWEC 2 er noe høyere enn årsmiddeltemperaturer fra byggforsk. Vedlegg A.4 viser beregnet maksimal energibruk til oppvarming i henhold til NS 3700.

3.1.4 Internlaster

Internlastene i bygningen består av personbelastning, belysning, teknisk utstyr og varmtvann. Varmetilskuddet til sonen fra internlaster er hentet fra NS 3031 og gjengitt i Tabell 2 [22].

Tabell 2: Varmetilskudd fra internlaster

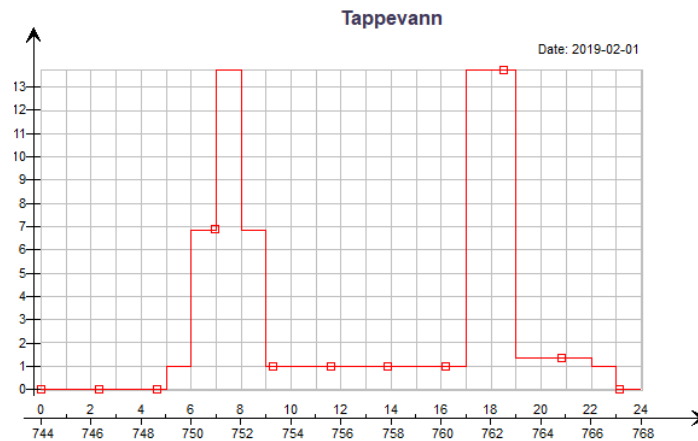
| Internlast | Varmetilskudd til sonen |
|------------------|-------------------------|
| Belysning | 100% |
| Teknisk utstyr | 60% |
| Personbelastning | 100% |
| Varmt tappevann | 0% |

Driftstider

Driftstider for internlastene tar utgangspunkt i SN/TS 3031 [23]. Vedlegg F viser tabell for driftstider i småhus, hentet fra SN/TS3031. For å få en mer realistisk bruksprofil av bygget har forfatter gjort noen egne antagelser rundt driftstider. Blant annet er det satt inn helligdager hvor alle beboerne er tilstede i bygget. Helligdager er vist i Vedlegg G. Det er også gjort endringer av driftstider for belysning og personbelastning.

Varmt tappevann

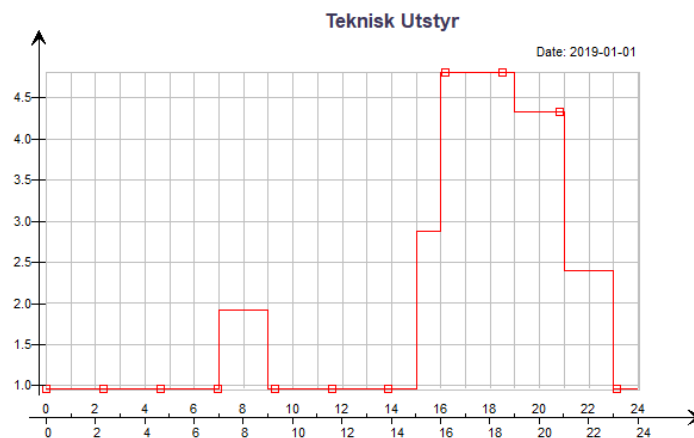
NS 3031 og SN/TS oppgir energibehovet til varmt tappevann til 29,8 kWh / m² per år [22]. Med et areal på 170 m² gir dette et årlig energibruk for tappevann på 5066 kWh/år. Forbruksprofilen til oppvarming av tappevann er vist i Figur 8 under, hvor driftstidene er hentet fra SN/TS 3031, vist i Figur 8.



Figur 8: Forbruksprofil varmt tappevann. X-aksen viser time, og Y-aksen viser W/m² gulvareal.

Teknisk utstyr

Bruksmønsteret for teknisk utstyr følger SN/TS3031. Bruksmønsteret for teknisk utstyr er vist i Figur 9 under.

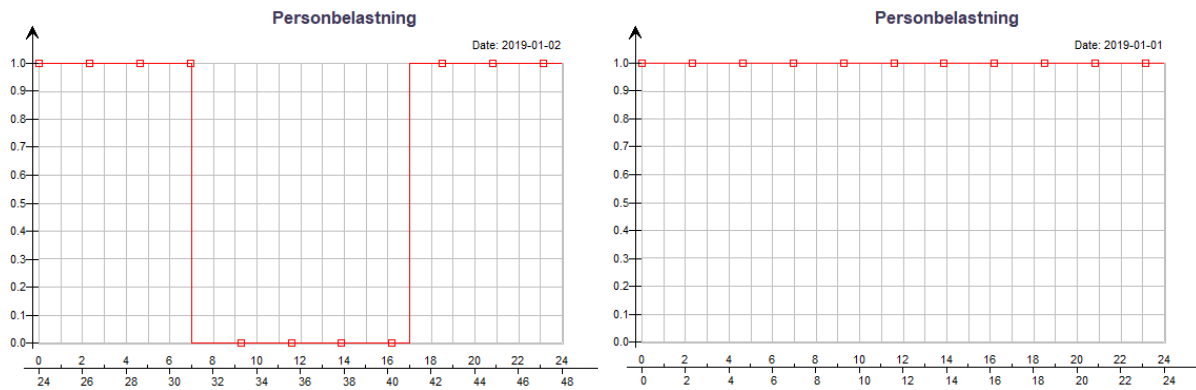


Figur 9: bruksmønster teknisk utstyr, alle dager. X-aksen viser time, og Y-aksen viser W/m² gulvareal

Personbelastning

SN/TS 3031 oppgir et konstant varmetilskudd fra personbelastning på 1.5 Wh/m² per time. Det er i denne oppgaven valgt å bruke en mer sannsynlig bruksmønster for en bolig, med utgangspunkt at det bor en fire personer i boligen. Graf av valgt bruksmønster er vist i Figur

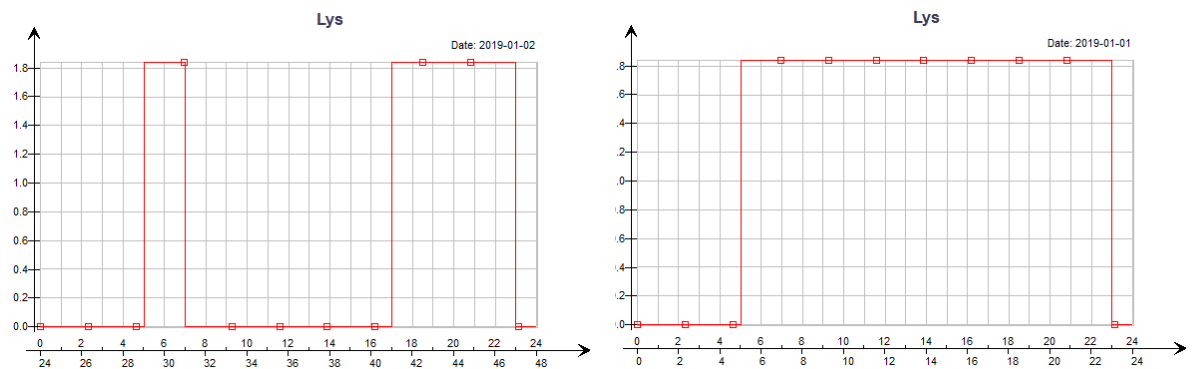
10. Ved bruk av et mer sannsynlig brukerprofil er det enklere å inkludere personbelastning i IDA ICE, hvor personbelastning er gitt av antall personer i sonen. Samtidig som det gir et mer realistisk varmetilskudd over tid. Aktivitetsnivået for hver person er satt til 1 met, noe som i IDA ICE tilsvarer 108 watt per person. På en vilkårlig ukedag med 14 timers driftstid gir dette gjennomsnittlig varmetilskudd fra personbelastning på 1,48 Wh/m² per time, tilnærmet likt SN/TS verdier.



Figur 10: Bruksmønster for personbelastning. Høyre viser hverdager, og venstre viser helligdager og helger. X-aksen viser time, og Y-aksen viser tilstedeværelse, hvor tilstedeværelse tilsvarer 4 personer

Belysning

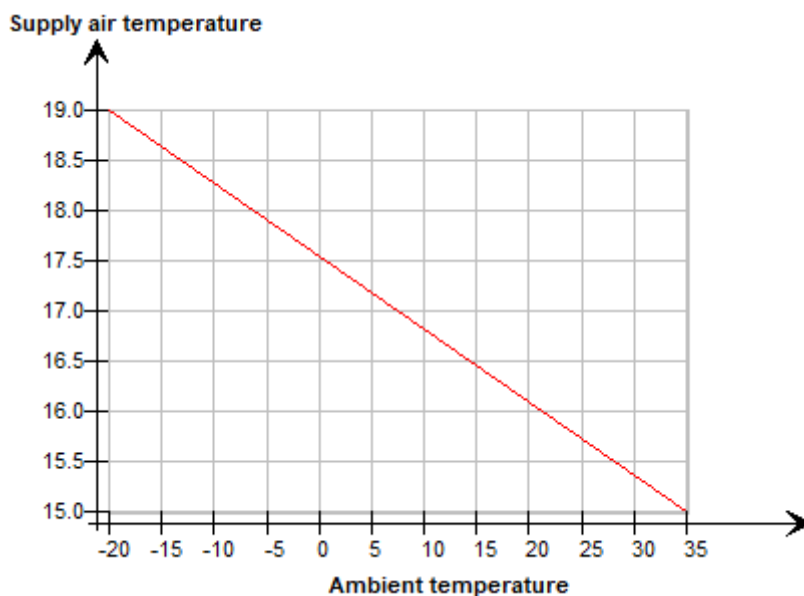
Valgte driftstider for belysning er vist i Figur 11. Dersom det er personer i bygget, er driftstiden for belysning mellom 06:00-23:00. Det antas at brukere av bygget slår av belysning når de forlater boligen.



Figur 11: Bruksmønster for belysning i hverdager (til venstre) og helligdager (til høyre). X-aksen viser time, og Y-aksen viser W/m² gulvareal

3.1.5 Ventilasjon

Det er valgt balansert ventilasjon med konstante luftmengder. Luftmengdene følger byggforsk sine anbefalinger om en friskluftmengde på 1,44 m³/h per m² [24]. Dette gir en total luftmengde på 244,8 m³/h som tilsvarer 68 l/s. Det er brukt varmegjenvinner med en virkningsgrad på 80% som tilfredsstillt krav fra NS 3700 [6]. Tilluftstemperatur er utekompensert som vist i Figur 12 under.



Figur 12: Tilluftstemperatur utekompensert

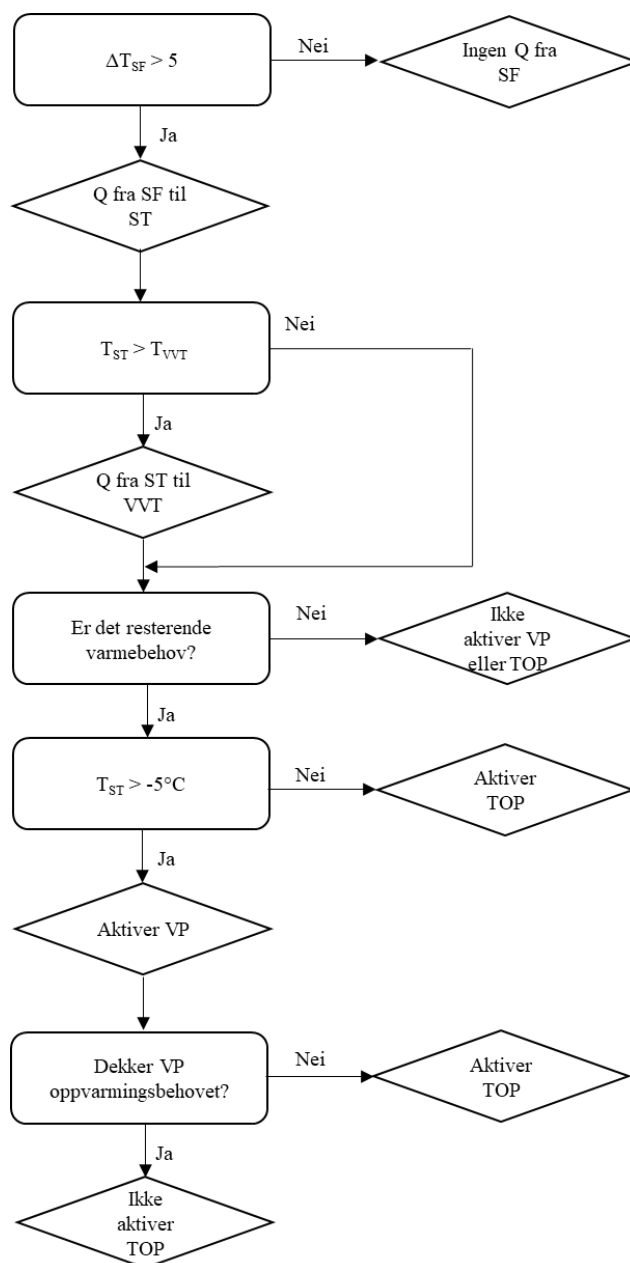
3.1.6 Øvrige valg

Det er valgt å ikke ha aktiv kjøling i boligen. Det er derimot antatt at brukere av boligen åpner vinduer på varme sommerdager. Dette er blitt realisert ved å legge inn automatisk vinduslufting i IDA ICE. Det er valgt en predefinert styring fra IDA ICE, hvor vinduslufting blir styrt av en PI regulator, og åpnes dersom temperaturen innendørs overstiger 25 °C.

Det er lagt inn radiator i begge etasjene i bygget. Radiatorene har en tur / retur temperatur på 45 / 35 °C.

3.2 SAHP varmeanlegg, prinsipp og implementering i ESBO

Det er valgt å gjøre undersøkelser av et indirekte solassistert varmepumpesystem med en egen tank til lagring av solvarme. Figur 13 viser flytdiagram for logisk kontroll av systemet. Flytdiagrammet viser forutsetninger for at topplast, varmepumpe og solvarme blir aktivert. Gjennom denne logikken vil levert varme bli prioritert ut fra varmekilde, hvor systemet alltid vil prioritere solvarme dersom dette er tilgjengelig. Varmepumpe blir prioritert fremfor topplast, hvor topplast kun blir aktivert dersom varmebehovet ikke kan dekkes av andre varmekilder.



Figur 13: Flytdiagram logisk prosess i varmeanlegg, hvor T er temperatur, SF er solfanger, ST er soltank, VVT er varmvannstank, VP er varmepumpe og TOP er topplast.

Oppbygging av varmeanlegget i ESBO har tatt utgangspunkt i et varmeanlegg laget automatisk av IDA ICE. Steg 1 – 3 viser overordnet hvordan varmesystemet ble realisert i ESBO.

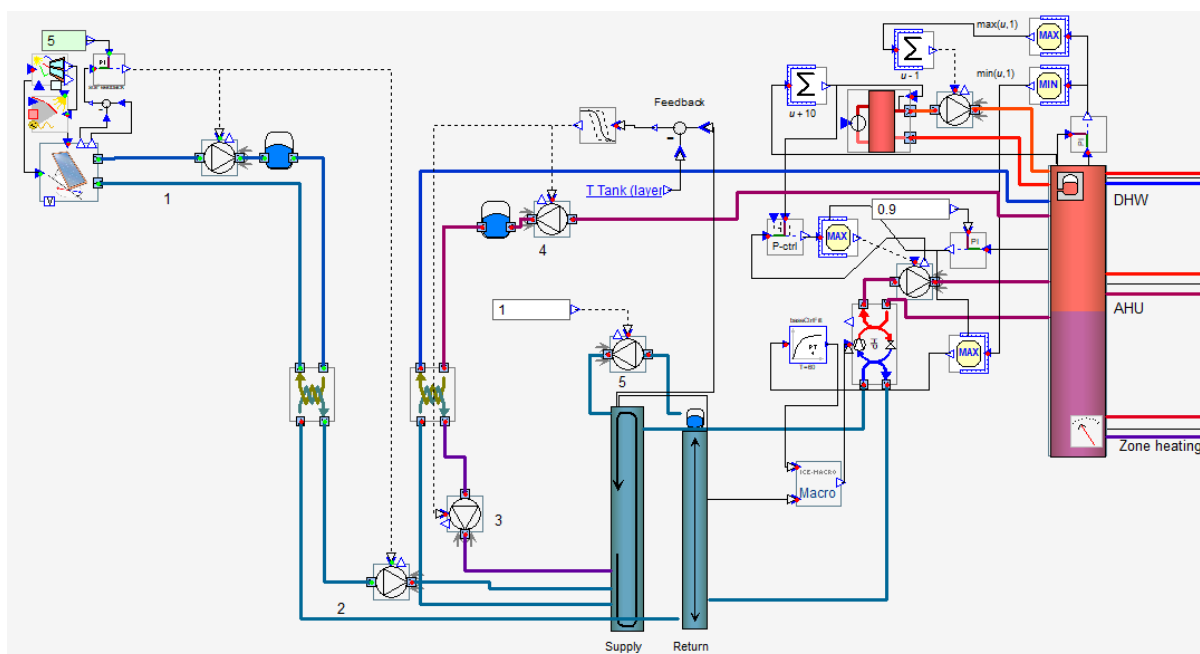
- Steg 1: Sett inn følgende komponenter i ESBO:

- o Væske/vann varmepumpe
- o Solfanger
- o Elektrisk toppvarme

Se vedlegg H.1 for bilde.

- Steg 2: Velg «build plant model». Vedlegg H.2 viser hvordan varmesystemet nå ser ut.

- Steg 3: Gjør endringer i varmeanlegget, med hensyn til flytdiagram vist i Figur 13. Varmeanlegget med endringer, er i sin helhet vist i vedlegg H.3. Figur 14 under viser varmeanlegget uten laster og uten tank til kjøling. Endringer i ESBO-anlegget er gjort av forfatter.



Figur 14: Utklipp av ESBO varmeanlegg for SAHP uten laster og kjøletank

Gjennom ESBO er det ikke mulig å sett opp et anlegg uten kjøling. Volumet til tanken for kjøling, samt kjøleeffekt kan derimot bli satt tilnærmet lik null. Dette gjør at kjøling i praksis uteblir.

Varmtvannstanken i anlegget er lagdelt, hvor det er valgt å ha to temperatursjikt. På grunn av vanskeligheter med å få simuleringer til å kjøre ved bruk av lagdelt soltank, ble det valgt å bruke tank uten temperatursjikt. Dette kan ha innvirkning for hvor godt systemet fungerer, og dermed innvirkning på levert energi til boligen. Soltanken i ESBO anlegget er merket «Supply». Som vist i Figur 14 er det satt inn varmeveksler mellom soltanken, merket Supply og solfanger og mellom soltanken og varmtvannstanken. Det hadde vært ønskelig å ha varmevekslere i selve soltanken, og ikke utenfor. Dette hadde redusert antall pumper, da pumpe markert 2 og 3 i ESBO anlegg kunne uteblitt. Grunnen til at det er brukt varmevekslere utenfor

tanken er siden valgt tank ikke har denne muligheten. I praksis vil ikke økt antall pumper ha stor betydning for simuleringsresultatene, siden energibruken til de to ekstra pumpene er neglisjerbare.

For å logge data er det brukt energimetre og output filer i ESBO anlegget. Dette er gjort for levert varme fra varmpumpe, topplast og soltank. I tillegg er temperaturer og massestrømmer logget gjennom outputfiler.

3.2.1 Forklaring av ESBO anlegget

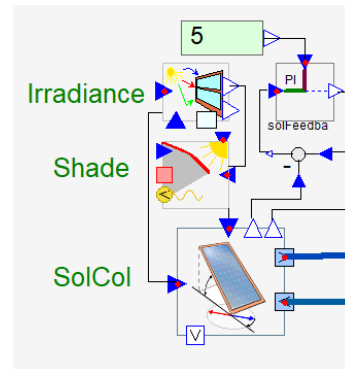
Figur 15 viser et utklipp av ESBO anlegget hvor solfangeren er i fokus. Solinnstråling til solfangeren er avhengig av to objekter, som i Figur 15 er markert «Irradiance» og «Shade». Irradiance leser av klimadata, og korrigerer solinnstråling som treffer solfangeren ut fra vinkel til planet og asimutvinkel. Shade korrigerer truffet innstråling dersom noe skygger for solfangeren.

Massestrømmer i anlegget blir bestemt ut fra pumper sitt inngangssignal og nominell massestrøm. Nominell massestrøm blir gitt dersom inngangssignalet til pumpen er 1. I varmeanlegg som er brukt, har alle pumpene en nominell massestrøm på 1 kg/s, utenom pumpe markert 5, hvor massestrømmen er satt til 0.1 kg/s.

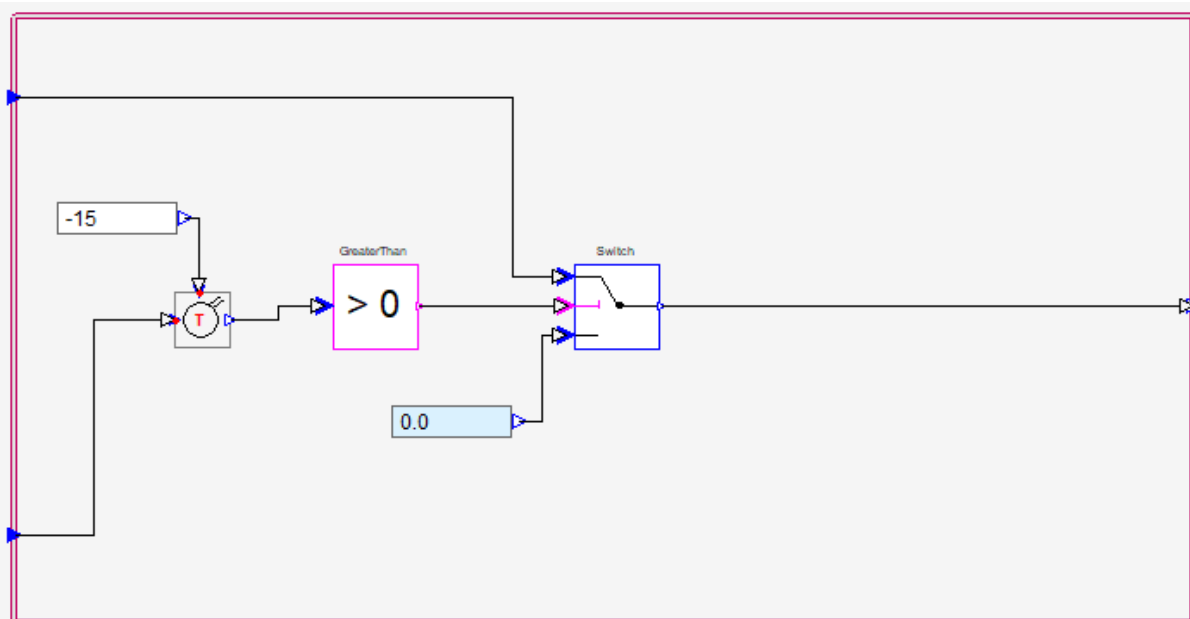
PI regulatoren over solfangeren gir signal ut fra temperaturdifferansen mellom inn- og utgang av i solfangeren. Denne differansen er fortegnssavhengig. Setpunkt er her satt til 5, hvor PI regulatoren aktiveres dersom temperaturdifferansen overstiger 5 °C. Dersom temperaturdifferansen blir høyere enn 5 °C vil utsignalet fra regulatoren øke. Denne regulatoren styrer pumpen som leverer varme fra solfanger til soltanken.

Det er satt inn en P-regulator som styrer pumpen mellom soltanken og varmtvannstanken. Denne gir i likhet med PI-regulatorene over solfangeren ut et signal basert på temperaturdifferanse, her mellom soltank og varmtvannstank. Utsignalet er proporsjonalt med temperaturdifferansen, hvor maks utsignal på 1 blir gitt ved en temperaturdifferanse på 2 °C.

Varmepumpen blir styrt ut fra varmebehov i varmtvannstanken. I tillegg er det satt inn en makro som stopper varmpumpen dersom temperaturen i soltanken er under en gitt temperatur. Utklipp av denne makroen er vist i Figur 16.



Figur 15: Utklipp solfanger fra ESBO



Figur 16: Makro for minimumstemperatur tilført fordamper

Makroen har som hensikt å bytte mellom to verdier, avhengig om en gitt forutsetning er tilfredsstillt. Forutsetningen er i dette tilfellet at dersom temperaturen ved målepunkt (soltanken), er lavere enn gitt grenseverdien (i dette tilfellet -15°C), vil verdien ut fra makroen bli satt til 0. Dersom temperaturen i soltanken er over -15°C , vil signalet være lik det opprinnelige signalet, gitt fra varmebehovet i varmtvannstanken. For at dette skal fungere, må det bli satt riktig dødbånd i termostaten. Dødbåndet definerer om termostaten skal gi en høy eller lav utgang dersom inngangssignalet er over settpunkt. For denne styringen er det nødvendig å endre dødbåndet til en negativ verdi (-1). Dette gjør at termostaten gir en høy verdi dersom inngangssignalet er større enn settpunkt.

Soltanken i systemet fungerer som varmekilde til varmepumpen, i tillegg til å mota og akkumulere varme produsert av solfangeren. Varmepumpens fordamper leverer lave temperaturer til soltanken. Produsert varme fra solfangeren øker disse temperaturene. På sommeren vil soltanken bli varm på grunn av et lavt varmebehov og høy produksjon av varme gjennom solfanger. Når temperaturen i soltanken overstiger temperaturen i varmtvannstanken vil en pumpe bli aktivert, og varme fra soltanken vil leveres direkte til varmtvannstanken gjennom en varmeveksler. Dersom det skulle bli for varmt i varmtvannstanken, vil denne varmen bli dumpet ved at en ventil åpnes.

Varmtvannstanken har to interne varmevekslere. Varme fra varmepumpen blir levert til varmtvannstanken gjennom HX 1, mens varme fra soltanken blir levert gjennom HX 2. Videre har varmtvannstanken en inn- og utgang for å avgi varme til ventilasjonsoppvarming, romoppvarming og varmt forbruksvann. Levert varme fra topplast har også en utgang og en inngang, uten varmeveksler.

3.2.2 Valg av parametere

Tabell 3 viser valgt verdi for et utvalg parametere i ESBO anlegget. Disse verdiene er for det meste uendrede verdier fra IDA ICE, med unntak av radius til varmtvannstanken, inngangshøyde av HX 2 i varmtvannstanken, samt arealet på solfangeren. I tillegg er minimumstemperatur for at varmepumpen satt til hensiktsmessig verdi. For parametere som ikke er vist i denne tabellen bruker initialverdier fra IDA ICE.

Tabell 3: Inputparametere i ESBO anlegg

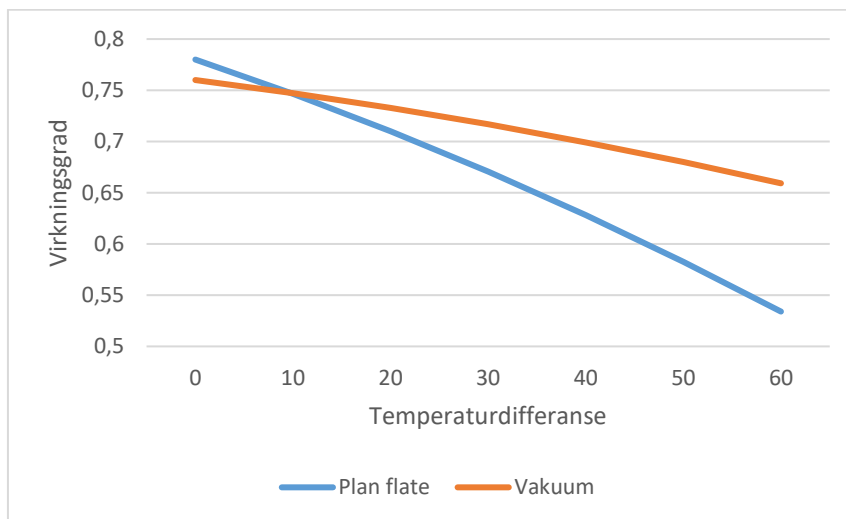
| Parameter | Initial |
|---------------------------------|---------|
| Lengde solfanger [m] | 3 |
| Bredde solfanger [m] | 3 |
| Soltank volum [m ³] | 0.3 |
| Nominell massestrøm | |
| Over solfanger [kg/s] | 1 |
| Mellom tanker [kg/s] | 1 |
| Konstant over VP [-] | 0,9 |
| Orientering [°] | 0 (sør) |
| Vinkel mot plantet [°] | 35 |
| Min temp VP [°C] | -15 |
| Varmtvannstank | |
| Antall lag [-] | 2 |
| Høyde lag 1 [m] | 1 |
| Høyde lag 2 [m] | 1 |
| R tank [m] | 0.3 |
| Høyde HX1 inn [m] | 0.0647 |
| Høyde HX1 ut [m] | 0.1294 |
| Høyde HX2 inn [m] | 0.4 |
| Høyde HX2 ut [m] | 0.001 |

Det er gjort simuleringer for både vakuum og plan solfanger. Valgte verdier for virkningsgrad til vakuum og plansolfanger er gitt av de tre parameterne η_0 ; k_1 ; k_2 , hvor valgte verdier er vist i Tabell 4 under. Disse verdiene er hentet fra en studie utført av ESTIF, og viser gjennomsnittsverdier for et utvalg testede solfangere i Europa [25].

Tabell 4: Valgte verdier for virkningsgrad solfanger

| Type solfanger | η_0 | k_1 | k_2 |
|-----------------|----------|-------|-------|
| Plan solfanger | 0,78 | 3,2 | 0,015 |
| Vakuumsolfanger | 0,76 | 1,2 | 0,008 |

Ut fra formel 1 jf. kapittel 2.2 er det laget en graf, vist i Figur 17. Denne grafen viser virkningsgraden til plan og vakuumsolfanger med parametere hentet fra Tabell 4. Virkningsgraden er vist ved ulike temperaturdifferanser mellom solfanger og omgivelsestemperatur, med en solintensitet $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Med valgte parametere vil plan solfanger ha bedre virkningsgrad ved temperaturdifferanser under 10 kelvin, mens vakuumsolfanger vil ha høyere virkningsgrad ved temperaturdifferanser høyere enn 10 kelvin.



Figur 17: Virkningsgrad solfanger med valgte verdier for η_0, k_1, k_2 . Ved ulik temperaturdifferanse solfanger og uteluft ved $E_g = 1000 \text{ [W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$.

3.2.3 Varmeanlegg uten solassister varmepumpe

Det er gjort sammenligninger mellom varmeanlegget beskrevet over og to andre prinsipp for oppvarming; oppvarming utelukkende med elektrisitet, samt oppvarming med tradisjonell solfanger. Disse varmeanleggene er laget automatisk av IDA ICE, med noen få endringer gjort i det tradisjonelle solfangeranlegget, hvor solfangeren er satt lik som i SAHP-anlegget. ESBO anlegg for disse anleggene er vist i Vedlegg I.

3.3 Økonomi

Det skal gjøres økonomiske betraktninger for varmeanlegget, hvor LCC (Livssyklus kostnad) med kun elektrisitet som oppvarming er satt opp mot LCC med bruk av SAHP med plan solfanger. Vakuumsolfanger er ikke undersøkt, da simuleringer viste at dette egner seg dårligere enn plan solfanger. Mer om dette i kapittel 4.2.3.

For å beregne lønnsomhet er det tatt utgangspunkt i en metode fra en studie av Ala Hasan et. al. [26]. I denne studien er metoden brukt til å undersøke lønnsomheten til ulike bygningsparametere som veggtykkelse, u-verdi på vinduer og så videre, men metoden kan også bli brukt ved undersøkelse av andre energiltak. Metoden gir en differanse mellom LLC ved en base case, og LCC ved det aktuelle tiltaket. Denne differansen er gitt av formel 4. På denne måten er det ikke nødvendig å finne kostnader til komponenter som ikke er endret fra base case. Metoden gir en enkelt diskonteringsfaktor hvor kalkulasjonsrente, levetid og økning av energipris er hensyntatt. Fremtidige kontantstrømmer blir dermed diskontert til nåverdi.

$$dLCC = a \cdot e_p \cdot dE \quad (4)$$

Hvor $dLCC$ er differanse mellom LCC ved aktuelt tiltak og base case, e_p er energipris, dE er årlig energidifferanse mellom aktuelt tiltak og base case, a er diskonteringsrate, hensyntatt en økning i fremtidige energipriser og levetid. Diskonteringsraten a er gitt av formel 5.

$$a = 1 - \frac{(1 + r_e)^{-n}}{r_e} \quad (5)$$

Hvor r_e er kalkulasjonsrenten og n er levetid.

Ved en positiv $dLCC$ vil investeringen være lønnsom, og jo høyere $dLCC$ desto mer lønnsom er investeringen.

Kalkulasjonsrenten er satt etter finansdepartementets rente ved statlige tiltak på 4% [27]. Årlig økning av energipris og levetid på anlegget er antatt å være henholdsvis 5% og 30 år. Energipris er satt til gjennomsnittlig strømpris for husholdninger i 2018, inkludert nettleie og avgifter på til sammen 1,15875 kr/kWh [28]. Vedlegg J viser energipriser i hvert kvartal fra SSB.

Formel for $dLCC$ blir implementert IDA ICE ved bruk av graphical script. Dette er beskrevet nærmere i kapittel 3.3.2. Tilbakebetalingstid vil også bli undersøkt, hvor tilbakebetalingstiden betraktes som levetid som gir $dLCC$ lik null.

3.3.1 Investering

Investeringskostnadene er hentet fra free energy [29]. Free energy er et firma i Norge som spesialisere seg på hybride varmepumpeløsninger. På free energy sine nettsider kan brukeren få en prisindikasjon basert på energibehov og størrelse på bygg. Prisindikasjonen viser blant annet priser for varmepumpe, solfanger, varmtvannstank, ekspansjonskar, pumper, styring og ventiler. I tillegg vises mulig støtte fra enova, hvor det er vist til Enova sine hjemmesider [30].

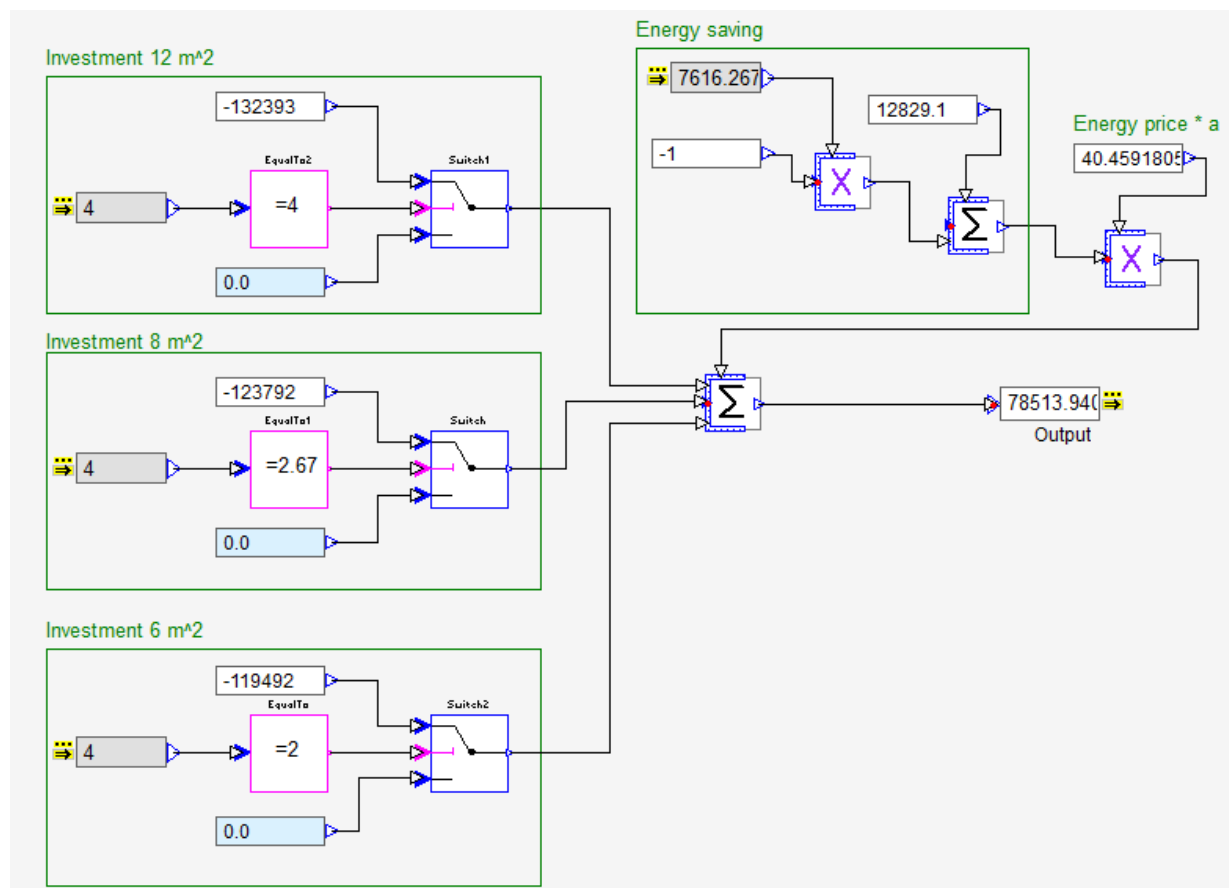
Komponentene er kompatible med hybride varmepumpeløsninger, og vil derfor være godt egnet til SAHP anlegg. For å få priser på forskjellig areal av solfanger er det tatt ut prisindikasjon ved forskjellig energibehov. Prisindikasjon fra forhandler for tre forskjellige areal, samt alle valgte verdier for investering er vist i Vedlegg K. Tabell 5 viser sammendrag av investeringskostnadene som blir brukt.

Tabell 5: Oppsummering av investeringskostnader for 6, 8 og 12 m²

| Areal solfanger | 6 m ² | 8 m ² | 12 m ² |
|-------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Solfanger [kr] | 23.128 | 27.828 | 37.229 |
| Øvrige komponenter [kr] | 127.564 | 127.564 | 127.564 |
| Enova støtte [kr] | -31.200 | -31.600 | -32.400 |
| Total investering [kr] | 119.492 | 123.792 | 132.393 |

3.3.2 Lønnsomhet

Metoden for å beregne lønnsomhet gitt over er implementert som et skript i IDA ICE, vist i Figur 18 under.



Figur 18: Utklipp av script brukt i lønnsomhetsberegninger

Scriptet gir ut dLCC ved tre ulike tiltak. Tiltakene er her satt til tre ulike areal på solfanger. Solfangeren har en fast bredde på 3 m. Utgangen fra de ulike switchene er enten investeringskostnaden eller null, avhengig av om solfangerens lengde i den aktuelle simuleringen samsvarer med den gitte verdien i «equal-to» boksen i makroen. For eksempel vil investeringskostnader for 12 m² bli brukt, dersom lengden på solfangeren er 4. Energibesparelsen er gitt av den totale energibruken utelukkende med elektrisitet som oppvarming, satt inn som en konstant subtrahert med den totale energibruken i den aktuelle simuleringen. Outputverdien representerer dLCC.

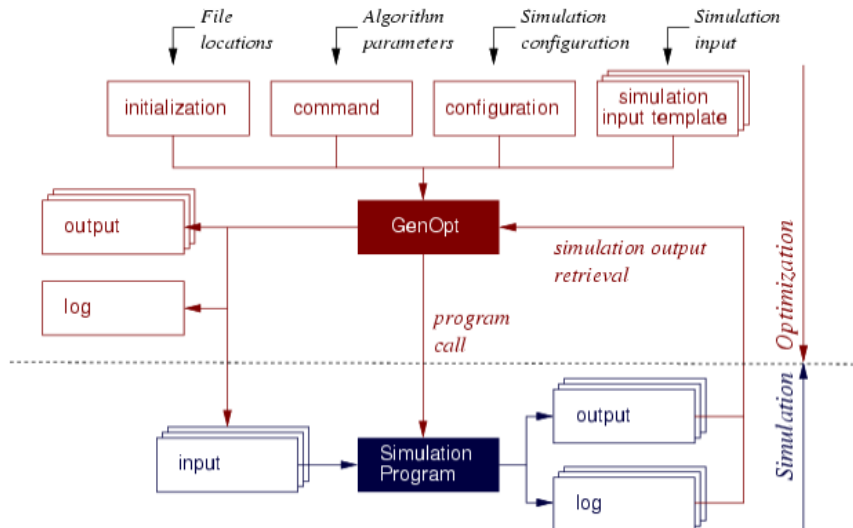
3.4 Optimalisering

Det skal gjøres optimaliseringer av parametere i varmeanlegget, hvor optimaliseringene gjennomføres med bruk av programmet GenOpt. Det er gjort optimaliseringer med hensyn til energi, hvor GenOpt blir satt til å finne sammensetningen av parametere som gir lavest mulig energi levert til boligen, og med hensyn på økonomi, hvor GenOpt blir satt til å finne høyest mulig dLCC.

3.4.1 GenOpt

GenOpt utfører optimalisering ved å automatisk skrive input til et eksternt simuleringsprogram, i denne oppgaven IDA ICE. GenOpt blir gitt et sett med inngangsverdier (variabler), samt en utgangsverdi (resultat) fra IDA ICE modellen. Valgt utgang blir gitt en funksjon, enten min eller maks avhengig av om det ønskes en så lav eller høy utgangsverdi som mulig. GenOpt bruker enten kontinuerlig eller diskontinuerlige variabler, hvor minst en variabel må være kontinuerlig. I denne oppgaven er asimuttvinkelen til solfangeren satt til kontinuerlig variabel, mens resterende parametere er det valgt som diskontinuerlige verdier. Dette er gjort for å redusere tiden til optimaliseringsprosessen.

GenOpt gjennomfører en runde med simuleringer, og leser av utgangsverdiverdi. Deretter bestemmes inngangsverdier for neste runde med simuleringer. Hele prosessen gjentas, til den mest gunstige sammensetningen av inngangsverdier for å tilfredsstille funksjonen er funnet. Figur 19 viser flytskjema for optimaliseringsprosessen, hentet fra GenOpt sine hjemmesider [31].



Figur 19: Flytskjema for optimalisering med GenOpt

GenOpt kan bruke flere algoritmer, hvor det i denne oppgaven er brukt en hybridalgoritme. Dette er algoritmen GenOpt bruker før det blir gjort noen endringer i programmet. Algoritmen er vist i Vedlegg B.

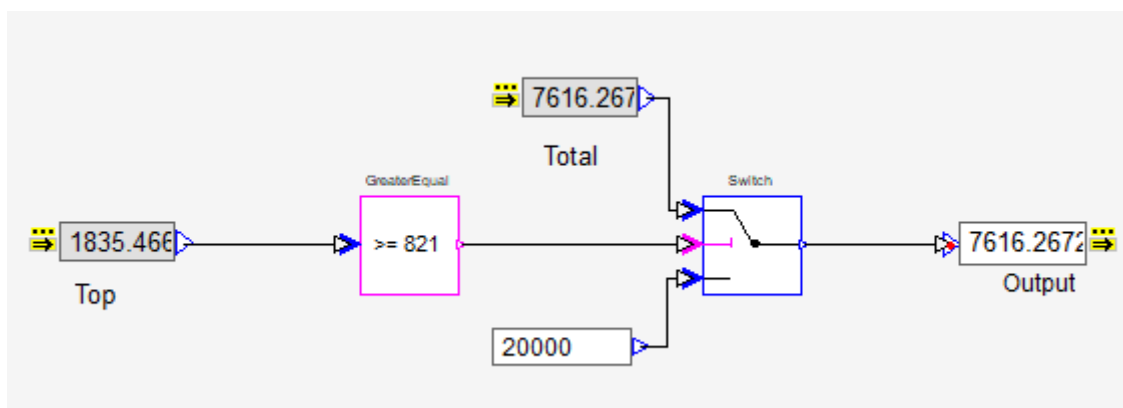
3.4.2 Optimalisering med hensyn på energi

For optimalisering med hensyn på energi er GenOpt satt til å finne minimum levert energi til bygget. Det er gjort optimaliseringer med klimadata for Oslo, Kristiansand og Trondheim. Dette er kun gjort optimaliseringer med bruk av flat solfanger. Parametere satt inn som inngangsverdier, og verdiområdet for disse er vist i Tabell 6.

Tabell 6: Parametere og verdiområdet for parametere brukt til optimalisering av energi

| Parameter | Verdiområdet |
|---------------------------------|--------------|
| 70, 80, 90 % | N.A |
| Dekningsgrad SAHP | N.A |
| Lengde solfanger [m] | 1-5 |
| Lengde solfanger [m] | N.A |
| R tank [m] | 0.1-0.6 |
| Soltank volum [m ³] | 0,7-1,3 |
| Nominell Massestrøm | |
| Over solfanger [kg/s] | 0.5 - 2 |
| Mellom tankene [kg/s] | 0.5 - 2 |
| Orientation [°] | -15 - 15 |
| Slope [°] | 30 - 45 |
| Min temp VP [°C] | -20 - 0 |

I et forsøk for å unngå overdimensjonering av anlegget er det valgt å sette inn betingelse om at SAHP maksimalt skal dekke en gitt andel av oppvarmingsbehovet. Det er gjort optimaliseringer hvor energidekningsgraden til SAHP er satt til 70, 80 og 90%. Denne betingelsen er satt ved hjelp av et graphical script i IDA ICE, vist i Figur 20 under.



Figur 20: Script for betingelser angående dekningsgrad

Verdiene merket Top og Total er henholdsvis energibruk for topplast og total energi levert til boligen i den aktuelle simuleringen. I boksen større eller lik, er det oppgitt en verdi for minimum energibruk til topplast, og fungerer som betingelse. Denne verdien tilsvarer 10, 20 eller 30 % av energibehovet til oppvarming, avhengig om betingelsen er satt til 70, 80 eller 90% dekningsgrad fra SAHP. Energibehovet til oppvarming er funnet fra simuleringer før optimalisering. Vedlegg L viser minimum energibruk til topplast for hver optimalisering.

Dersom betingelsen ikke er møtt, vil switchen gi ut en verdi på 20000, som er mye høyere enn total levert energi til bygget. Verdien merket Output Figur 20 er satt som utgang i GenOpt, hvor funksjonen til utgangen er satt til minimum. På denne måten leter GenOpt etter det settet med variabler som gir lavest mulig total levert energi til boligen, gitt at kravet om dekningsgrad er oppfylt.

3.4.3 Optimalisering med hensyn på økonomi

Det er også utført optimalisering av systemet, hvor GenOpt blir satt til å finne en maks verdi av dLCC. Dette er gjort ved å sette GenOpt til å finne høyest mulig utgangsverdi, hvor utgangen er satt til å være «output» i skriptet vist i Figur 20. Optimaliseringen bruker litt færre parametere enn optimaliseringen for energi. Dette er gjort for å redusere tiden til optimaliseringen. På grunn av tidsbegrensning er det kun gjort optimaliseringer med hensyn til lønnsomhet i Oslo. I tillegg til å finne settet med variabler som gir høyest dLCC, er det også blitt logget total levert energi til bygget. Tabell 7 viser parameter området for variabler brukt ved optimaliseringen.

Tabell 7: Parameterområdet brukt til optimalisering mht. lønnsomhet

| Parameter | Verdi |
|---------------------------------|------------|
| Lengde solfanger [m] | 2; 2.76; 4 |
| Nominell massestrøm | |
| Over solfanger [kg/s] | 0.5 – 2 |
| Mellom tankene [kg/s] | 0.5 – 2 |
| Vinkel mot planet [°] | 30 – 50 |
| Radius varmtvannstank [m] | 0.2 – 0.4 |
| Volum soltank [m ³] | 0.7 – 1.3 |
| Asimutvinkel [°] | 345 – 375 |

3.5 Behandling og presentasjon av resultater

Det er gjennomført energisimuleringer over et helt år for Oslo, Kristiansand og Trondheim med ulike varmeanlegg. Varmeaneleggene som undersøkes er:

- Oppvarming med utelukkende elektrisitet
- Oppvarming med plan solfanger og elektrisitet
- Oppvarming med vakuumsolfanger og elektrisitet
- Oppvarming med solassistert varmepumpe med plan solfanger og elektrisitet
- Oppvarming med solassistert varmepumpe med vakuumsolfanger og elektrisitet

Hvilke resultater som tas ut fra hver enkelt case avhenger av resultater forfatter ser på som relevant for studien og for den enkelte casen. Om ikke annet er nevnt, er energibruk, energibesparing osv. årlige verdier.

Varmebehov til boligen blir undersøkt i Oslo, Kristiansand og Trondheim. Dette blir gjort gjennom simuleringer med oppvarming utelukkende med elektrisitet. Det vil her bli undersøkt hvor mye av varmebehovet i boligen som kommer fra ventilasjonsvarme, romoppvarming og oppvarming av varmt tappevann.

Produsert varme blir undersøkt ved årssimuleringer for alle områder med ulike prinsipp for oppvarming. Det er undersøkt hvor mye varme som blir levert fra direkte sol, varmepumpe og topplast, hvor disse resultatene også er brukt for å vise dekningsgrader i de ulike varmeaneleggene.

Spart energi ved bruk av alternativt varmesystem er gitt av total levert energi til boligen med kun elektrisitet for oppvarming, fratrukket total levert energi for den spesifikke casen. På denne måten vil energibruken til pumper, og eventuelle andre forhold som påvirker energibehovet bli ivare tatt.

Optimalisering mht. energi og dekningsgrad er gjennomført i Oslo, Kristiansand og Trondheim, med tre ulike dekningsgrader. Etter optimalisering er det gjennomført årssimuleringer ved optimale parametere for alle caser. Optimalisering med hensyn til økonomi er kun gjennomført med Oslo-klima. For lønnsomhetsberegninger er det antatt at optimal sammensetning av parametere er like for Oslo, Kristiansand og Trondheim.

Resultatene fra simuleringer er hentet fra output filer og sammendrag i IDA ICE. Resultatene er i stor grad eksportert til Excel hvor det er laget grafer og tatt ut viktige resultater. Noen resultater er også presentert som utklipp direkte fra IDA ICE.

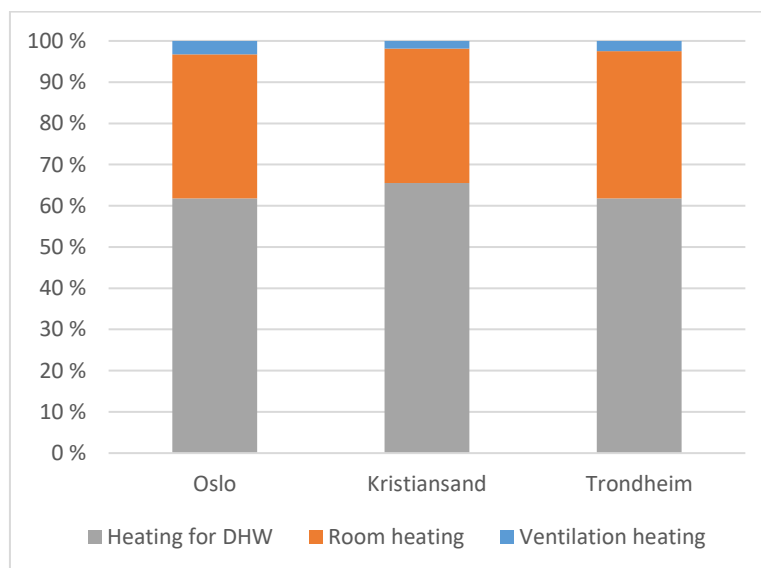
4 Resultater og diskusjon

4.1 Varmebehov til boligen

Varmebehovet til boligen består av ventilasjonsoppvarming, romoppvarming og oppvarming av tappevann. Energibehovet fordelt på de ulike postene, og ved ulike klimadata er vist i Tabell 8 og Figur 21. Data for resultatene er hentet fra IDA ICE simuleringer med bruk av varmeanlegg basert utelukkende på elektrisitet.

Tabell 8: Årlig oppvarmingsbehov ved ulike varmeposter for Oslo, Kristiansand og Trondheim

| Energibehov | Oslo [$\frac{kWh}{\text{år}}$] | Kristiansand [$\frac{kWh}{\text{år}}$] | Trondheim [$\frac{kWh}{\text{år}}$] |
|------------------------------|----------------------------------|--|---------------------------------------|
| Ventilasjonsvarme | 265 | 143 | 202 |
| Romoppvarming | 2871 | 2526 | 2935 |
| Varmt tappevann | 5078 | 5078 | 5078 |
| Ventilasjon og romoppvarming | 3136 | 2669 | 3135 |
| Totalt varmebehov | 8214 | 7747 | 8215 |



Figur 21: Fordeling av varmebehov til bygget avhengi av lokalsjon

Fra resultatene kommer det frem at den største energiposten er oppvarming av varmt tappevann, som står for opptil 65% av det totale varmebehovet. Dette skyldes at bygget som er undersøkt har et meget lavt varmetap som følge av tiltak for å oppfylle passivhuskrav.

Resultatene viser at varmebehovet i Trondheim og Oslo er tilnærmet likt, mens Kristiansand har et noe lavere varmebehov. Klimadata brukt i simuleringer, jf. Vedlegg D, viser at

årsmiddeltemperatur i Trondheim er 0,5°C lavere enn i Oslo. Det var derfor forventet at Trondheim skulle ha et noe høyere varmebehov i forhold til Oslo. Klimadataene viser derimot også at temperaturdifferanser mellom sommer og vinter er lavere i Trondheim sammenlignet med Oslo. Dette kan forklare at varmebehovet er likt for de to stedene, siden det i sommermånedene ikke vil være et varmebehov noen av stedene.

Det simulerte energibehovet satt opp mot kravet om maks energibruk til oppvarming gitt i NS 3700 er vist i Vedlegg M. Resultatene viser at passivhuskravet angående energibruk til oppvarming er oppfylt for samtlige steder.

4.2 Energisimuleringer før optimalisering

På grunn av antall caser og forhold som undersøkes, vil kun resultater av spesiell interesse være presentert i dette kapitlet. COP, produsert varme og temperaturer i varmtvannstank for samtlige simuleringer før optimalisering er vist i Vedlegg P.

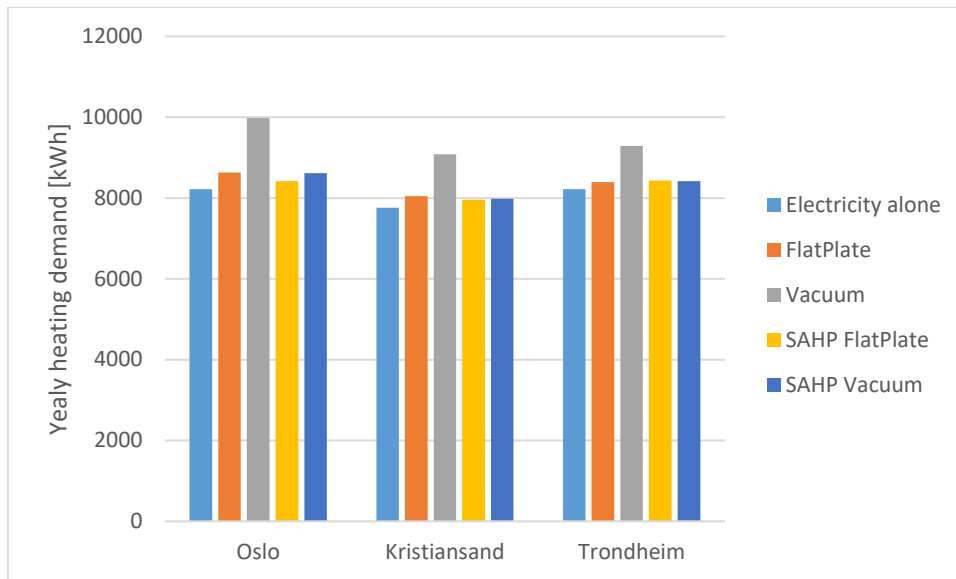
Videre vil det blant annet bli diskutert dekningsgrader fra ulike energikilder. I denne sammenhengen er energikilde en betegnelse på komponent som leverer varme til varmtvannstanken i varmeanlegget. De ulike energikildene er:

- Topplast, gitt av oppvarming fra direkte elektrisitet levert av elkjel.
- Direkte sol, gitt av varme levert direkte fra soltank til varmtvannstank.
- Varmepumpe, gitt av varme levert fra varmepumpens kondensator.

Total dekningsgrad for SAHP er gitt som summen av levert varme fra varmepumpe og direkte sol.

4.2.1 Produsert varme

Total produsert varme for de ulike casene er vist i Figur 22 under, hvor total produsert varme er gitt av summen levert varme til varmtvannstank fra samtlige energikilder.



Figur 22: Total årlig produsert varme ved ulike prinsipper for oppvarming

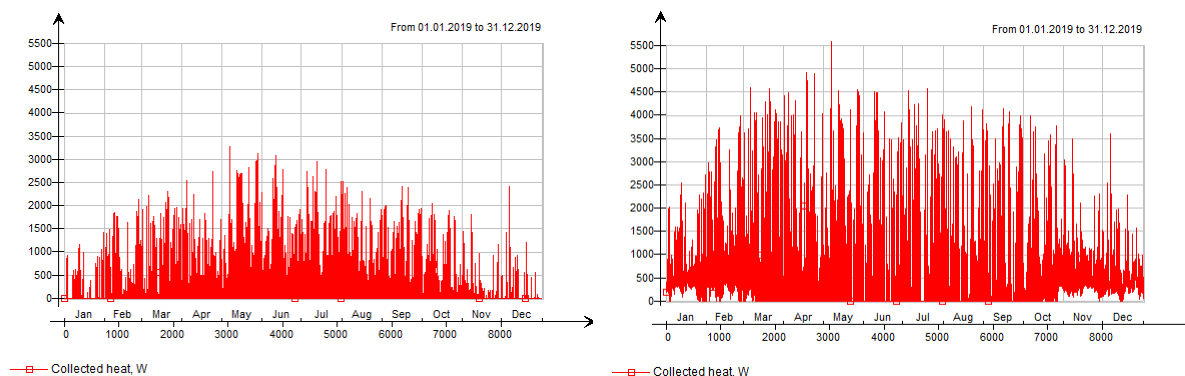
Simuleringer viser at total produsert varme varierer ved bruk av forskjellige oppvarmingsanlegg. Dette tyder på at noe av den produserte varmen ikke blir brukt til nyttbar oppvarming, og kan derfor angis som tap i varmesystemet. Som Figur 22 viser er tapet størst i solanlegg uten varmepumpe. I disse varmeanleggene leveres produsert varme fra solfangeren direkte til varmtvannstanken. Dette gir mindre akkumuleringsmuligheter sammenlignet med SAHP varmeanleggene, hvor det blir brukt en egen soltank. Mye av tapet er derfor sannsynligvis en konsekvens av for liten akkumuleringsmulighet, hvor produsert varme ikke blir fordelt til tidspunkt hvor det er varmebehov i boligen. Dette fører igjen til overoppheting i varmtvannstanken, og at noe av den produserte varmen derfor må bli dumpet.

Resultatene viser at bruk av vakuumsolfanger gir et høyere tap enn bruk av plan solfanger. Dette kommer av at vakuumsolfangere kan levere høye temperaturer uten varmetap til omgivelsene, noe som igjen fører til en overproduksjon av varme på sommeren. En medvirkende årsak til overproduksjonen er at produsert solenergi i SAHP systemer dels går til varmepumpen, hvor varmepumpens fordamper reduserer temperaturen på væsken som flyter gjennom solfangeren.

Dette avviket er et interessant resultat i seg selv. Det antyder at noe av den produserte varmen må bli dumpet, og kan antyde at enten akkumulatortanken er for liten, eller at solfangeren er for stor. I tillegg er denne observasjonen viktig for videre vurderinger av energibruk til oppvarming og dekningsgrader fra energikilder. Videre presenterte resultater har tatt utgangspunkt i at all tap i systemet, inkludert overproduksjon, kommer fra direkte levert varme fra soltanken. For å ta hensyn til dette er varme levert direkte fra soltank fratrukket tap i varmeanlegget. Vedlegg N viser hvordan forholdet mellom tap og faktisk spart energi er vurdert for tradisjonelt solvarmeanlegg med vakuumsolfanger.

4.2.2 Varme produsert fra solfanger

Figur 23 viser produsert varme fra solfanger for anlegg med plan solfanger i et tradisjonelt solfangeranlegg, og SAHP anlegg med plan solfanger med klimadata fra Oslo. Alle parametere for selve solfangeren er de samme.

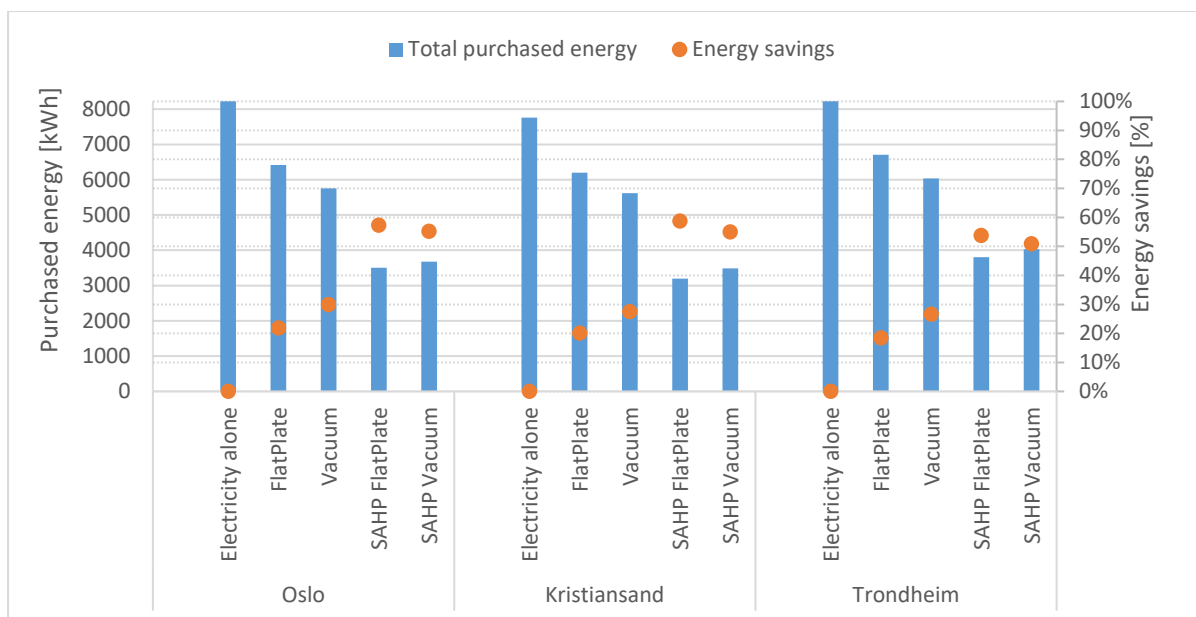


Figur 23: Produsert varme fra solfanger i Oslo. Graf til høyere produsert varme i et tradisjonelt solfangersystem, og graf til venstre viser produsert varme i et SAHP system

Resultatene viser ulik fordeling og mengde produsert energi for de to anleggene. Den totale produserte varmen fra solfangeren med bruk av SAHP er 4767 kWh, mens den for tradisjonelt solfangeranlegg er 2212 kWh. Produsert energi fra solfangeren er med andre ord mer enn doblet ved bruk av SAHP. Dette er en konsekvens av at varmepumpen leverer lave temperaturer som reduserer tur-temperaturen inn i solfangeren, som igjen øker virkningsgraden og antall driftstimer til solfangeren. Dette resultatet er forventet, da en av hensiktene med bruk av SAHP er å øke effektivitet til solfangeren.

4.2.3 Levert og spart energi til oppvarming

Figur 24 under viser kWh elektrisitet levert til oppvarming ved hver enkelt case, samt spart elektrisitet til oppvarming. Spart elektrisitet er gitt av total levert energi til bygget med utelukkende elektrisitet til oppvarming, fratrukket total levert energi til bygget med et alternativt varmesystem. På denne måten blir energibruk til pumper og eventuelle tap bli ivaretatt. Total levert energi levert til bygget, inkludert teknings utstyr, vifter og belysning er vist i Vedlegg O.



Figur 24: Årlig levert og spart elektrisitet til oppvarming i bygget

Tabell 9 viser spart elektrisitet til oppvarming for de ulike systemene i kWh og i prosent.

Tabell 9: Årlig spart energi til oppvarming ved ulike prinsipp for oppvarming og plassering av boligen, sammenlignet med oppvarming basert utelukkende på elektrisitet

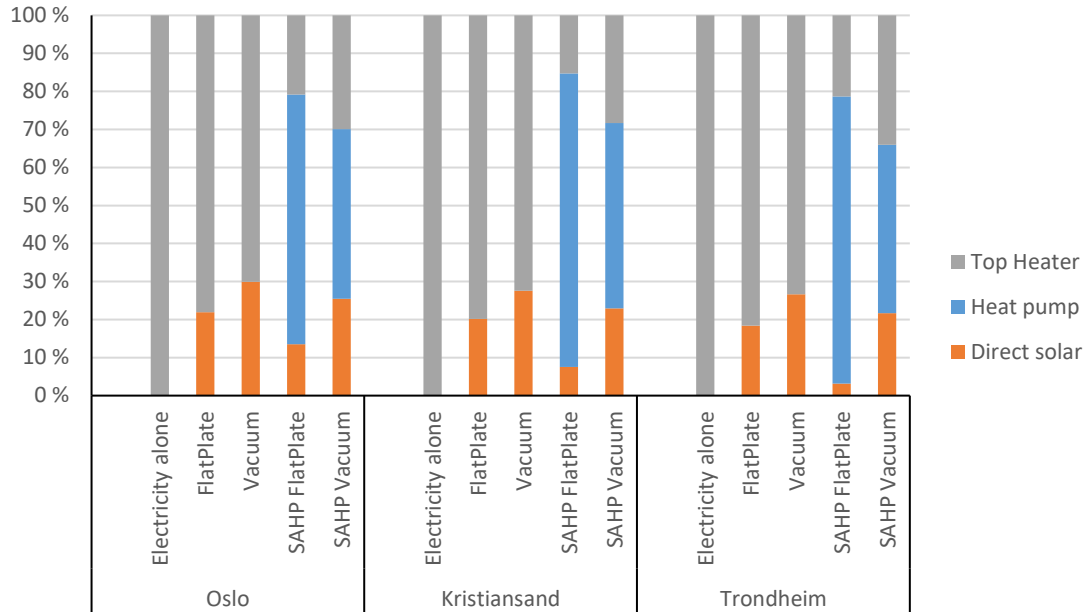
| | Oslo | Kristiansand | Trondheim |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| Plan solfanger [kWh] | 1805 (21,9%) | 1565 (20,2%) | 1519 (18,5%) |
| Vakuumsolfanger [kWh] | 2465 (30,9%) | 2140 (27,6%) | 2194 (26,7%) |
| SAHP Plan [kWh] | 4626 (56,3%) | 4496 (58,0%) | 4368 (53,1%) |
| SAHP Vakuum [kWh] | 4400 (53,5%) | 4146 (53,4%) | 4068 (49,5%) |

Ved bruk av SAHP vil levert elektrisk energi brukt til oppvarming bli redusert med mellom 50 – 60 % sammenlignet med elektrisitet alene. Sett i kWh er det høyest energibesparing i Oslo, mens det i % er det høyest energibesparing i Kristiansand. Det kommer også frem at ved bruk av SAHP gir plan solfanger høyere besparing enn vakuumsolfanger. Dette blir videre diskutert i kapittel 4.2.4.

Vedlegg N viser kravet til energiforsyning for passivhus i de tre lokasjonene. Resultatene viser at alle systemene som benytter SAHP tilfredsstiller passivhuskravet om energiforsyning.

4.2.4 Dekningsgrader fra ulike energikilder

Fordelingen av energibruk fra de ulike energikildene ved ulike prinsipp for oppvarming er vist i Figur 25. Vedlegg X viser tabell med dekningsgrader i prosent, og levert varmeenergi i kWh for alle varmekilder og varmeanlegg som er undersøkt.



Figur 25: Dekningsgrader fra ulike energikilder ved ulike prinsipp for oppvarming

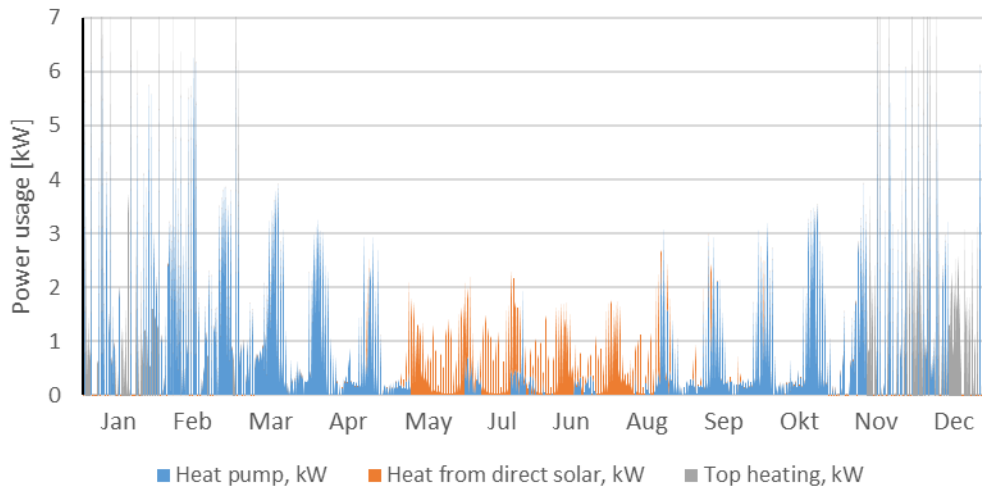
Resultatene viser at andel energi levert fra direkte sol er noe høyere uten bruk av varmepumpe. Dette skyldes at en stor del av varmen produsert av solfanger i et SAHP system blir brukt som kilde til varmepumpens fordampere.

I varmeanlegg med bruk av SAHP viser resultatene en høyere andel oppvarming fra direkte sol med bruk av vakuumsolfanger sammenlignet med bruk av plan solfanger. Bruk av vakuumsolfanger gir derimot redusert levert varme fra varmepumpe, samtidig som levert varme fra topplast øker, sammenlignet med bruk av plan solfanger. Den totale dekningsgraden for SAHP systemene er ved bruk av plan solfanger 79% i Oslo og Trondheim, og 84% i Kristiansand. For vakuumsolfanger er dekningsgraden 70% i Oslo, 72% i Kristiansand og 66% i Trondheim.

Med bruk av plan solfanger i et SAHP er dekningsgraden fra direkte sol 13,5% i Oslo, 7,5% i Kristiansand og 3,2% i Trondheim. At resultatene viser en noe høyere dekningsgrad fra direkte sol i Oslo sammenlignet med Kristiansand var noe overraskende. Dette kommer sannsynligvis av at klimafil for Kristiansand gir lavere solinnstråling enn klimafil for Oslo. I følge en rapport Multiconsult har utført for Enova, har Kristiansand en høyere solinnstråling enn Oslo [32]. Det kan derfor bli stilt spørsmål om klimafilene som er brukt er riktige.

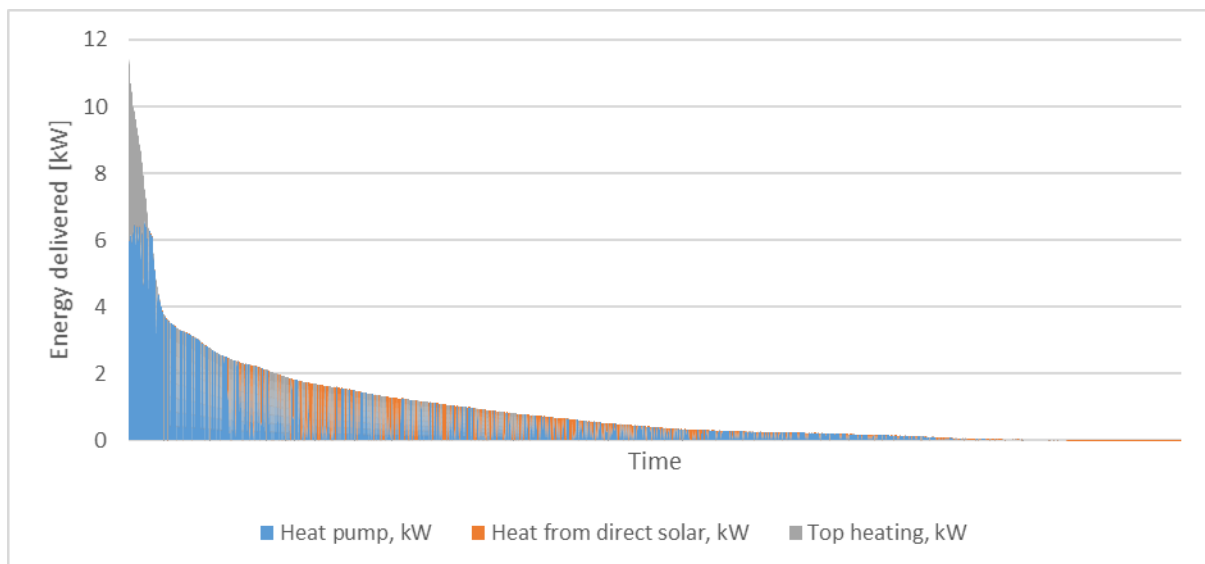
Fra kapittel 4.2.3 kommer det frem at den leverte elektriske energien til oppvarming er høyere ved bruk av vakuumsolfanger sammenlignet med plan for systemer basert på SAHP. Plan solfanger kan derfor sies å fungere bedre enn vakuumsolfanger for SAHP anlegg. Dette er en konsekvens av at vakuumsolfanger har vesentlig lavere termisk ledningsevne enn plan solfanger. En lav termisk ledningsevne er positivt dersom temperaturen i solfangeren er høy i forhold til omgivelsestemperaturen, da tap til omgivelsene reduseres. På grunn av lave temperaturer fra fordampere vil temperaturen gjennom solfangeren i store deler av året være lav, og i enkelte timer lavere enn omgivelsestemperaturen. Dermed vil en lav termisk ledningsevne

i deler av året telle negativt for levert energi fra solfanger. I tillegg er den optiske virkningsgraden til plansolfanger noe større enn for vakuumsolfanger, noe som øker virkningsgraden ved lave dT verdier. Produsert energi ved ulike energikilder over ett år er vist i Figur 26 under. Figuren viser SAHP varmesystem med plan solfanger i Oslo.



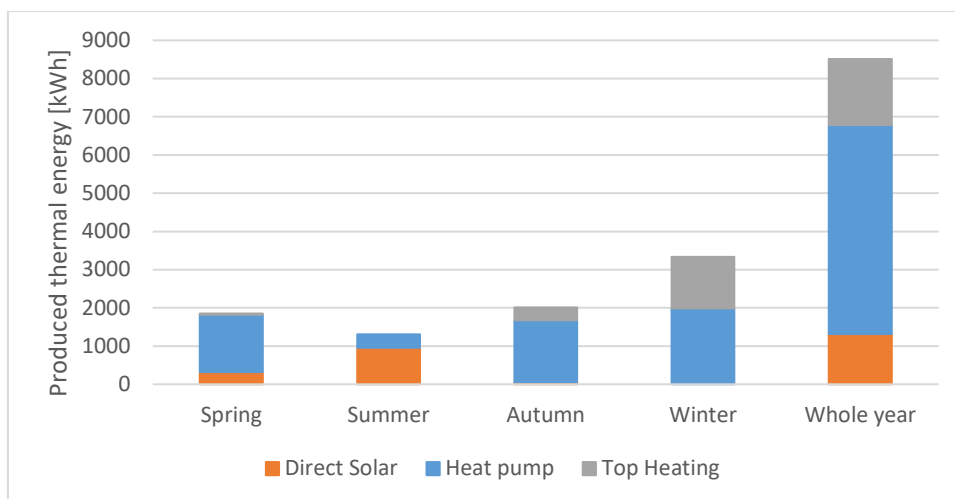
Figur 26: Produsert energi over ett år for Oslo klima

Varme fra direkte sol står for mesteparten av oppvarmingen mellom mai og august. Det er også laget et varighetsdiagram, vist i Figur 27. Verdiene i varighetsdiagrammet er sortert ut fra total levert varme til varmtvannstank.



Figur 27: Varighetsdiagram for produsert energi over et år i Oslo

Maks levert effekt fra varmepumpen og topplast er på henholdsvis 6,8, og 6,0 kW. Dette gir en effektdekningsgrad for varmepumpen på 53%. Produsert energi ut fra sesonger er vist i Figur 28.



Figur 28: Produsert energi i varmesystemet basert på varmeavgiver og årstid for Oslo klima. Datoer for vår, sommer, høst og vinter er henholdsvis 1. mars – 31 mai; 1. juni – 31 august; 1. september – 31 november; 1. Desember – 31 februar.

Tabell 10 viser % energiproduksjon fra direkte solvarme, topplast og varmepumpe for hver årstid, og Tabell 11 viser % energiproduksjon ut fra ulike energikilder over et helt år året.

Tabell 10: Energiproduksjon fra ulike energikilder i prosent for hver enkelt årstid

| % produksjon for hver sesong | Vår | Sommer | Høst | Vinter |
|------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Direkte sol | 17,08 % | 72,78 % | 2,34 % | 0,00 % |
| Topplast | 2,03 % | 0,00 % | 16,59 % | 40,55 % |
| Varmepumpe | 80,89 % | 27,22 % | 81,07 % | 59,45 % |
| Total | 100 % | 100 % | 100 % | 100 % |

Tabell 11: Energiproduksjon fra ulike energikilder i prosent over et helt år

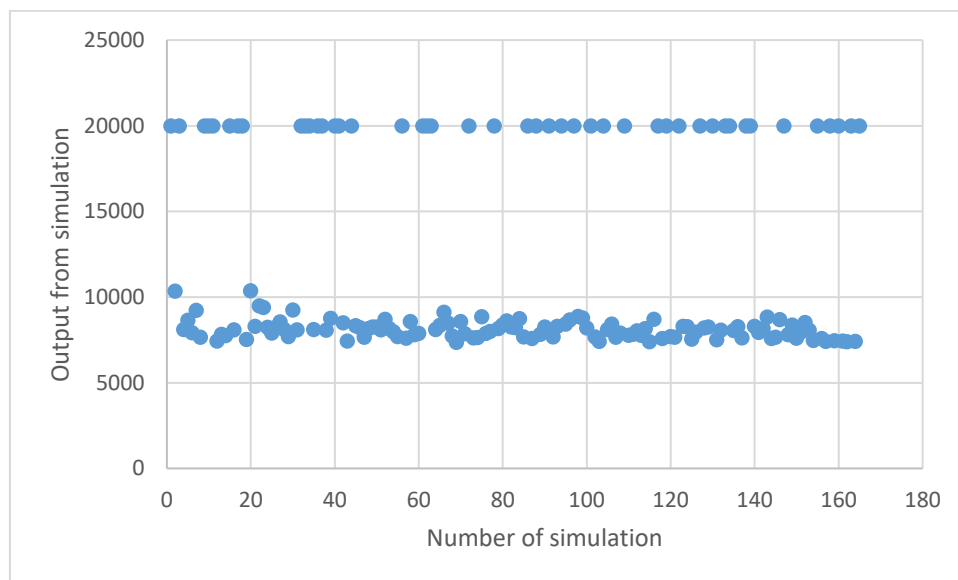
| % produksjon over et år | Vår | Sommer | Høst | Vinter | Hele året |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| Direkte sol | 24,06 % | 72,36 % | 3,58 % | 0,00 % | 100 % |
| Topplast | 2,19 % | 0,00 % | 19,35 % | 78,46 % | 100 % |
| Varmepumpe | 27,40 % | 6,50 % | 29,82 % | 36,27 % | 100 % |

Resultatet viser at 72 % av all produsert solenergi skjer på sommeren, hvor solvarme dekker 73% av all oppvarming i sommermånedene. På vinteren er 41% av varmebehovet dekket av toppvarme, noe som tilsvarer 78% av all energi levert fra toppvarme.

Det er også laget grafer som viser en enkelt dag i hver årstid, vist i Vedlegg R. I disse grafene kommer det i tillegg til dekningsgrader frem at mesteparten av energiproduksjonen skjer i timer hvor behovet for varmt tappevann er høyt, jamfør Figur 8 i kapittel 3.1.4.

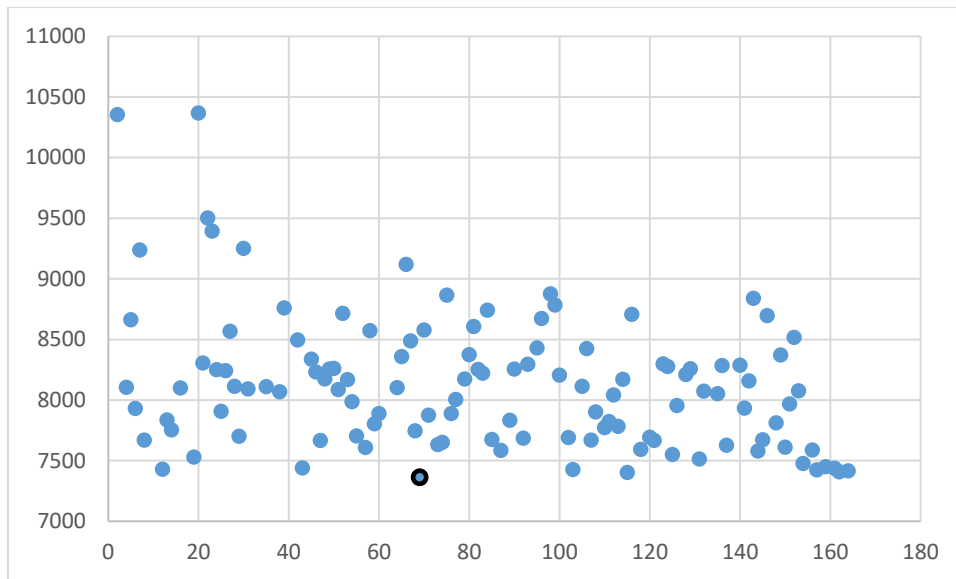
4.3 Resultater fra optimalisering

Figur 29 under viser resultatene av optimaliseringen i Oslo med betingelse at 10% av all oppvarming skal komme fra direkte el. Hver prikk i figuren representerer en gjennomført simulering utført av GenOpt.



Figur 29: Resultater fra optimalisering mht energi. 90% dekningsgrad fra SAHP i Oslo

Fra figuren kan vi se at resultatene er delt opp i to nivåer. Det øverste nivået er resultater hvor betingelsen om 90% dekningsgrad ikke er oppfylt. Figur 30 under viser kun det nederste nivået, altså resultater hvor betingelsen om at SAHP ikke skal dekke mer enn 90%, er oppfylt. I denne figuren representerer output fra simuleringene total levert energi til boligen i kWh.



Figur 30: Resultater fra optimalisering mht energi. 90% dekningsgrad fra SAHP i Oslo, hvor betingelse er oppfylt

Ut fra figuren ser man at verdiene på vei til å konvergere i de siste simuleringene. Med fordel kunne flere generasjoner av simuleringer bli kjørt, slik at flere resultater etter konvertering kunne blitt tatt ut. Verdien markert med sort sirkel gir lavest kjøpt energi ut fra betingelsene som er gitt. Det var ventet at GenOpt fant denne verdien senere i optimaliseringsprosessen. De siste simuleringene har derimot en tilnærmet lik output verdi.

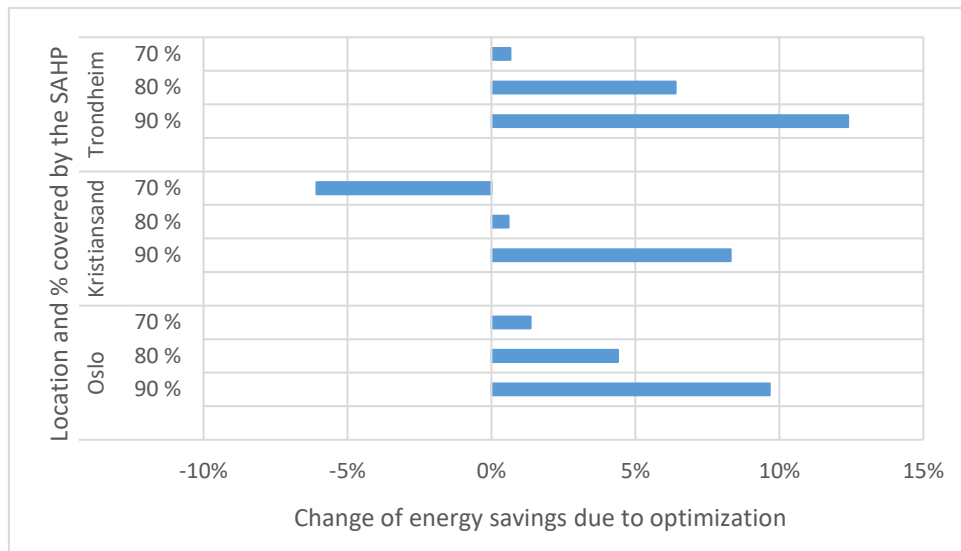
Den optimale sammensetningen av parametere for å få lavest energibruk med gitte betingelser er for alle optimaliseringer vist i Vedlegg S. Tabell 12 viser dette resultatet for 90% dekningsgrad i Oslo.

Tabell 12: Optimale parameterverdier for Oslo med 90% dekningsgrad fra SAHP funnet av GenOpt

| Parameter | Verdi området | Optimal verdi |
|---------------------------------|---------------|---------------|
| 70, 80, 90 % | N.A | 90% |
| Dekningsgrad SAHP | | |
| Lengde solfanger [m] | 1-5 | 6,5 |
| R tank [m] | 0.1-0.6 | 0,15 |
| Soltank volum [m ³] | 0,7-1,3 | 0,7 |
| Nominell massestrøm | | |
| Over solfanger [kg/s] | 0.5 - 2 | 0,68 – 1,8 * |
| Mellom tankene [kg/s] | 0.5 - 2 | 1,8 |
| Orientation [°] | -15 - 15 | -3 |
| Slope [°] | 30 - 45 | 34,5 |
| Min temp VP [°C] | -20 - 0 | -10 |

*I denne optimaliseringen er nominell massestrøm undersøkt i hver enkelt pumpe. Nominell massestrøm mellom solfanger og varmeveksler er funnet til 0,68, og 1,8 mellom varmeveksler og soltank.

Figur 31 under viser hvordan optimaliseringen påvirket energibehovet til oppvarming av boligen. Dette er vist som differansen mellom spart energi til oppvarming ved bruk av SAHP sammenlignet med utelukkende EL før og etter optimalisering.



Figur 31: Endret årlig energibesparing med bruk av SAHP som følge av optimalisering

Resultatene viser at optimalisering for Kristiansand generelt gir lavere utbytte av optimaliseringen sammenlignet med Oslo og Trondheim. Dette er kommet antageligvis av at dekningsgraden for SAHP før optimalisering var høyere for Kristiansand enn i Oslo og Trondheim, jf. Kapittel 4.2.4. Som figuren viser er det i alle tilfeller en økt energibesparelse etter optimalisering, med unntak av 70% dekningsgrad i Kristiansand. Dette resultatet skiller seg ut, og kan ikke alene forklares av en høyere dekningsgrad før optimalisering. Avviket kan forklares ved at optimaliseringen gir få resultater som tilfredsstillende betingelsen om 70% dekningsgrad. Dette kan føre til at optimaliseringen fungerer dårlig. Vedlegg T viser resultatet fra optimalisering med 70% dekningsgrad i Kristiansand.

Tabell 13 viser total spart energi før og etter optimalisering i kWh og i prosent, sammenlignet med oppvarming med utelukkende elektrisitet. Vedlegg U viser total levert energi til boligen ved de ulike betingelsene.

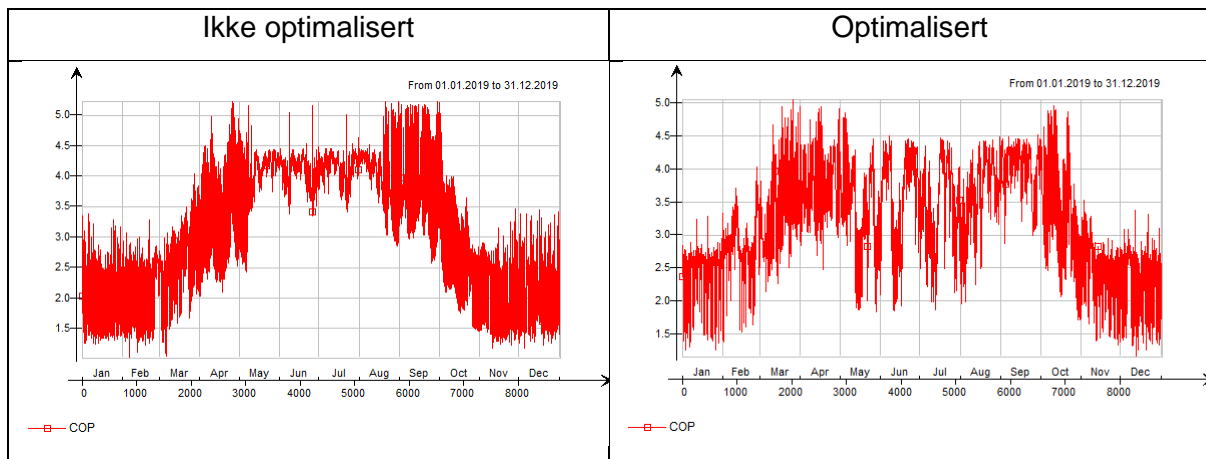
Tabell 13: Årlig spart energi etter optimalisering med ulike betingelser angående dekningsgrad av SAHP

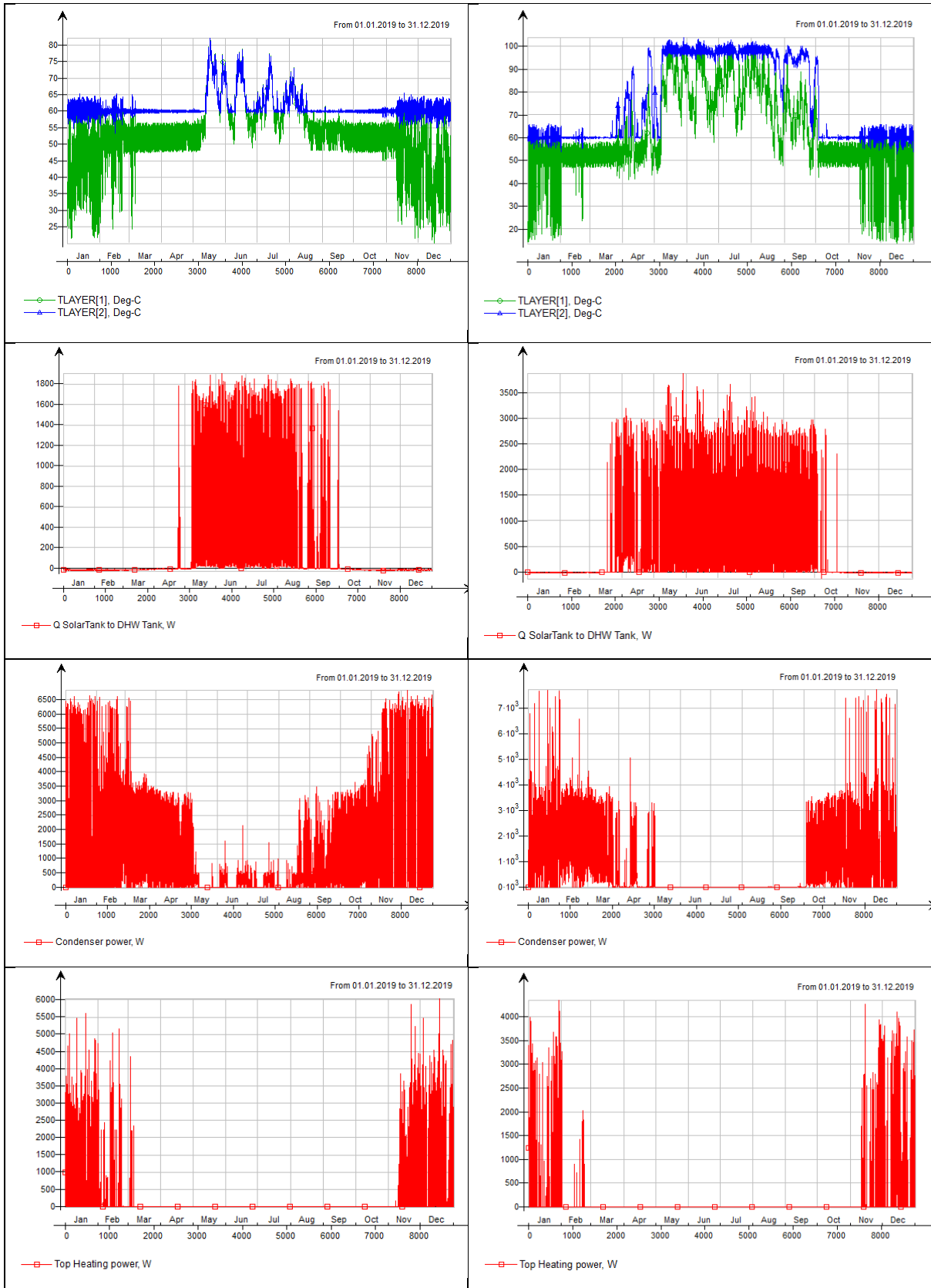
| Betingelse | Årlig spart energi [kWh] (%) | | |
|---------------------------|------------------------------|--------------|-------------|
| | Oslo | Kristiansand | Trondheim |
| Før optimalisering | 4626 (56,3) | 4496 (58,0) | 4368 (53,1) |
| 90% Dekningsgrad fra SAHP | 5467 (66,5) | 5141 (66,3) | 5385 (65,5) |
| 80% Dekningsgrad fra SAHP | 4987 (60,7) | 4542 (58,5) | 4893 (59,5) |
| 70% Dekningsgrad fra SAHP | 4738 (57,6) | 4024 (51,9) | 4421 (53,8) |

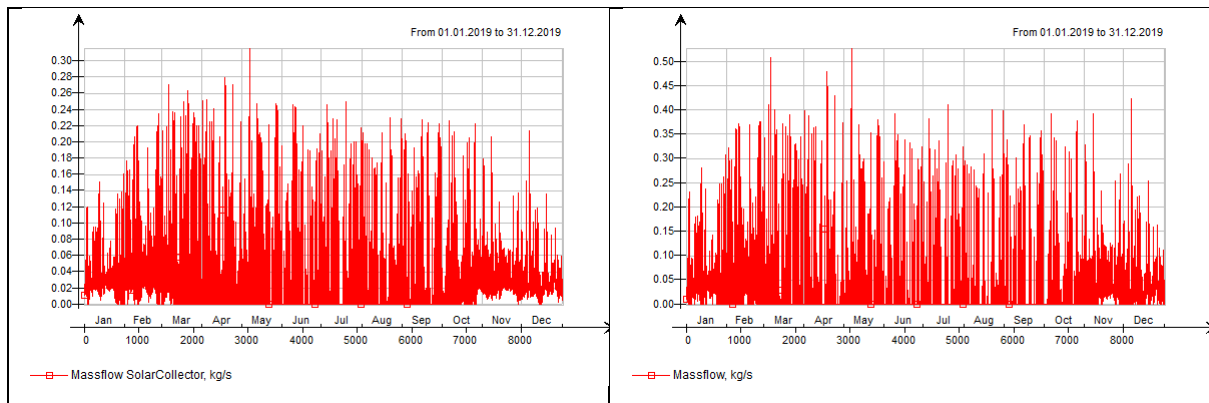
En interessant sammenligning er mellom optimalisering av Oslo og Trondheim for 80% dekning av SAHP, siden base case har omtrent lik dekningsgrad. Optimaliseringen viste at endring av parametere gir en besparelse på over 5%, uten at dekningsgraden fra SAHP er betydelig økt.

Tabell 14 viser ved hjelp av en rekke utklipp fra IDA ICE hvordan optimaliseringen har påvirket COP, produsert varme, temperaturer i varmtvannstank og massestrøm gjennom solfanger med betingelse om 90% dekningsgrad i Oslo. Det gjøres oppmerksom på at bildene kan ha ulik skalering i y-akse.

Tabell 14: Sammenligninger mellom COP, produsert varme, temperaturer i varmtvannstank og massestrøm gjennom solfanger før og etter optimalisering ved 90% dekningsgrad i Oslo





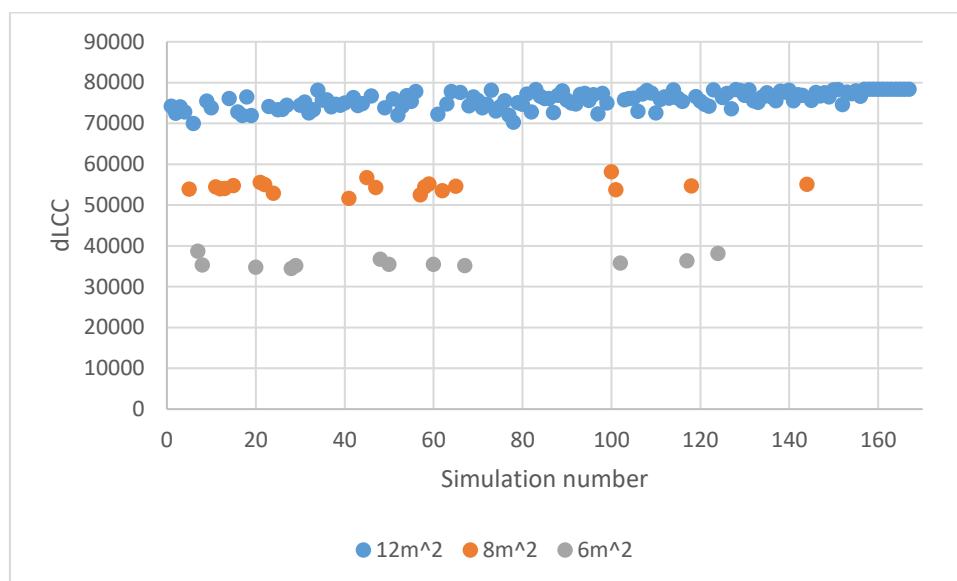


Etter optimalisering er levert varme fra sol økt betraktelig, mens levert varme fra topplast og varmepumpe er redusert. Temperaturer i tanken etter optimalisering overstiger $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ved flere tidspunkt på sommeren. Tap i systemet, inkludert dumping av overskuddsvarme er funnet til 300 kWh ved det optimale systemet, mot 190 kWh før optimalisering. Det kan derfor hevdes at solfangeren er overdimensjonert. Optimalisering med hensyn på maks dekningsgrad av SAHP er lite hensiktsmessig rent praktisk, da areal på solfanger vil bli stort, noe som fører til overproduksjon av varme og høye investeringskostnader. Optimaliseringen viser derimot at det er mulig å få en høy energidekningsgrad ved bruk av SAHP. Dersom det ikke hadde vært satt inn betingelse om dekningsgrad, kunne denne ha oversteget 90% . Under optimalisering for lønnsomhet gjort i kapittel 0 er solfangerareal satt til $6, 8$ og 12 m^2 . Denne optimaliseringen kan være mer relevant ved en praktisk tilnærming.

Sammenligninger mellom COP må sees i sammenheng med levert varme fra kondensator. Hvis varmepumpen ikke leverer noen varme i anlegget, vil ikke COP i den aktuelle perioden ha noen betydning for energibruk. Årsgjennomsnittlig COP, gitt av varme Q levert fra kondensator dividert på arbeid W i kompressor, og er funnet til 3 både før og etter optimalisering.

4.4 Lønnsomhet

Figur 32 viser resultatet av optimaliseringen med hensyn til lønnsomhet. Som nevnt i kapittel 3.5 er optimaliseringen kun gjennomført i Oslo.



Figur 32: Optimaliseringsresultater lønnsomhet

Resultatene viser at det største solfangerarealet er mest lønnsomt, med en maksimal dLCC på 78.362 NOK. Fra den minst optimale til den minst optimale sammensetningen av parametere som GenOpt har gjennomført med et areal på 12 m² solfanger, skiller det ca. 8.300 kroner. Den optimale sammensetningen av parametere er vist i Tabell 15 under.

Tabell 15: Optimale verdier på parametere i ESBO for optimalisering med hensyn på lønnsomhet

| Parameter | Range | Optimal verdi | Kommentar |
|--|------------|---------------|---|
| Lengde solfanger | 2; 2,67; 4 | 4 | Gir et samlet solfangerareal på 12 m ² |
| Orientering | 345 – 375 | 368,6 | 8,6 grader mot vest fra sør |
| Vinkel til plantet | 30 – 50 | 50 | grader |
| Nominell massestrøm i solfangerkretsen | 0,5 – 2 | 1,5 | [kg/s] |
| Nominell massestrøm mellom soltank og varmtvannstank | 0,5 – 2 | 0,5 | [kg/s] |
| Volum soltank | 0,7 – 1,3 | 1,3 | [m ³] |
| Radius varmtvannstank | 0,2 – 0,4 | 0,2 | [m] |

Den optimale vinkelen mot planet funnet til å være 50 grader, som strider imot litteratur og kjent kunnskap angående optimal vinkel av en solfanger [7]. Parameteren for vinkel ble hentet fra solfanger i ESBO anlegget. Etter dette resultatet ble det oppdaget at vinkelen på selve solfangeren i ESBO anlegget, ikke påvirker solinnstråling som treffer solfangeren. Dette blir utelukkende bestemt ut fra et objekt i anlegget jf. kapittel 3.2.1. Derfor har ikke optimaliseringen ikke tatt utgangspunkt i solinnstråling som treffer solfangeren i ulike vinkler, men bare solfangerens fysiske vinkel hvor solinnstrålingen er den samme. Siden det ikke er tid til å gjøre ny optimalisering, er det antatt at vinkelen på solfanger ikke er optimalisert, men satt til en konstant verdi på 35 grader. For optimaliseringer med hensyn på energi er det brukt riktig variabel.

Med antagelsen om at optimal sammensetning av parametere er lik for Oslo, Kristiansand og Trondheim, blir besparelsen (dLCC) og total energi levert til bygget er for samtlige områder som vist i Tabell 16.

Tabell 16: Tilbakebetalingstid og dLCC for Oslo, Kristiansand og Trondheim

| | dLCC | Tilbakebetalingstid |
|--------------|------------|---------------------|
| Oslo | 78.362 NOK | Ca. 20 år |
| Kristiansand | 74.928 NOK | Ca. 20 år |
| Trondheim | 70.625 NOK | Ca. 21 år |

Resultatene viser at anlegget er mest lønnsomt i Oslo. Dette var forventet, siden lønnsomheten er tett knyttet opp mot energibruk til boligen. Gjennom simuleringer før optimalisering jf. Kapittel 4.2.3 kommer det ferm at det er høyest energibesparing i Oslo. Det er derimot ikke gjort optimaliseringer for Kristiansand og Trondheim med hensyn på lønnsomhet, noe som kan ha innvirkning på resultatet.

Tabell 17 viser dLCC med en antatt årlig økning i energipris på 1%.

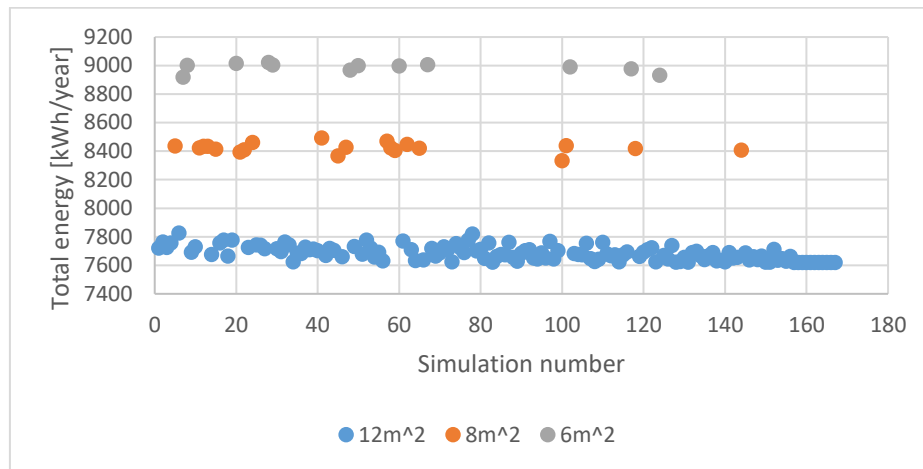
Tabell 17: Tilbakebetalingstid og dLCC for Oslo, Kristiansand og Trondheim med redusert årlig økning av energipris

| | dLCC | Tilbakebetalingstid |
|--------------|-----------|---------------------|
| Oslo | -13.539,4 | < 30 år |
| Kristiansand | -15.568,6 | < 30 år |
| Trondheim | -17.985,3 | < 30 år |

Resultatene viser en negativ dLCC vil SAHP være ulønnsomt for alle områder dersom årlig økning i fremtidige strømpriser viser seg å være 1 og ikke 5%

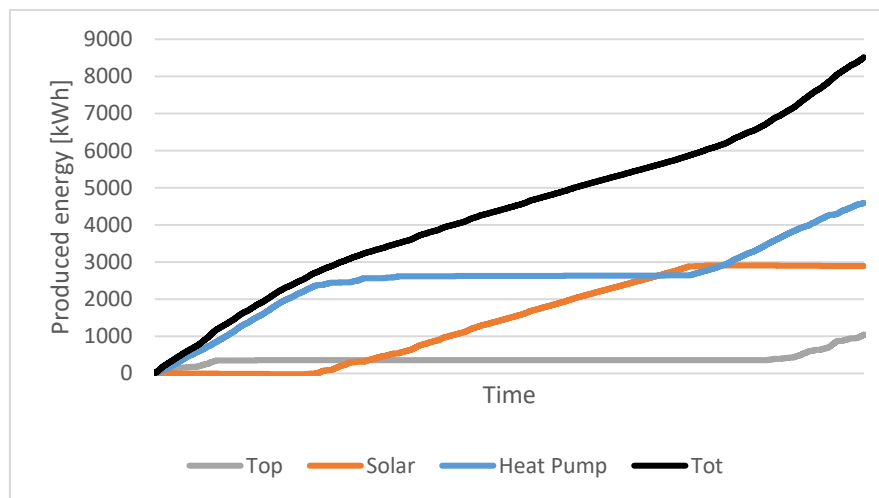
Vedlegg V viser hvordan optimaliseringen har påvirket COP, produsert varme, temperaturer i varmtvannstank og massestrøm. Det kommer her frem at temperaturen i varmtvannstanken aldri overstiger 95 °C.

Det er en klar korrelasjon mellom total levert energi til bygget og dLCC. Dette er å forvente, siden mindre kjøpt energi reduserer energiutgiftene. Figur 33 viser total energi levert til boligen for optimaliseringen.



Figur 33: Resultater fra optimalisering med hensyn på økonomi, hvor total levert energi er vist

Den optimale sammensetningen av parametere gir levert energi fra de ulike energikildene som vist i Figur 34. Vedlegg W viser dekningsgrader i prosent med optimal sammensetning av parametere.



Figur 34: Produsert energi fra ulike energikilder, samt total produsert energi til oppvarming. Verdier brukt etter optimalisering mht. lønnsomhet

Resultatene viser at den totale dekningsgraden av SAHP er på 84%, hvor direkte sol dekker 22,8% av det totale varmebehovet til boligen.

Med bruk av 12 m² solfanger, og optimale parameterverdier er kjøpt energi til oppvarming funnet til 3009 kWh i året. Dette er en reduksjon på 5213 kWh sammenlignet med oppvarming basert utelukkende på elektrisitet, noe som tilsvarer en energibesparelse på 63,4 %.

5 Konklusjon

I denne masteroppgaven er det gjort undersøkelser på solassistert varmepumpe i norske passivhus eneboliger. Undersøkelsene er gjennomført med simuleringer gjort i IDA ICE, hvor det er modellert en bolig på 170 m² som tilfredsstillende passivhuskrav. Boligen er undersøkt med klimadata for Oslo, Kristiansand og Trondheim. Det er også gjennomført optimaliseringer med bruk av GenOpt, samt lønnsomhetsbetraktninger ved bruk av LCC.

Resultatene viser at solassistert varmepumpe kan dekke en stor andel av oppvarmingsbehovet i en passivhus enebolig i Norge. Simuleringer viste at plan solfanger er bedre egnet enn vakuumsolfanger ved bruk av solassistert varmepumpe. Med valgte initialverdier for massestrømer, areal osv. vil bruk av SAHP gi en energibesparing i Oslo, Kristiansand og Trondheim på henholdsvis 56; 58 og 53 %. Sammenligning med et i tradisjonelt solfangeranlegg, produserer solfangeren mer enn dobbelt så mye varme i et anlegg med SAHP.

Ved bruk av 9 m² plan solfanger i et SAHP-anlegg i Oslo dekker direkte solenergi 13,5% av det totale varmebehovet, mens varmepumpe og topplast henholdsvis dekker 65,7 og 20,8%.

Optimalisering av systemet økte energibesparelsen med opptil, 11,8 % avhengig av betingelser for dekningsgrad og plassering av boligen. Å sette betingelse for maks dekningsgrad av SAHP viste seg lite hensiktsmessig ved en praktisk tilnærming, da solfanger arealet ble stort, og temperaturer i systemet ble høyere enn ønsket. Optimalisering med fast areal på solfanger er gjort for de økonomiske analysene. Her ble også energibruk er undersøkt, hvor optimaliseringen viste at spart energi blir økt fra 56 til 63% av det totale oppvarmingsbehovet dersom arealet på solfangeren blir økt fra 9 til 12 m². Simuleringer med optimale parametere og 12 m² solfangerareal gir en total dekningsgrad for solassistert varmepumpe på 84%. De resterende 16 % blir dekket av elkjel. Denne simuleringen viser at ca. 3000 kWh elektrisitet blir levert til boligen for oppvarming årlig. Dette er en reduksjon på ca. 5200 kWh sammenlignet med energibruk til oppvarming utelukkende basert på elektrisitet.

Med forutsetningene gitt i denne oppgaven viser de økonomiske undersøkelsene at solassistert varmepumpe har en tilbakebetalingstid på 20 år i Oslo og Kristiansand, og 21 år i Trondheim. Med en antatt levetid på 30 år vil dette gi et overskudd på omtrent 78.000; 75.000 og 71.000 norske kroner, diskontert til dagens verdi for henholdsvis Oslo, Kristiansand og Trondheim. Fremtidige energipriser er avgjørende for at systemet er lønnsomt eller ikke. Reduseres antatt årlig økning i energipris fra 5 til 1 % vil systemet være ulønnsomt.

Den generelle konklusjonen er at solassistert varmepumpe under de forhold som er undersøkt, ser ut til å være en godt egnet metode for oppvarming av passivhus eneboliger i Norge. Det tas forbehold om usikkerhet, da det er gjort antagelser og forenklinger gjennom undersøkelsene. For å kunne gi et mer sikkert resultat bør det gjøres videre undersøkelser, blant annet gjennom målinger av et bygd anlegg.

6 Videre arbeid

Denne masteroppgaven har hatt ambisjoner om å dekke flere felt innenfor oppgavens overordnede tema. På grunn av begrenset tid er det gjort en del antagelser og forenklinger. Det vil her bli listet opp flere forhold som burde bli undersøkt nærmere, sammen med forslag til videre undersøkelser av solassistert varmepumpe i Norge.

For oppsett av ESBO anlegget kunne det med fordel ha blitt brukt en lagdelt soltank. Det viste seg vanskelig for forfatter og få til dette, men med rett kompetanse skal dette være mulig. Oppsettet av ESBO anlegget er utført av forfatter. Det er ikke sikkert at dette oppsettet er satt opp på den beste mulige måten. En gjennomgang av varmeanlegget brukt i ESBO av en person med høy kompetanse i programmet kunne vist seg gunstig.

Det er antatt at solfangeren har konstant virkningsgrad gjennom hele levetiden. På grunn av slitasje, vil virkningsgraden til solfangeren sannsynligvis bli noe redusert over levetiden, og bør vurderes ved videre undersøkelser.

Klimafilene fra IWEC 2 bør bli undersøkt nærmere. Resultatene tyder på at solinnstråling i Kristiansand er lavere enn i Oslo, noe som strider mot andre undersøkelser.

Ved lønnsomhetsberegninger er levetiden til anlegget satt til 30 år. For å få et mer nøyaktig bilde av lønnsomhet burde levetiden til alle komponenter i anlegget, og pris for eventuelle utskiftninger bli undersøkt.

Sammenligninger mellom ulike prinsipper for oppvarming er begrenset til SAHP, direkte EL og et tradisjonelt solfangeranlegg. Ved bruk av tradisjonell solvarme er det brukt ulike forutsetninger enn ved SAHP, hvor systemet med tradisjonell solvarme har mindre akkumuleringsmuligheter. Ved bruk av like forutsetninger angående akkumulering, kan det vise seg at solvarme alene kan stå for en noe større andel oppvarming. For lønnsomhetsberegninger er det kun gjort sammenligninger mellom SAHP og oppvarming med direkte EL. Det hadde vært spennende å sammenligne SAHP anlegg med andre prinsipper for oppvarming, som f.eks luft / luft varmepumpe eller varmeproduksjon med biomasse.

Et alternativ til SAHP er GS SAHP (Ground source solar assisted heat pump), hvor det i tillegg til en solfanger blir brukt energibrønn / jordvarme. Dette er et system som er brukt i flere norske boliger i dag. Sammenligner angående energidekningsgrad og kostnad mellom et SAHP anlegg med og uten energibrønn hadde vært veldig interessant.

Investeringskostnader er hentet fra en enkelt leverandør. Mer grundig undersøkelse av investeringskostnader er å foretrekke, hvor en god strategi kunne vært å lage en utstyrliste over alle komponenter som må bli kjøpt inn til varmeanlegget. En liste over alle valgte komponenter muliggjør også oppsett av et mer realistisk anlegg i ESBO, hvor parametere blir hentet fra datablad til hver komponent.

Med forutsetningene satt i denne oppgaven viser resultatene at solassistert varmepumpe vil være en mer gunstig løsning for oppvarming sammenlignet med varme fra direkte elektrisitet, både med tanke på energibruk og lønnsomhet. Dersom videre undersøkelser kommer frem til det samme resultatet kunne det videre blitt laget et pilotprosjekt hvor et solassistert varmepumpeanlegg tas i bruk i en enebolig i Norge. Dette hadde åpnet for en rekke undersøkelser av hvordan systemet fungerer i praksis, og videre sammenlignet med hvordan systemet fungerer gjennom simuleringer.

Referanser

- [1] Sintef Energiforskning AS, «Ny kunnskap om fordeling av strømforbruket,» [Internett]. Available: <https://www.sintef.no/globalassets/upload/energi/nyhetsbrev/ny-kunnskap-om-fordeling-av-stromforbruket.pdf>. [Funnet 19 Mai 2019].
- [2] Statistisk sentralbyrå, «Energibruk i husholdningene,» [Internett]. Available: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/statistikker/husenergi/hvert-3-aar>. [Funnet 5 Mai 2019].
- [3] Statistisk sentralbyrå, «Boforhold, registerbasert,» [Internett]. Available: <https://www.ssb.no/bygg-bolig-og-eiendom/statistikker/boforhold/aar>. [Funnet 2019 Mai 20].
- [4] NVE, «Nasjonal varedeklarasjon 2017,» [Internett]. Available: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten-for-energi-rme-marked-og-monopol/varedeklarasjon/nasjonal-varedeklarasjon-2017/>. [Funnet 20 Mai 2019].
- [5] Store norske leksikon, «Passivhus,» [Internett]. Available: <https://snl.no/passivhus>. [Funnet 14 April 2019].
- [6] Standard Norge, «NS3700, Kriterier for passivhus og lavenergibygninger Boligbygninger,» 5 Januar 2013. [Internett]. Available: <https://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=NS+3700&subscr=1>. [Funnet 2 Februar 2019].
- [7] D. Zijdemans, Vannbaserte oppvarmings- og kjølesystemer, Skarland Press AS, 2014.
- [8] Dept. of Energy Sciences, Faculty of Engineering, Lund University, «Analysis of a Flat-plate Solar Collector,» [Internett]. Available: http://www.ht.energy.lth.se/fileadmin/ht/Kurser/MVK160/Project_08/Fabio.pdf. [Funnet 20 Mai 2019].
- [9] I. Andresen, «Planlegging av solvarmeanlegg for lavenergiboliger og passivhus. En introduksjon,» 2008. [Internett]. Available: https://www.sintef.no/globalassets/upload/byggforsk/publikasjoner/sb_prosjektrapport_22.pdf. [Funnet 20 Mai 2019].
- [10] S. Y. H. G. Y. G. W. X. M. W. T. H. Z. Xinyu Zhanga, «Thermal performance of direct-flow coaxial evacuated-tube solar collectors with and without a heat shield,» [Internett].

- Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414003185>. [Funnet 20 Mai 2019].
- [11] B. Pedersen og H. Ormestad, «Store Norske Leksikon,» 20 Oktober 2017. [Internett]. Available: https://snl.no/Carnots_kretsprosess.
- [12] M. R. C. Carsen J. Banister, «Development and performance of a dual tank solar-assisted heat pump system,» *Applied Energy, Volume 149*, pp. 125-132, 2015.
- [13] EQUA, «IDA Indoor Climate and Energy,» EQUA, [Internett]. Available: <https://www.equa.se/en/ida-ice>. [Funnet 2 Mai 2019].
- [14] EQUA, «Climate Data Download Center,» [Internett]. Available: http://www.equaonline.com/ice4user/new_index.html. [Funnet 14 Mai 2019].
- [15] EQUA, «Validations & certifications,» EQUA, [Internett]. Available: Validations & certifications. [Funnet 2 Mai 2019].
- [16] Programbyggerne, «Programbyggerne,» Programbyggerne, [Internett]. Available: <http://www.programbyggerne.no/>. [Funnet 8 Mai 2019].
- [17] The Unviersety of Wisconsin Madison, «TRANSYS18,» [Internett]. Available: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/features.html>. [Funnet 6 Mai 2019].
- [18] J. Sousa, «Energy Simulation Software for Buildings:Review and Comparison,» [Internett]. Available: <http://ceur-ws.org/Vol-923/paper08.pdf>. [Funnet 6 Mai 2019].
- [19] EnergyPlus, «EnergyPlus,» [Internett]. Available: <https://energyplus.net/>. [Funnet 17 April 2019].
- [20] Statistisk Sentralbyrå, «Statesikkbanken Boliger,» [Internett]. Available: <https://www.ssb.no/statbank/table/06513>. [Funnet 15 Februar 2019].
- [21] Sintef Byggforsk, Meterologisk institutt, «Klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring,» Sintef, November 2018. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/Document/Index/204/>. [Funnet 24 Februar 2019].
- [22] Standard.no, «NS 3031: 2014,» [Internett]. Available: <https://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=ns+3031+2014>. [Funnet 16 Mars 2019].
- [23] Standard.no, «SN / TS 3031:2016,» [Internett]. Available: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=859500>. [Funnet 16 Mars 2019].

- [24] Sinteff Byggforsk, «Luftmengder i ventilasjonsanlegg. Krav og anbefalinger,» Sintef, Desember 2017. [Internett]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/2753/luftmengder_i_ventilasjonsanlegg_krav_og_anbefalinger. [Funnet 3 Mars 2019].
- [25] Austria Solar; Bundesverband Solarindustrie, Germany (BSi); Solar Industries Association (CanSIA); European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF); Holland Solar; Solar Heating and Cooling Programme of the International Energy Agency (IEA SHC); Solar E, «Recommendation1: Converting solar thermal collector area into installed capacity (m² to kWth),» [Internett]. Available: https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/documents/statistics/Technical_Note-New_Solar_Thermal_Statistics_Conversion.pdf. [Funnet 06 Mai 2019].
- [26] M. V. K. S. Ala Hasan, «Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation,» [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132307002442>. [Funnet 10 Mai 2019].
- [27] Det kongelige finansdepartement, «Rundskriv R 109,» 30 Mai 2014. [Internett]. Available: https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/fin/vedlegg/okstyring/rundskriv/faste/r_109_2014.pdf. [Funnet 29 April 2019].
- [28] Statistisk Sentralbyrå, «Statestikkbanken Elektrisitetspriser,» [Internett]. Available: <https://www.ssb.no/statbank/table/09387/tableViewLayout1/>. [Funnet 29 April 2019].
- [29] Free Energy, «Besparingskalkyle og Online tilbud,» [Internett]. Available: <http://www.free-energy.com/hurtigkalkyle>. [Funnet 24 april 2019].
- [30] Enova, «Enova,» [Internett]. Available: <https://tilskudd.enova.no>. [Funnet 21 Mai 2019].
- [31] Berkeley Lab, «GenOpt Generic Optimization Program,» Berkeley Lab, [Internett]. Available: <https://simulationresearch.lbl.gov/GO/index.html>. [Funnet 8 Mai 2019].
- [32] Enova, Multiconsult, «Rapport. Kostnadsstudie, Solkraft i Norge 2013,» [Internett]. Available: https://www.enova.no/upload_images/9EF9602A2B454C008F472DF2A98F6737.pdf. [Funnet 21 Mai 2019].
- [33] Statistisk sentralbyrå, «Boforhold, levekårsundersøkelsen,» 28 Novemer 2018. [Internett]. Available: <https://www.ssb.no/bygg-bolig-og-eiendom/statistikker/bo/hvert-3-aar>. [Funnet 15 Februar 2019].

- [34] N. B. M. P. I. S. Marko Jarić, «researchgate.net,» [Internett]. Available: https://www.researchgate.net/publication/274654601_A_review_of_energy_analysis_simulation_tools. [Funnet 6 Mai 2019].
- [35] J. Stene, «Varmepumper for oppvarming og kjøling av bygninger,» 2000. [Internett]. Available: <http://www.ivt.ntnu.no/ept/fag/tep4115/innhold/Laboppgaver/Varmepumpe%20Notat%20J%20Stene.pdf>. [Funnet 2 Mai 2019].
- [36] United States Environmental Protection Agency, «Solar Heating and Cooling Technologies,» [Internett]. Available: <https://www.epa.gov/rhc/solar-heating-and-cooling-technologies>. [Funnet 15 Mai 2019].
- [37] SINTEF Byggforsk; enova; Husbanken, «Planlegging av solvarmeanlegg for lavenergiboliger og passivhus. En introduksjon,» [Internett]. Available: https://www.enova.no/upload_images/37F87A7F10AC431F9C1B010997420E4A.pdf. [Funnet 15 Mai 2019].

Vedlegg A Passivhuskrav:

A.1 Energibruk til oppvarming

Tabell 3 – Passivhus boligbygning – krav til høyeste beregnede netto energibehov til oppvarming

| Årsmiddeltemperatur, θ_{ym} | Høyeste beregnede netto energibehov til oppvarming kWh/(m ² ·år) | |
|---------------------------------------|---|---|
| | Boligbygning der $A_{fl} < 250 \text{ m}^2$ | Boligbygning der $A_{fl} \geq 250 \text{ m}^2$ |
| $\geq 6,3 \text{ }^\circ\text{C}$ | $15 + 5,4 \times \frac{(250 - A_{fl})}{100}$ | 15 |
| $< 6,3 \text{ }^\circ\text{C}$ | $15 + 5,4 \times \frac{(250 - A_{fl})}{100} + \left(2,1 + 0,59 \times \frac{(250 - A_{fl})}{100}\right) \times (6,3 - \theta_{ym})$ | $15 + 2,1 \times (6,3 - \theta_{ym})$ |

Hvor; E_t : Totalt årlig netto energibehov, A_{fl} : Oppvarmet del av BRA, θ_{ym} : Årsmiddeltemperatur

A.2 Energiforsyning

4.4 Energiforsyning

For passivhus og lavenergibygning settes det et krav til at varmesystemet i vesentlig grad kan benytte andre energivarer enn elektrisitet og fossile brensler.

Beregnet mengde levert elektrisk og fossil energi skal være mindre enn totalt netto energibehov fratrukket 50 % av netto energibehov til varmtvann, som vist i ligning (3).

$$E_{del,el} + E_{del,oil} + E_{del,gas} < E_t - 0,5 \times Q_{W,nd} \quad (3)$$

der

$E_{del,el}$ er energi fra årlig levert elektrisitet, i kWh/år;

$E_{del,oil}$ er energi fra årlig levert fossil olje, i kWh/år;

$E_{del,gas}$ er energi fra årlig levert fossil gass, i kWh/år;

E_t er totalt årlig netto energibehov, i kWh/år;

$Q_{W,nd}$ er årlig netto energibehov for oppvarming av tappevann, i kWh/år.

$Q_{W,nd}$ settes lik standardverdien fra NS 3031.

MERKNAD 1 I NS 3031:2007+A1:2011 står standardiserte inndata i tillegg A.

MERKNAD 2 I tillegg til kravene satt her skal bygningen oppfylle krav til energiforsyning satt i byggt teknisk forskrift [4].

A.3 Høyete tillatte varmetapstall transmisjons- og infiltrasjonsvarmetap

4.1 Varmetapstall for transmisjons- og infiltrasjonsvarmetap

Transmisjons- og infiltrasjonsvarmetap skal beregnes etter NS 3031.

Varmetransportkoeffisienten for transmisjons- og infiltrasjonsvarmetap beregnes som:

$$H_{tr,inf} = H_D + H_U + H_g + H_{inf} \quad [W/K] \quad (1)$$

der

H_D er direkte transmisjonsvarmetap til det fri, i W/K;

H_U er transmisjonsvarmetap til uoppvarmede soner, i W/K;

H_g er varmetap mot grunnen, i W/K;

H_{inf} er infiltrasjonsvarmetap, i W/K.

Varmetapstallet for transmisjons- og infiltrasjonsvarmetap er gitt ved:

$$H_{tr,inf}^* = \frac{H_{tr,inf}}{A_{\text{fl}}} \quad [W/(m^2 \cdot K)] \quad (2)$$

der

A_{fl} er oppvarmet del av $BR A$, i m^2 ;

$H_{tr,inf}$ er varmetransportkoeffisienten for transmisjons- og infiltrasjonsvarmetap, i W/K.

Krav til høyeste varmetapstall for transmisjons- og infiltrasjonsvarmetap for passivhus og lavenergibygninger skal bestemmes etter tabell 2.

Tabell 2 – Høyeste varmetapstall for transmisjons- og infiltrasjonstap

| | | Varmetapstall for transmisjons- og infiltrasjonstap, $H_{tr,inf}^*$ W/(m ² ·K) | | |
|------------------|----------|--|--|--|
| | | Boligbygning der $A_{\text{fl}} < 100 \text{ m}^2$ | Boligbygning der $100 \text{ m}^2 \leq A_{\text{fl}} < 250 \text{ m}^2$ | Boligbygning der $A_{\text{fl}} \geq 250 \text{ m}^2$ |
| Passivhus | | 0,53 | 0,48 | 0,43 |
| Lavenergibygning | klasse 1 | 0,70 | 0,65 | 0,55 |
| | klasse 2 | 0,93 | 0,83 | 0,68 |

A.4 Maksimal energibruk til oppvarming ved Oslo, Kristiansand og Trondheim

| Beliggenhet og årsmiddeltemperatur [°C] | Maks energibruk til oppvarming [$\frac{kWh}{m^2 \cdot \text{år}}$] |
|---|--|
| Oslo (6,1) | 18,73 |
| Kristiansand (7,5) | 18,24 |
| Trondheim (5,8) | 19,47 |

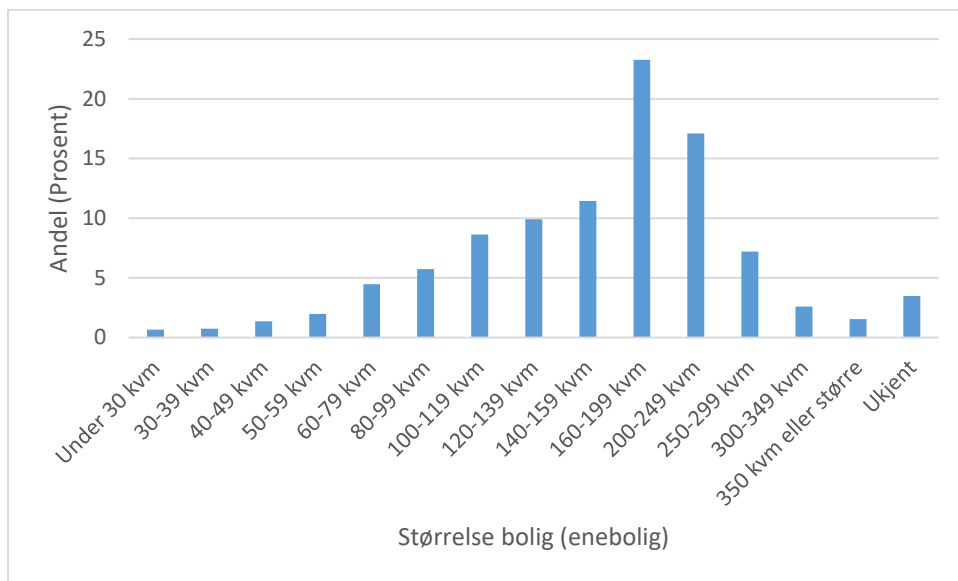
Vedlegg B Algoritme fra GenOpt

```
Vary{  
#FOR par IN [@ input contents]  
  $(:call parmrn-parm-to-genopt par)  
#END FOR  
}
```

```
OptimizationSettings  
{  
  MaxIte = 1500;  
  MaxEqualResults = 10;  
  WriteStepNumber = true;  
  UnitsOfExecution = $(:call simulation-nproc);  
}
```

```
Algorithm{  
  Main = GPSPSOCCHJ;  
  NeighborhoodTopology = vonNeumann;  
  NeighborhoodSize = 5;  
  NumberOfParticle = 10;  
  NumberOfGeneration = 10;  
  Seed = 50;  
  CognitiveAcceleration = 2.8;  
  SocialAcceleration = 1.3;  
  MaxVelocityGainContinuous = 0.5;  
  MaxVelocityDiscrete = 4;  
  ConstrictionGain = 0.5;  
  MeshSizeDivider = 2;  
  InitialMeshSizeExponent = 0;  
  MeshSizeExponentIncrement = 1;  
  NumberOfStepReduction = 4;  
}
```

Vedlegg C Areal eneboliger fra SSB



Vedlegg D Temperaturer fra brukt klimafil

D.1 Oslo

| | Dry-bulb temperature, Deg-C |
|---------------|-----------------------------|
| January | -2.7 |
| February | -0.4 |
| March | 0.6 |
| April | 4.6 |
| May | 12.8 |
| June | 16.0 |
| July | 17.5 |
| August | 17.0 |
| September | 10.7 |
| October | 6.9 |
| November | 0.6 |
| December | -2.6 |
| mean | 6.8 |
| mean*8760.0 h | 59496.2 |
| min | -2.7 |
| max | 17.5 |

D.2 Kristiansand

| | Dry-bulb temperature, Deg-C |
|---------------|-----------------------------|
| January | 0.0 |
| February | 1.4 |
| March | 1.9 |
| April | 5.7 |
| May | 11.2 |
| June | 13.9 |
| July | 17.1 |
| August | 16.3 |
| September | 12.8 |
| October | 7.3 |
| November | 3.5 |
| December | 0.3 |
| mean | 7.7 |
| mean*8760.0 h | 67169.8 |
| min | 0.0 |
| max | 17.1 |

D.3 Trondheim

| | Dry-bulb temperature, Deg-C |
|---------------|-----------------------------|
| January | -1.6 |
| February | -0.6 |
| March | 1.0 |
| April | 5.0 |
| May | 9.2 |
| June | 12.8 |
| July | 15.3 |
| August | 14.0 |
| September | 10.1 |
| October | 5.3 |
| November | 2.6 |
| December | 1.3 |
| mean | 6.3 |
| mean*8760.0 h | 54776.8 |
| min | -1.6 |
| max | 15.3 |

Vedlegg E Årsmiddeltemperatur fra byggdetaljer 451.021

| Kommune | | Temperatur (°C) | | | | Frostmengde (h°C) | | | | | H ₀ m |
|---------|--------------|-----------------|---------------|------------|------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------|
| | | θ_{1d} | θ_{3d} | θ_m | θ_a | F _N | F ₁₀ | F ₂₀ | F ₅₀ | F ₁₀₀ | |
| 03 Oslo | | | | | | | | | | | |
| 0301 | Oslo | -21,8 | -19,8 | 6,1 | 16,7 | 7 000 | 14 000 | 17 000 | 20 000 | 23 000 | 1,6 |
| 1001 | Kristiansand | -20,2 | -19,0 | 7,5 | 14,0 | 3 000 | 7 000 | 8 000 | 10 000 | 12 000 | 1,1 |
| 5001 | Trondheim | -23,1 | -22,0 | 5,8 | 15,2 | 6 000 | 12 000 | 15 000 | 18 000 | 20 000 | 1,5 |

Vedlegg F Driftstider for småhus fra SN/TS 3031

| Tidsperiode | | | Belysning | Person- belastning | Teknisk- utstyr | Varmt tappevann |
|----------------------------------|---|----|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| | | | [Wh/m ²] | [Wh/m ²] | [Wh/m ²] | [Wh/m ²] |
| 0 | - | 1 | 0,00 | 1,50 | 0,96 | 0,00 |
| 1 | - | 2 | 0,00 | 1,50 | 0,96 | 0,00 |
| 2 | - | 3 | 0,00 | 1,50 | 0,96 | 0,00 |
| 3 | - | 4 | 0,00 | 1,50 | 0,96 | 0,00 |
| 4 | - | 5 | 0,00 | 1,50 | 0,96 | 0,00 |
| 5 | - | 6 | 0,00 | 1,50 | 0,96 | 0,96 |
| 6 | - | 7 | 1,84 | 1,50 | 0,96 | 6,87 |
| 7 | - | 8 | 1,84 | 1,50 | 1,92 | 13,74 |
| 8 | - | 9 | 1,84 | 1,50 | 1,92 | 6,87 |
| 9 | - | 10 | 1,84 | 1,50 | 0,96 | 0,96 |
| 10 | - | 11 | 1,84 | 1,50 | 0,96 | 0,96 |
| 11 | - | 12 | 1,84 | 1,50 | 0,96 | 0,96 |
| 12 | - | 13 | 1,84 | 1,50 | 0,96 | 0,96 |
| 13 | - | 14 | 1,84 | 1,50 | 0,96 | 0,96 |
| 14 | - | 15 | 1,84 | 1,50 | 0,96 | 0,96 |
| 15 | - | 16 | 1,84 | 1,50 | 2,88 | 0,96 |
| 16 | - | 17 | 1,84 | 1,50 | 4,81 | 0,96 |
| 17 | - | 18 | 1,84 | 1,50 | 4,81 | 13,74 |
| 18 | - | 19 | 1,84 | 1,50 | 4,81 | 13,74 |
| 19 | - | 20 | 1,84 | 1,50 | 4,33 | 1,37 |
| 20 | - | 21 | 1,84 | 1,50 | 4,33 | 1,37 |
| 21 | - | 22 | 1,84 | 1,50 | 2,40 | 1,37 |
| 22 | - | 23 | 1,84 | 1,50 | 2,40 | 0,96 |
| 23 | - | 24 | 0,00 | 1,50 | 0,96 | 0,00 |
| Wh/(m² · døgn) | | | 31,28 | 36,00 | 48,05 | 68,67 |
| Driftstimer/døgn | | | 17 | 24 | 24 | 18 |

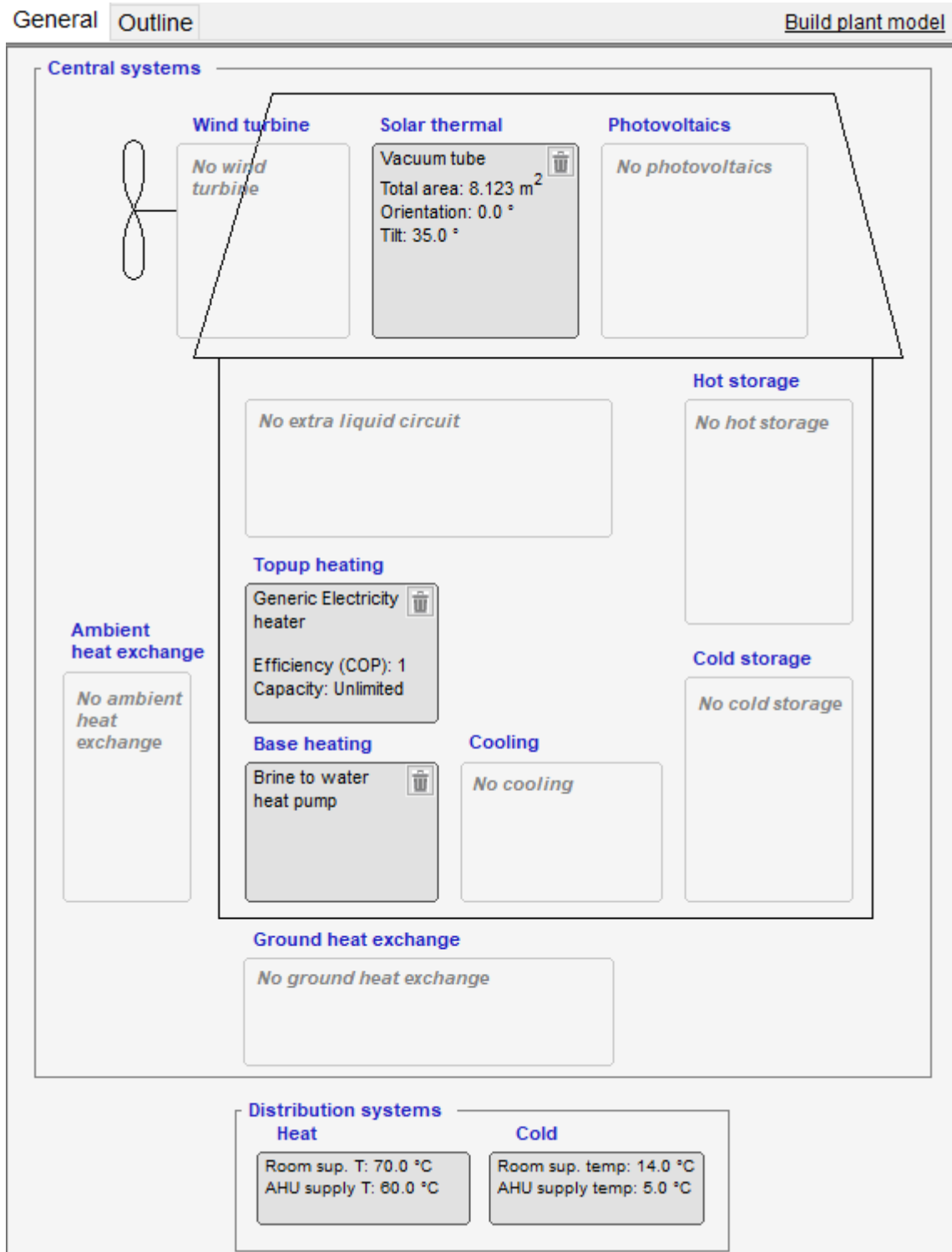
Grafen tar utgangspunkt i tabell A.2-A.5 i SN/TS 3031

Vedlegg G Helligdager

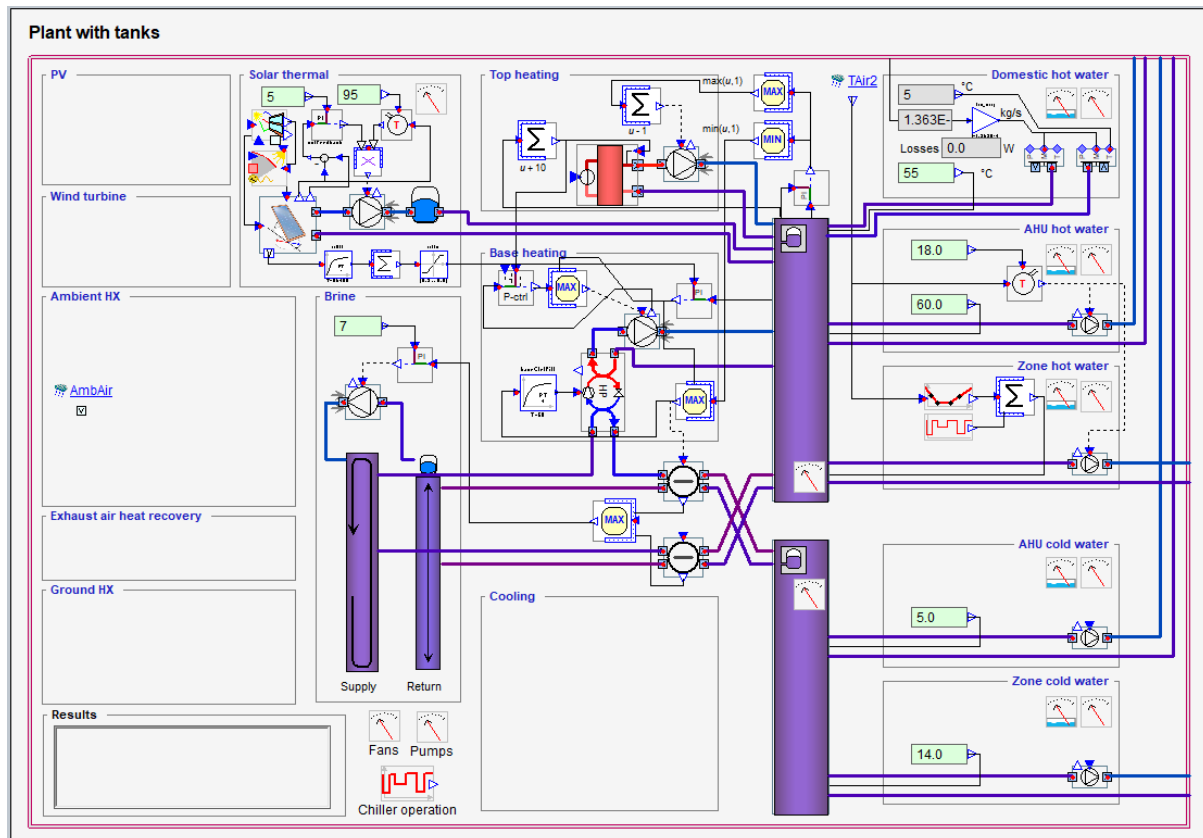
| Helligdager 2018 | Dato |
|-----------------------|------------|
| 1. nyttårsdag | 01.01.2019 |
| Palmesøndag | 25.03.2019 |
| Skjærtorsdag | 29.03.2019 |
| Langfredag | 30.03.2019 |
| 1. påskedag | 01.04.2019 |
| 2. påskedag | 02.04.2019 |
| Arbeidernes dag | 01.05.2019 |
| Kristi himmelfartsdag | 10.05.2019 |
| Nasjonaldag | 17.05.2019 |
| 1. pinsedag | 20.05.2019 |
| 2. pinsedag | 21.05.2019 |
| 1. juledag | 25.12.2019 |
| 2. juledag | 26.12.2019 |

Vedlegg H SAHP i ESBO

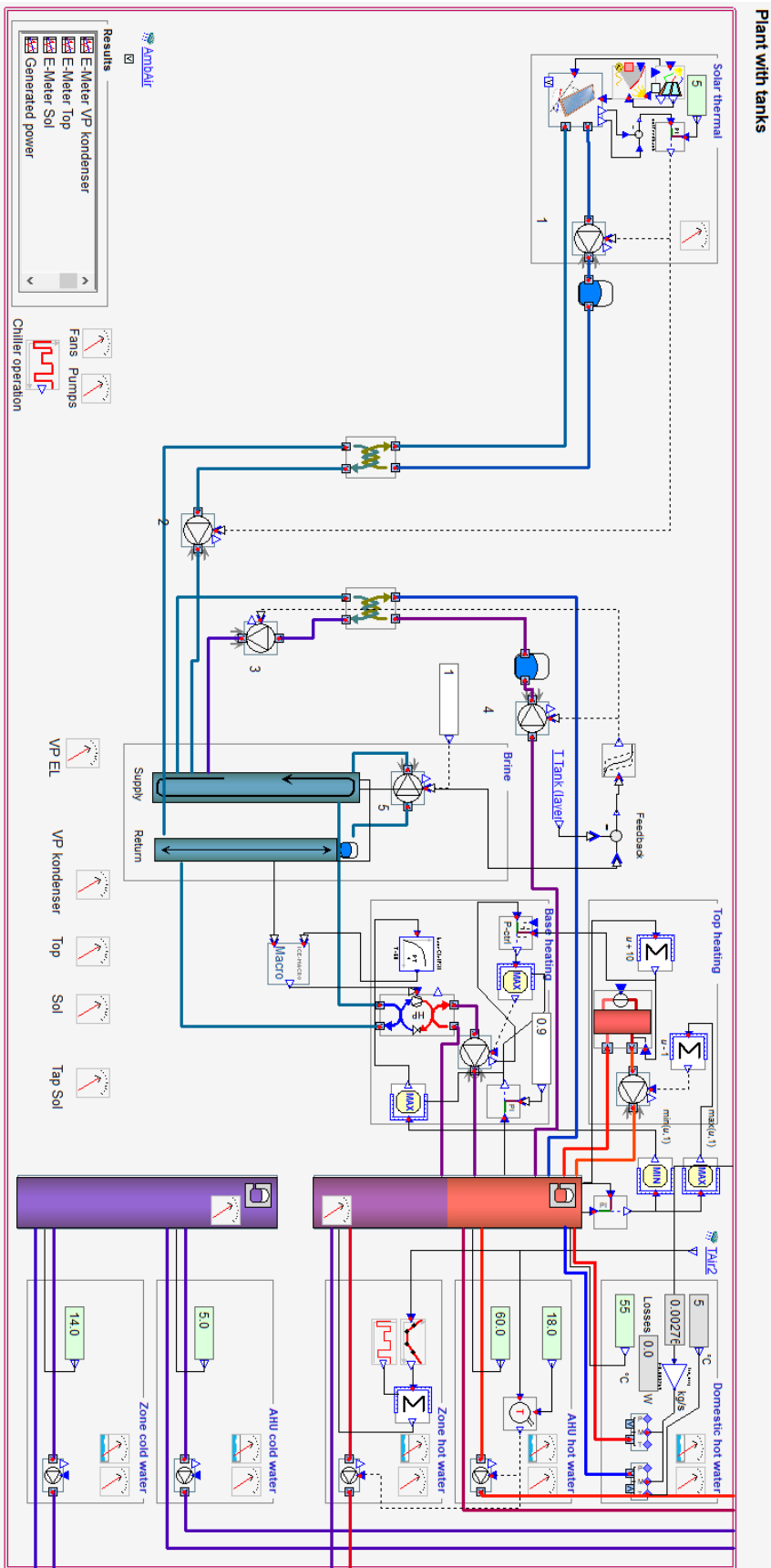
H.1 Utgangspunkt



H.2 Utgangspunkt etter «build plant model»

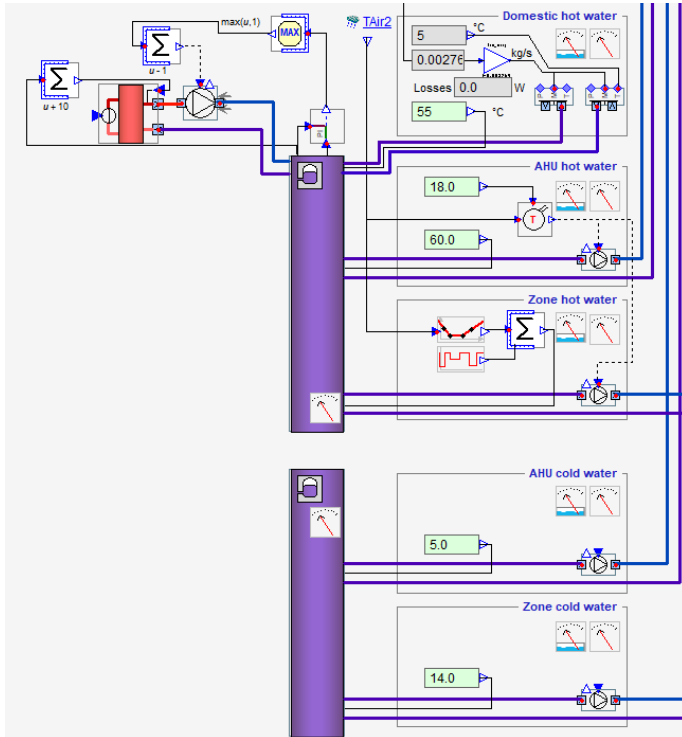


H.3 Modifisert

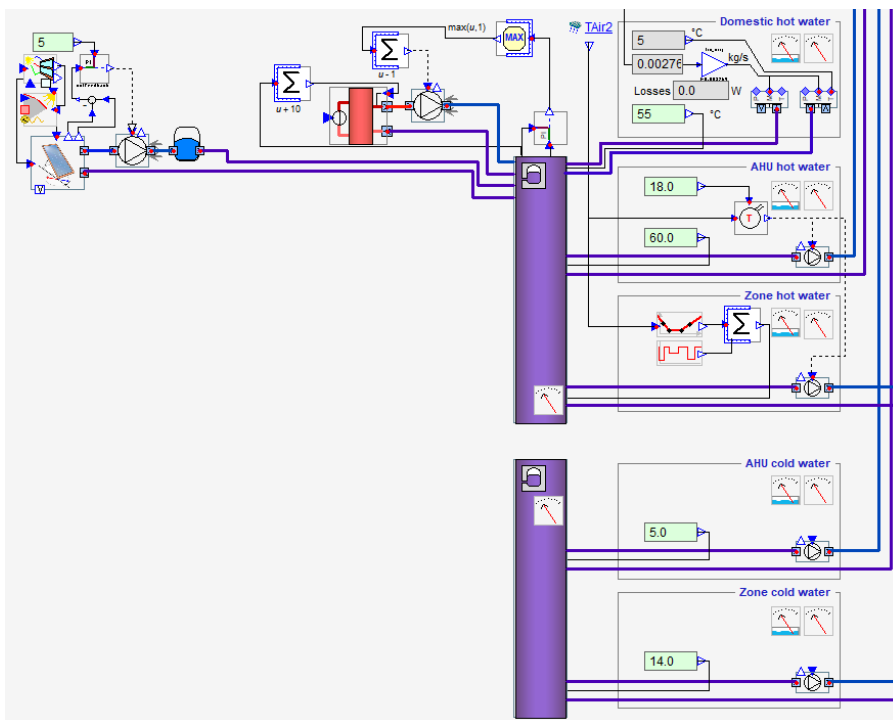


Vedlegg I Andre varmeanlegg i ESBO

I.1 Kun elektrisitet til oppvarming



I.2 Tradisjonell solfanger



Vedlegg J Energipriser fra SSB

| Kraft og nett i alt inkl. avgifter (øre/kWh) | | | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|--|------------|
| 2018K1 | 2018K2 | 2018K3 | 2018K4 | | AVG |
| 106,4 | 110,3 | 123,4 | 123,4 | | 115,875 |

Vedlegg K Prisindikasjon fra leverandør

K.1 Prisindikasjon 6 m²

Varmepumpe



Basert på de opplysninger du har oppgitt, anbefaler vi vår varmepumpe type FE04. Varmepumpen er inverterstyrt med høyeste energiklasse A+++ . Varmepumpen FE04 har et trinnløst arbeidsområde [2.0kW -5.8kW] og har 10 års fabrikkgaranti på kompressoren. Alle interne sirkulasjonspumper er av beste energiklasse. Kabinettet er designet slik at all teknisk utrustning inngår, høyde 220 cm, bredde og dybde 60x70 cm. I det lavere kabinettet (195 cm) inngår også all utrustning, men ekspansjonskar plasseres på utsiden.

89 724
gir 20 000
i Enovatilskudd

Styring og overvåking



HYSS-systemet har et webbasert kontrollsystem med et integrert måleutstyr for el, varme og varmtvann hvor du kan følge med på varmfaktor (COP og SCOP) og se at den lovede besparelsen innfris. Avtagbar iPad mini inngår i leveransen, men du kan i tillegg anvende din smartphone eller PC for å overvåke og styre ditt HYSS varmesystem. Automatisk oppdatering av siste programvare for optimal ytelse og nye funksjoner inngår også i dette tilbudet.

21 695
gir 10 000
i Enovatilskudd

Kabinett



200 liter lagringstank av rustfritt stål med innebygde varmespiraler for solfangere respektive varmepumpe, samt elpatron som back-up. Lagertanken har 10 års fabrikkgaranti og er montert inne i kabinettet.

11 840

Integrert komplett solstasjon med styring for solkretsen. I solstasjonen inngår blant annet sirkulasjonspumpe, energimålere og ventiler samt styringsprogram optimalisert for solvarme, basseng og komfortkjøling.

13 936

Fabrikkmontert påfyllingsstuss for brinevæske integrert i kabinettet, så du unngår installasjoner på veggen og sparer plass i rommet. Du får også med en pressostat (trykkvakt) som gir en alarm ved for lavt trykk i sol- og brinekretsen.

4 276

3stk ekspansjonskar inngår (sol/brine, varme og varmtvann). I det høye kabinettet (220 cm) er disse integrert og formontert lengst ned i kabinettet slik at du unngår installasjoner på veggen. For det lave kabinettet (195 cm) monteres ekspansjonskarene på vegg utenfor kabinettet, men de inngår alltid i din HYSS-leveranse.

7 785

DELSUM

Komplett pris for en HYSS-varmepumpe iht. beskrivelsen over eksklusive solfangere som beskrives i teksten nedenfor

149 256
gir 30 000
i Enovatilskudd

Solvarmesystem



Komplett solvarmesystem som omfatter 6 m² Solar Keymark godkjente solfangere, isolerte rustfrie flexrør til og fra solfangerne, tilslutningsdetaljer og givere. Prisen inkluderer komplett plateinnkledning av solfangerne slik at de kan felles ned i taket og integreres like pent som et takvindu. I kombinasjon med HYSS blir tilbakebetalingstiden for solfangerne ikke mer enn 5-8 år fordi solenergien anvendes både til oppvarming og til varmpumpeeffektivisering i tillegg også til varmtvann.

23 128
gir 10 000
+ 200/m²
i Enovatilskudd

TOTALSUM

Komplett pris for et HYSS-system, inklusive solfangere som for hver del elektrisitet gir deg 5.9 ganger tilbake i form av varme og varmtvann. Miljø- og klimabesparelsen blir din ekstra bonus.

172 384
Mulig Enovatilskudd*
40 600

* Kan med dagens støtte ordninger fra Enova gi opptil 40 600.-
Se fullstendig informasjon på <https://tilskudd.enova.no/>

Din pris:
131 784
Inkl. moms

K.2 Prisindikasjon 8 m²

Varmepumpe



Basert på de opplysninger du har oppgitt, anbefaler vi vår varmepumpe type FE04. Varmepumpen er inverterstyrt med høyeste energiklasse A+++ . Varmepumpen FE04 har et trinnløst arbeidsområde [2.0kW -5.8kW] og har 10 års fabrikkgaranti på kompressoren. Alle interne sirkulasjonspumper er av beste energiklasse. Kabinettet er designet slik at all teknisk utrustning inngår, høyde 220 cm, bredde og dybde 60x70 cm. I det lavere kabinettet (195 cm) inngår også all utrustning, men ekspansjonskar plasseres på utsiden.

89 724
gir 20 000
i Enovatilskudd

Styring og overvåking



HYSS-systemet har et webbasert kontrollsystem med et integrert måleutstyr for el, varme og varmtvann hvor du kan følge med på varmefaktor (COP og SCOP) og se at den lovede besparelsen innfris. Avtagbar iPad mini inngår i leveransen, men du kan i tillegg anvende din smartphone eller PC for å overvåke og styre ditt HYSS varesystem. Automatisk oppdatering av siste programvare for optimal ytelse og nye funksjoner inngår også i dette tilbudet.

21 695
gir 10 000
i Enovatilskudd

Kabinett



200 liter lagringstank av rustfritt stål med innebygde varmespiraler for solfangere respektive varmepumpe, samt elpatron som back-up. Lagertanken har 10 års fabrikkgaranti og er montert inne i kabinettet.

11 840

Integrert komplett solstasjon med styring for solkretsen. I solstasjonen inngår blant annet sirkulasjonspumpe, energimålere og ventiler samt styringsprogram optimalisert for solvarme, basseng og komfortkjøling.

13 936

Fabrikkmontert påfyllingsstuss for brinevæske integrert i kabinettet, så du unngår installasjoner på veggen og sparer plass i rommet. Du får også med en pressostat (trykkvakt) som gir en alarm ved for lavt trykk i sol- og brinekretsen.

4 276

3stk ekspansjonskar inngår (sol/brine, varme og varmtvann). I det høye kabinettet (220 cm) er disse integrert og formontert lengst ned i kabinettet slik at du unngår installasjoner på veggen. For det lave kabinettet (195 cm) monteres ekspansjonskarene på vegg utenfor kabinettet, men de inngår alltid i din HYSS-leveranse.

7 785

DELSUM

Komplett pris for en HYSS-varmepumpe iht. beskrivelsen over eksklusive solfangere som beskrives i teksten nedenfor

149 256
gir 30 000
i Enovatilskudd

Solvarmesystem



Komplett solvarmesystem som omfatter 8 m² Solar Keymark godkjente solfangere, isolerte rustfrie flexrør til og fra solfangerne, tilslutningsdetaljer og givere. Prisen inkluderer komplett plateinnkledning av solfangerne slik at de kan felles ned i taket og integreres like pent som et takvindu. I kombinasjon med HYSS blir tilbakebetalingstiden for solfangerne ikke mer enn 5-8 år fordi solenergien anvendes både til oppvarming og til varmepumpeeffektivisering i tillegg også til varmtvann.

27 828
gir 10 000
+ 200/m²
i Enovatilskudd

TOTALSUM

Komplett pris for et HYSS-system, inklusive solfangere som for hver del elektrisitet gir deg 6.0 ganger tilbake i form av varme og varmtvann. Miljø- og klimabesparelsen blir din ekstra bonus.

177 084
Mulig Enovatilskudd*
40 800

* Kan med dagens støtte ordninger fra Enova gi opptil 40 800.-
Se fullstendig informasjon på <https://tilskudd.enova.no/>

Din pris:
136 284
Inkl. moms

K.3 Prisindikasjon 12 m²

Varmepumpe



Basert på de opplysninger du har oppgitt, anbefaler vi vår varmepumpe type FE07. Varmepumpen er inverterstyrt med høyeste energiklasse A+++. Varmepumpen FE07 har et trinnløst arbeidsområde [3.6kW -10.8kW] og har 10 års fabrikkgaranti på kompressoren. Alle interne sirkulasjonspumper er av beste energiklasse. Kabinettet er designet slik at all teknisk utrustning inngår, høyde 220 cm, bredde og dybde 60x70 cm. I det lavere kabinettet (195 cm) inngår også all utrustning, men ekspansjonskar plasseres på utsiden.

96 518
gir 20 000
i Enovatilskudd

Styring og overvåking



HYSS-systemet har et webbasert kontrollsystem med et integrert måleutstyr for el, varme og varmtvann hvor du kan følge med på varmfaktor (COP og SCOP) og se at den lovede besparelsen innfris. Avtagbar iPad mini inngår i leveransen, men du kan i tillegg anvende din smartphone eller PC for å overvåke og styre ditt HYSS varesystem. Automatisk oppdatering av siste programvare for optimal ytelse og nye funksjoner inngår også i dette tilbudet.

21 695
gir 10 000
i Enovatilskudd

Kabinet



200 liter lagringstank av rustfritt stål med innebygde varmespiraler for solfangere respektive varmepumpe, samt elpatron som back-up. Lagertanken har 10 års fabrikkgaranti og er montert inne i kabinettet.

11 840

Integrert komplett solstasjon med styring for solkretsen. I solstasjonen inngår blant annet sirkulasjonspumpe, energimålere og ventiler samt styringsprogram optimalisert for solvarme, basseng og kornfortkjøling.

13 936

Fabrikkmontert påfyllingsstuss for brinevæske integrert i kabinettet, så du unngår installasjoner på veggen og sparer plass i rommet. Du får også med en pressostat (trykkvakt) som gir en alarm ved for lavt trykk i sol- og brinekretsen.

4 276

3stk ekspansjonskar inngår (sol/brine, varme og varmtvann). I det høye kabinettet (220 cm) er disse integrert og formontert lengst ned i kabinettet slik at du unngår installasjoner på veggen. For det lave kabinettet (195 cm) monteres ekspansjonskarene på vegg utenfor kabinettet, men de inngår alltid i din HYSS-leveranse.

7 785

DELSUM

Komplett pris for en HYSS-varmepumpe iht. beskrivelsen over eksklusive solfangere som beskrives i teksten nedenfor

156 050
gir 30 000
i Enovatilskudd

Solvarmesystem



Komplett solvarmesystem som omfatter 12 m² Solar Keymark godkjente solfangere, isolerte rustfrie flexrør til og fra solfangerne, tilslutningsdetaljer og givere. Prisen inkluderer komplett plateinnkledning av solfangerne slik at de kan felles ned i taket og integreres like pent som et takvindu. I kombinasjon med HYSS blir tilbakebetalingstiden for solfangerne ikke mer enn 5-8 år fordi solenergien anvendes både til oppvarming og til varmepumpeeffektivisering i tillegg også til varmtvann.

37 229
gir 10 000
+ 200/m²
i Enovatilskudd

TOTALSUM

Komplett pris for et HYSS-system, inklusive solfangere som for hver del elektrisitet gir deg 5.6 ganger tilbake i form av varme og varmtvann. Miljø- og klimabesparelsen blir din ekstra bonus.

193 279
Mulig Enovatilskudd*
41 200

* Kan med dagens støtte ordninger fra Enova gi opptil 41 200.-
Se fullstendig informasjon på <https://tilskudd.enova.no/>

Din pris:
152 079
Inkl. moms

K.4 Valgte investeringskostnader

| Areal | 6 m2 | 8 m2 | 12 m2 |
|-----------------|---------|---------|---------|
| Solfanger | 23.128 | 27.828 | 37.229 |
| Varmepumpe | 89.724 | 89.724 | 89.724 |
| Tank | 11.840 | 11.840 | 11.840 |
| Solstasjon | 13.939 | 13.939 | 13.939 |
| Påfyllingsstuss | 4.276 | 4.276 | 4.276 |
| Ekspansjonskar | 7.785 | 7.785 | 7.785 |
| Støtte | -31.200 | -31.600 | -32400 |
| Total | 119.492 | 123.792 | 132.393 |

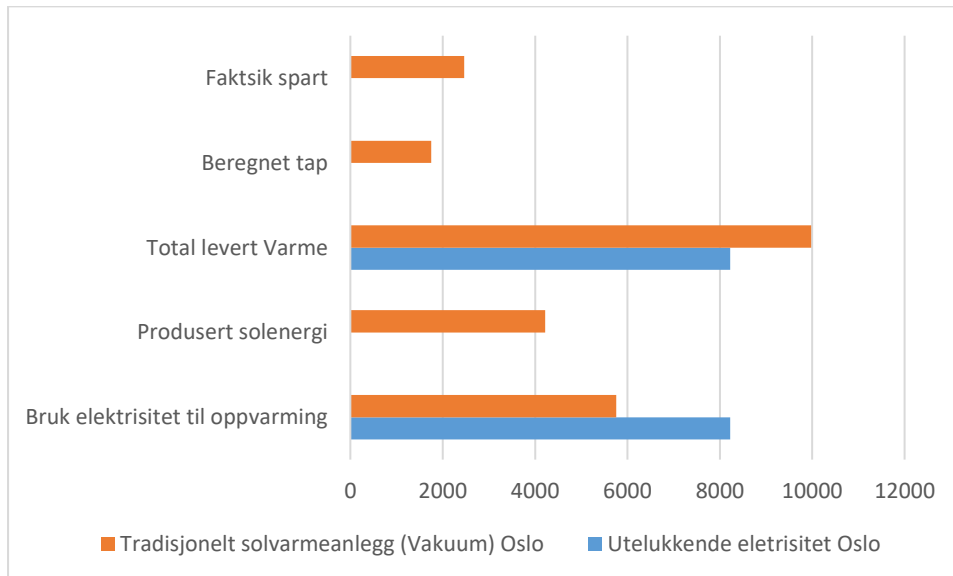
Vedlegg L Betingelse for dekningsgrad optimalisering

| Oslo | Maks energi fra Top Heating |
|--------------------------|-----------------------------|
| 90% Varme fra direkte EL | 821 |
| 80% Varme fra direkte EL | 1642 |
| 70% Varme fra direkte EL | 2463 |
| Kristiansand | |
| 90% Varme fra direkte EL | 774 |
| 80% Varme fra direkte EL | 1549 |
| 70% Varme fra direkte EL | 2323,5 |
| Trondheim | |
| 90% Varme fra direkte EL | 821 |
| 80% Varme fra direkte EL | 1642 |
| 70% Varme fra direkte EL | 2464 |

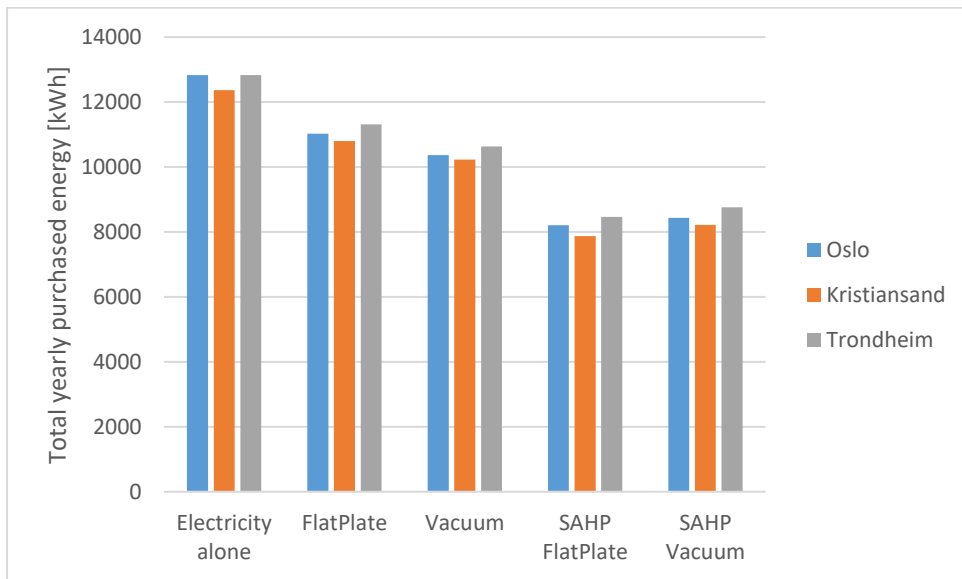
Vedlegg M Passivhuskrav satt opp mot simulert energibehov til oppvarming

| Beliggenhet og årsmiddeltemperatur [°C] | Maks energibruk til oppvarming [$\frac{kWh}{m^2 \cdot \text{år}}$] | Simulert energibruk til oppvarming [$\frac{kWh}{m^2 \cdot \text{år}}$] |
|---|--|--|
| Oslo (6,1) | 18,73 | 18,44 |
| Kristiansand (7,5) | 18,24 | 15,7 |
| Trondheim (5,8) | 19,47 | 18,44 |

Vedlegg N Vurdering av tap og faktisk spart energi til oppvarming

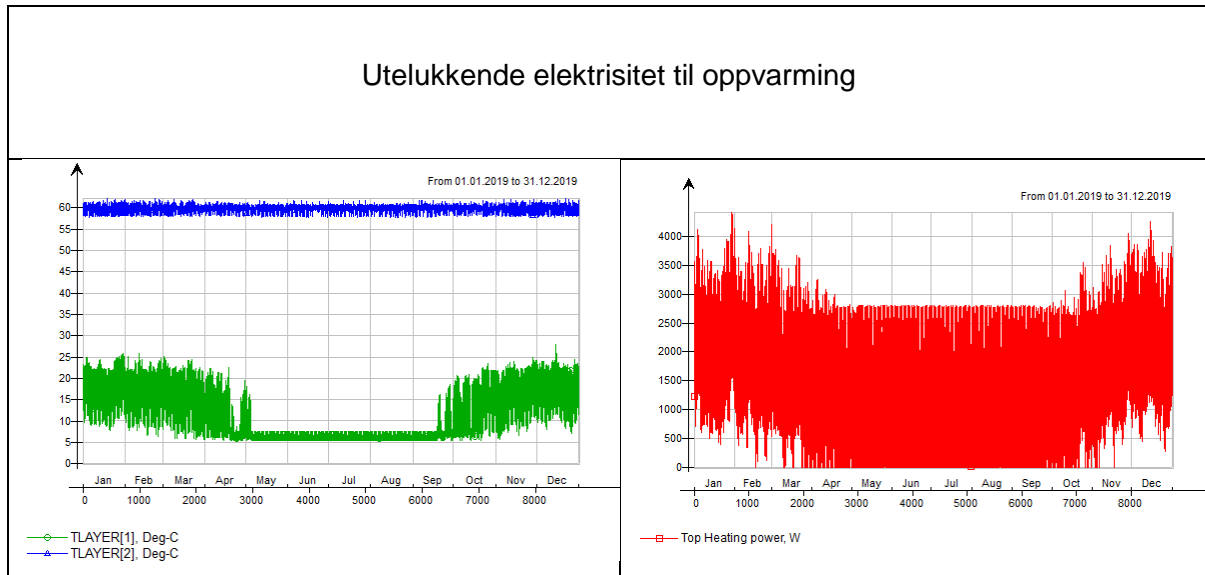


Vedlegg O Total levert energi til boligen

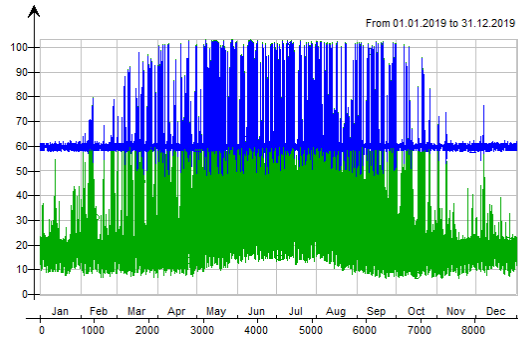


Vedlegg P Resultater alle caser før optimalisering

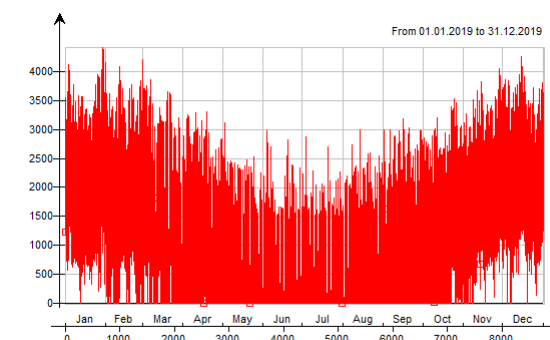
P.1 Oslo



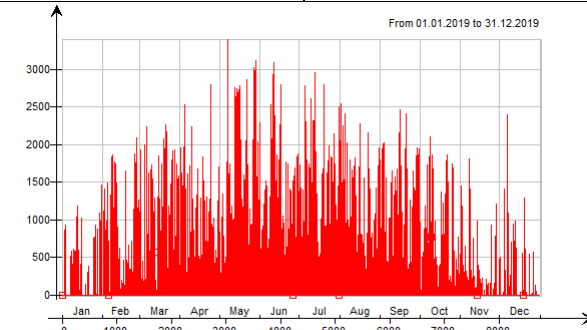
Tradisjonelt solfangeranlegg med plan solfanger



—○— T-LAYER[1], Deg-C
—△— T-LAYER[2], Deg-C

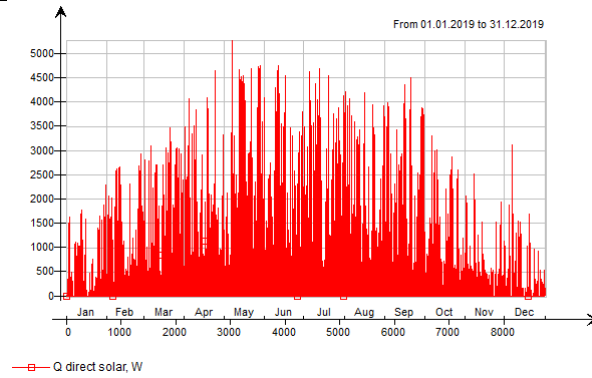
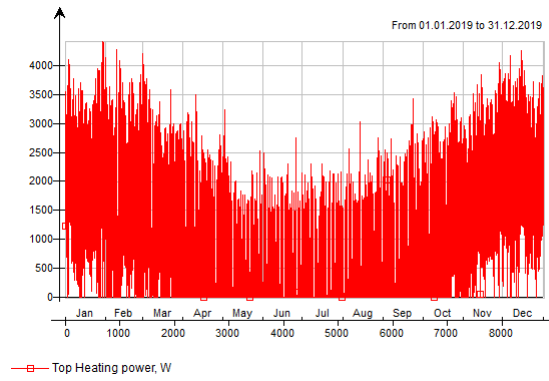
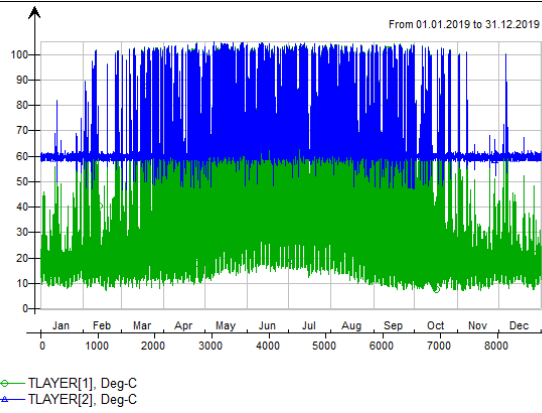


—□— Top Heating power, W

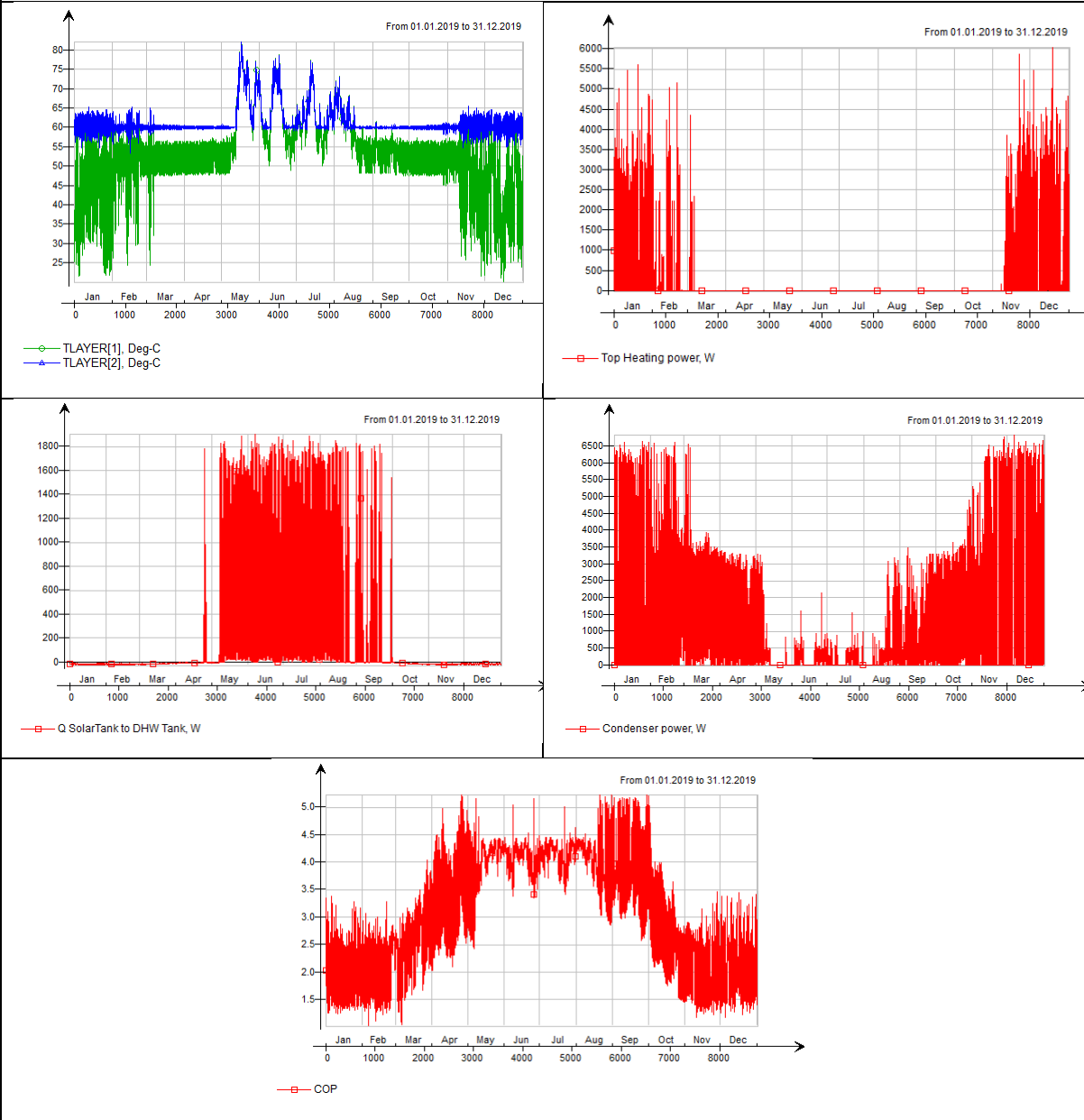


—□— Q Direct Solar, W

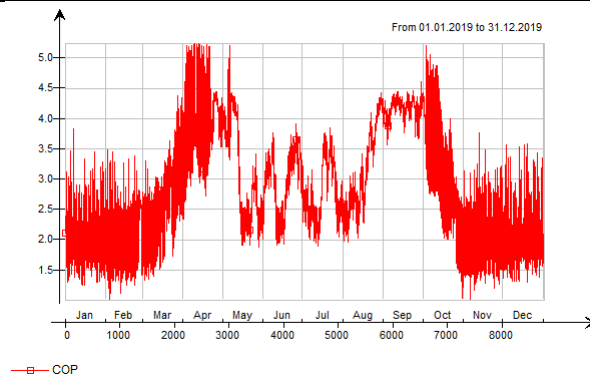
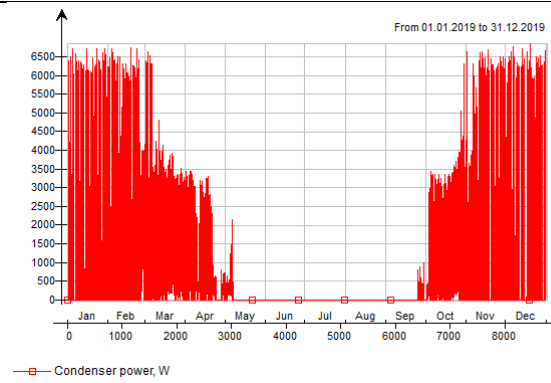
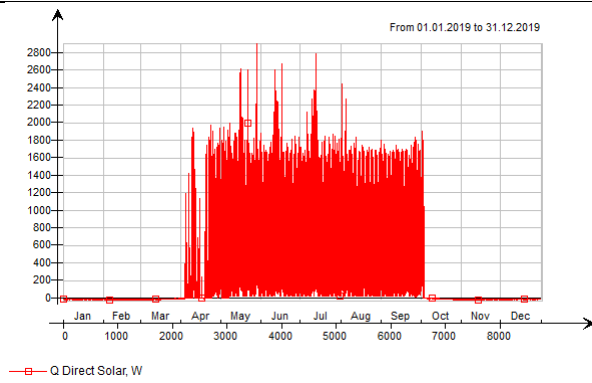
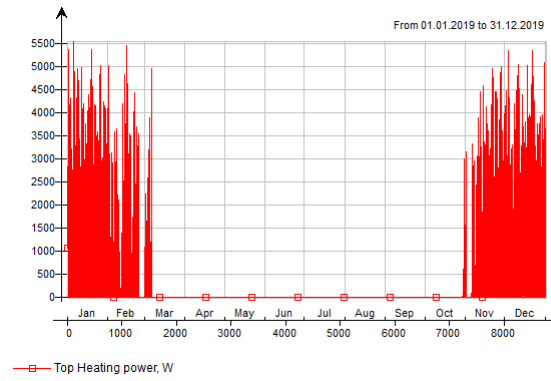
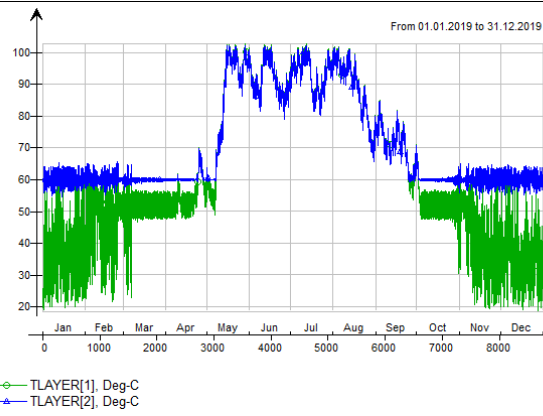
Tradisjonelt solfangeranlegg med vakuumsolfanger



Solassisterert varmepumpe med plan solfanger

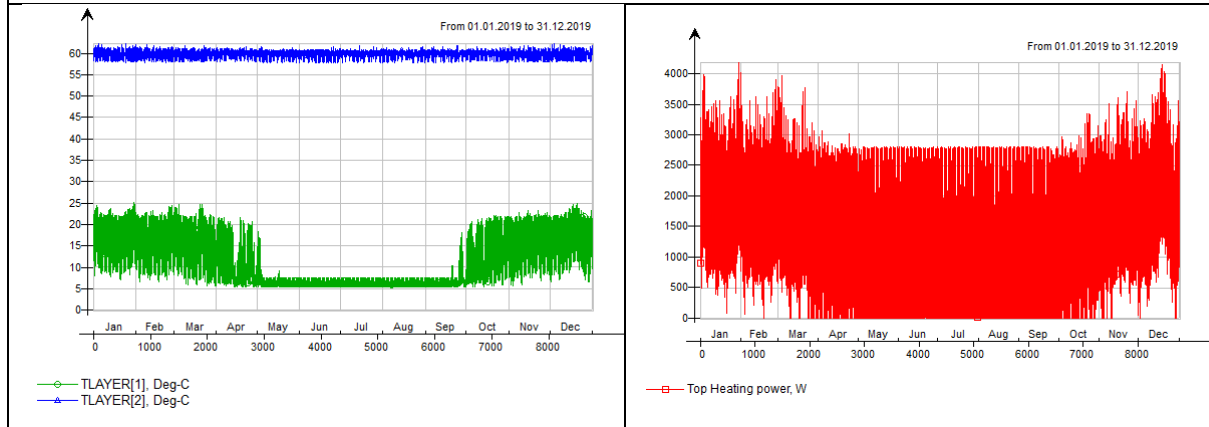


Solassistert varmepumpe med vakuumsolfanger

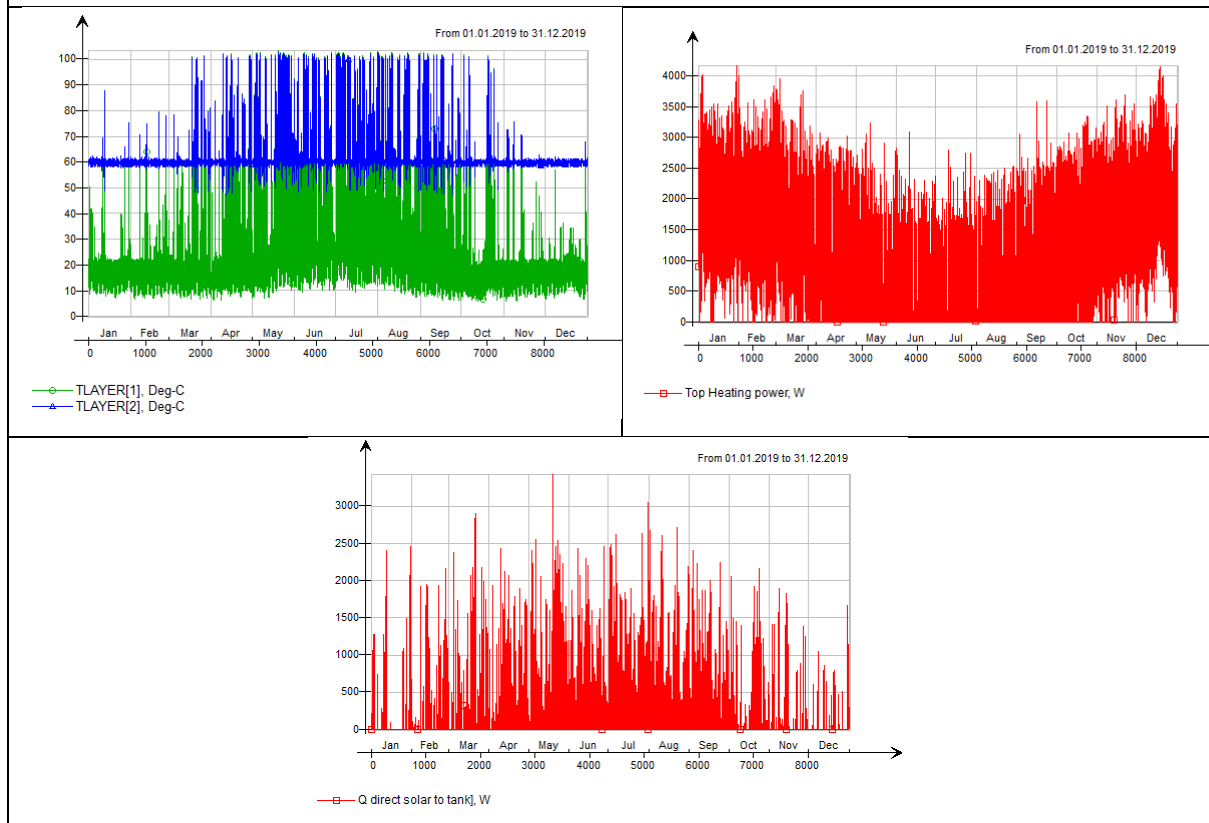


P.2 Kristiansand

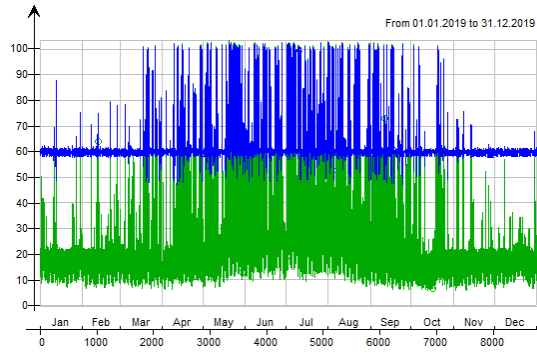
Utelukkende elektrisitet til oppvarming



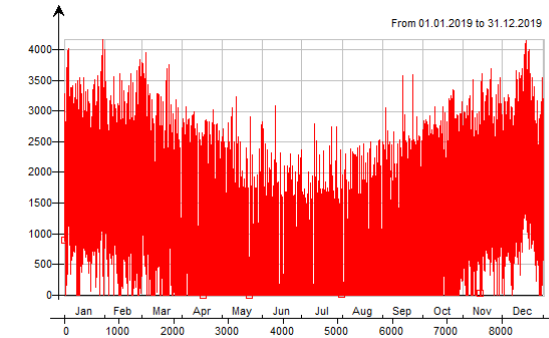
Tradisjonelt solfangeranlegg med plan solfanger



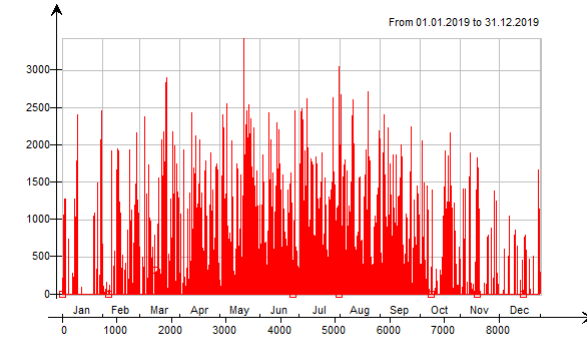
Tradisjonelt solfangeranlegg med vakuumsolfanger



—○— T-LAYER[1], Deg-C
—▲— T-LAYER[2], Deg-C

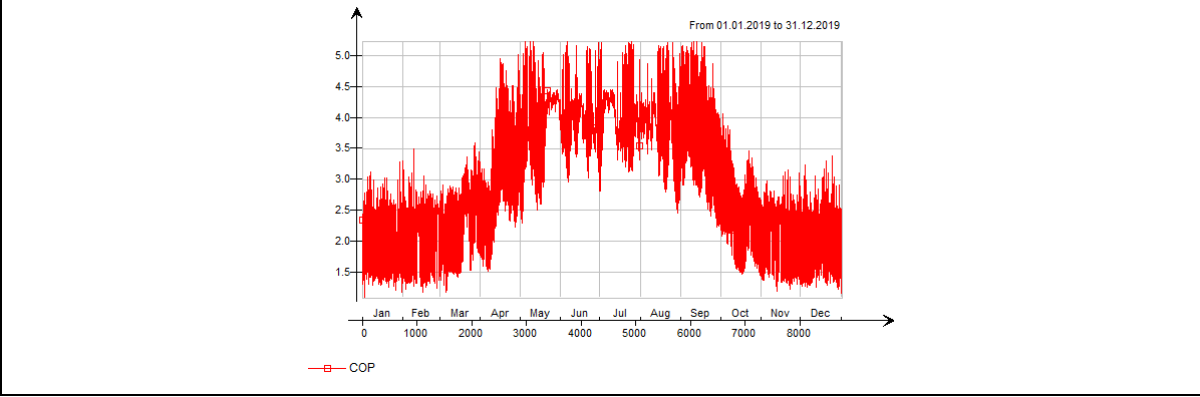
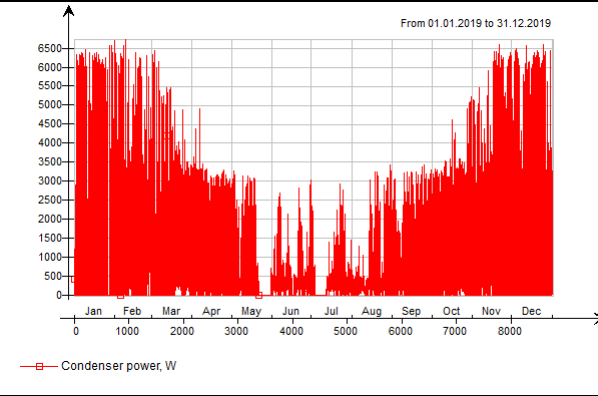
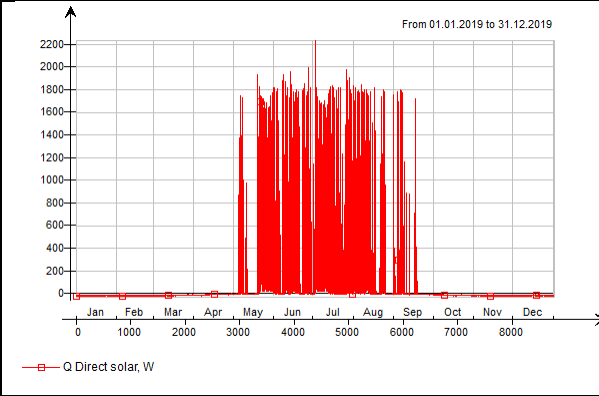
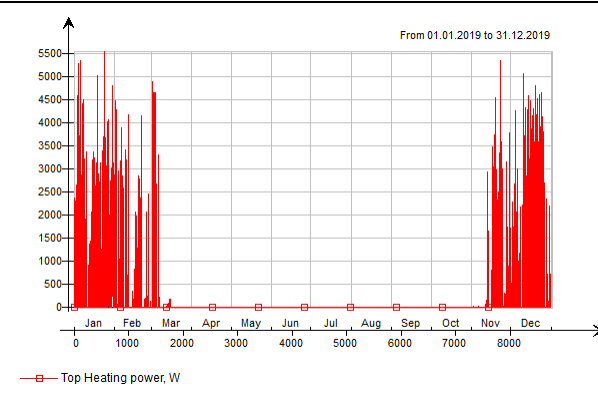
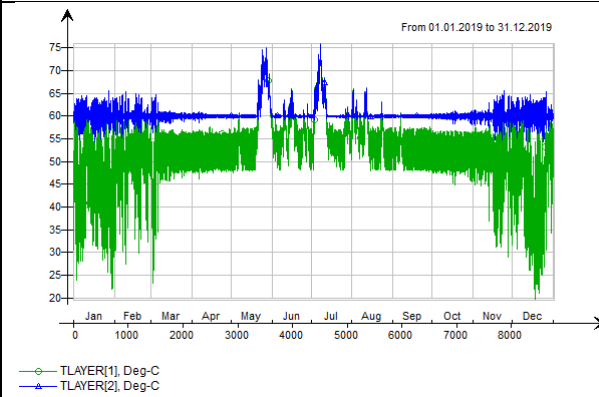


—□— Top Heating power, W

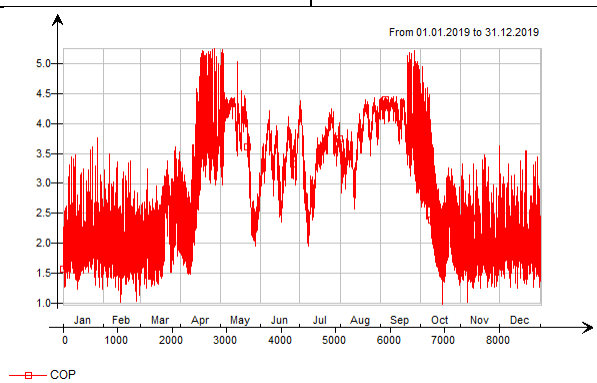
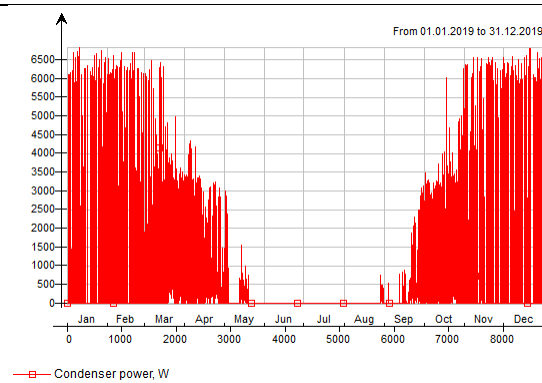
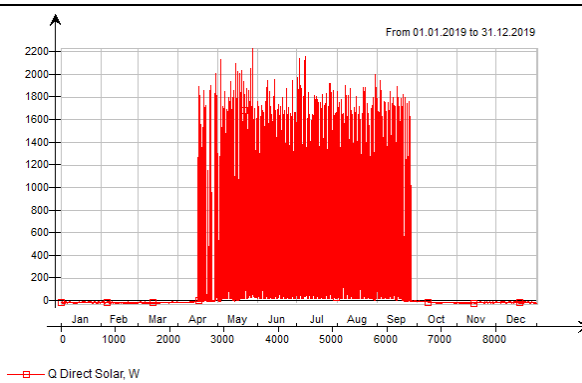
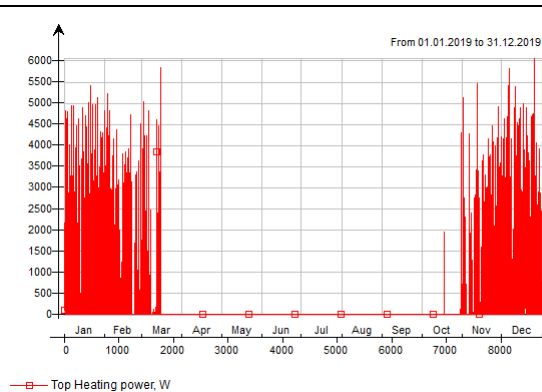
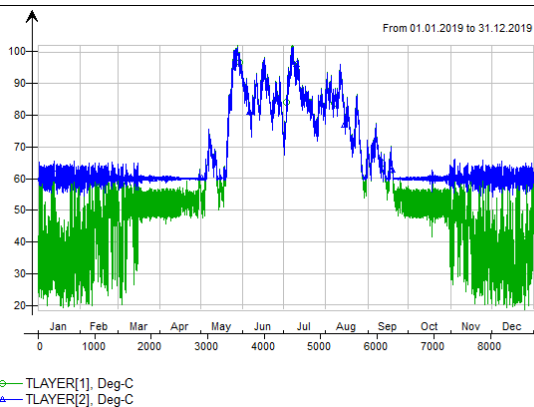


—□— Q Direct solar to tank, W

Solassisteret varmepumpe med plan solfanger

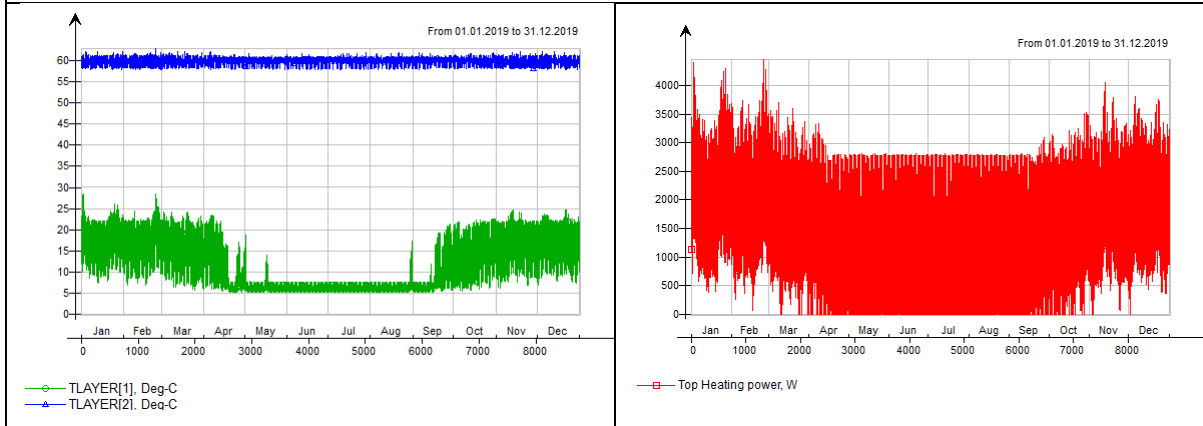


Solassistert varmepumpe med vakuumsolfanger

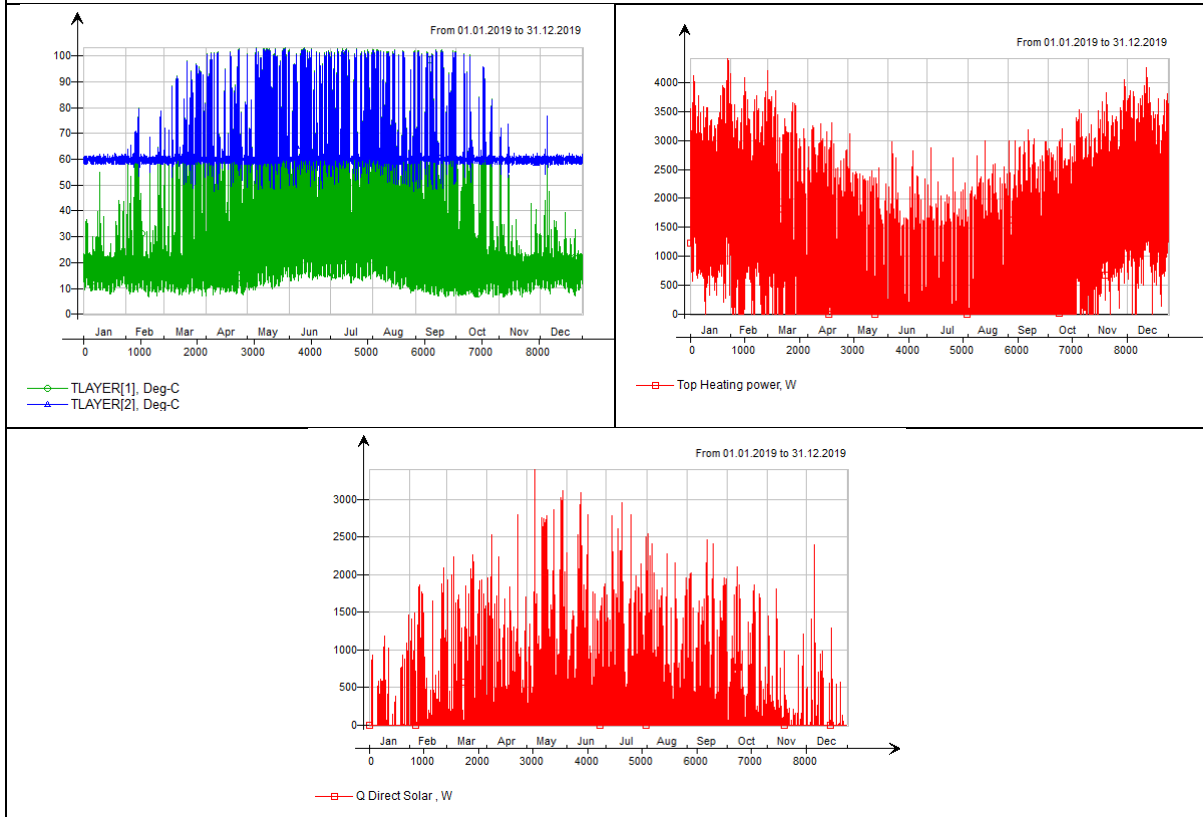


P.3 Trondheim

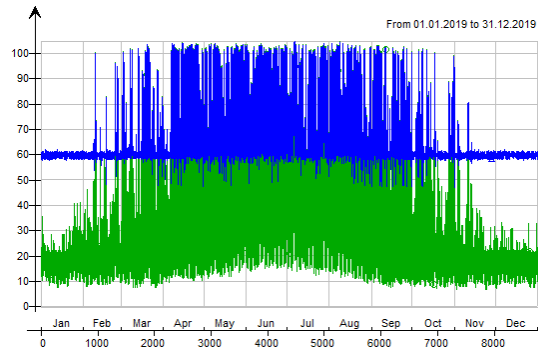
Utelukkende elektrisitet til oppvarming



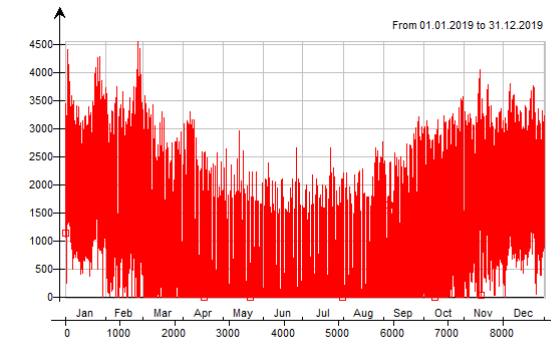
Tradisjonelt solfangeranlegg med plan solfanger



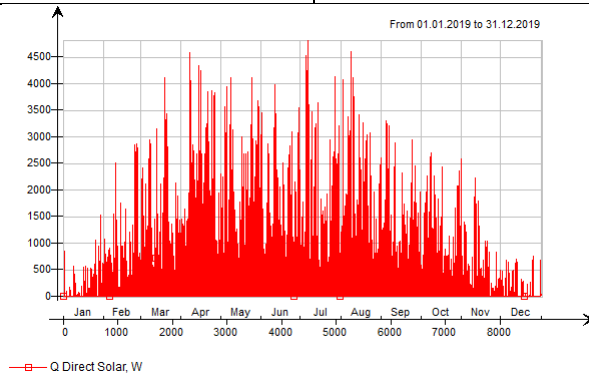
Tradisjonelt solfangeranlegg med vakuumsolfanger



—○— T-LAYER[1], Deg-C
—△— T-LAYER[2], Deg-C

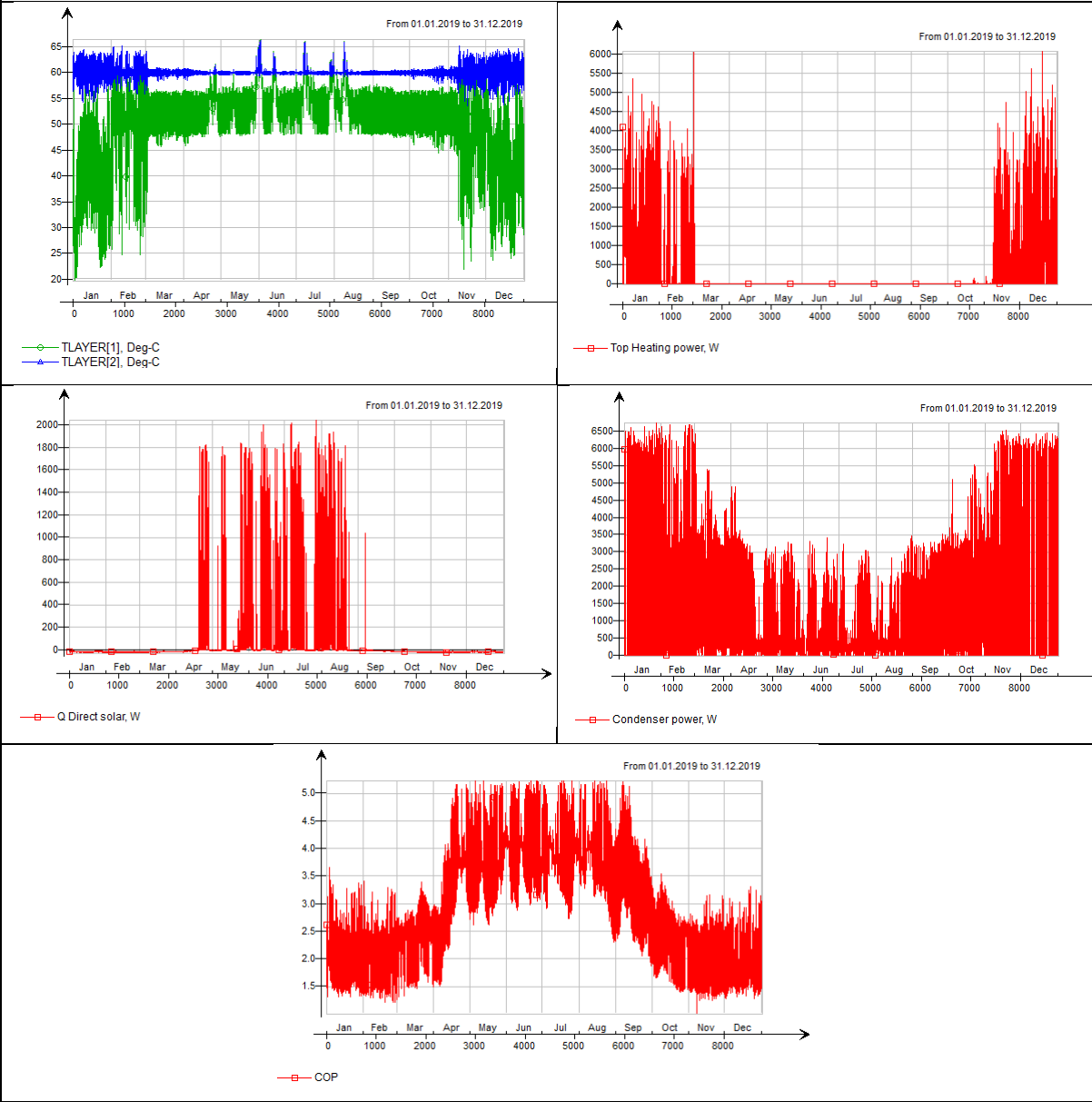


—□— Top Heating power, W

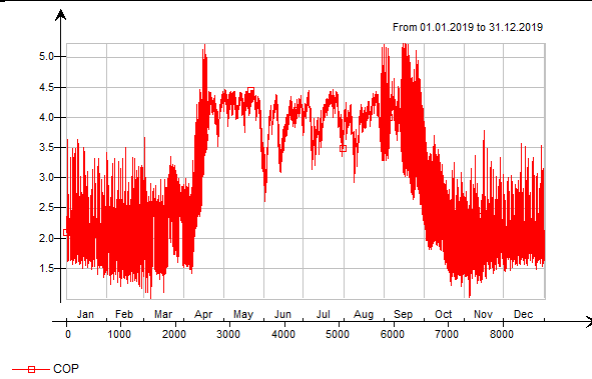
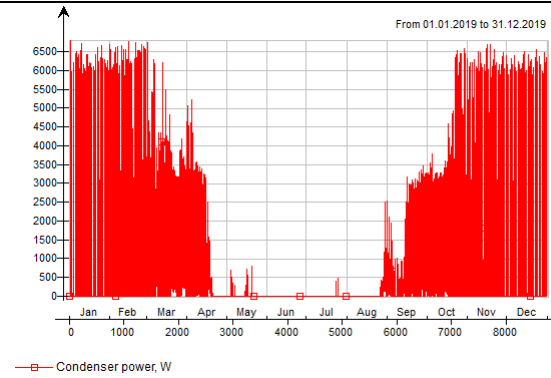
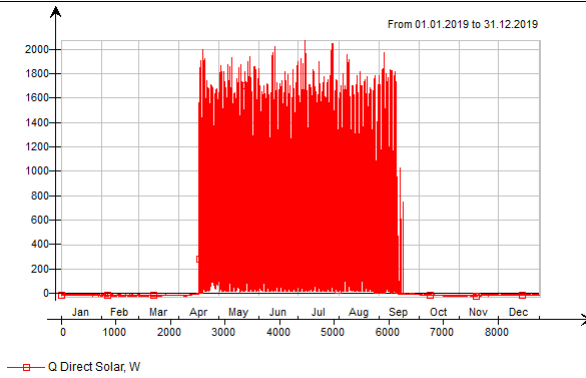
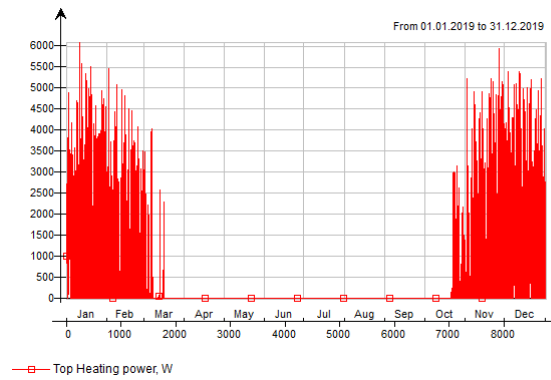
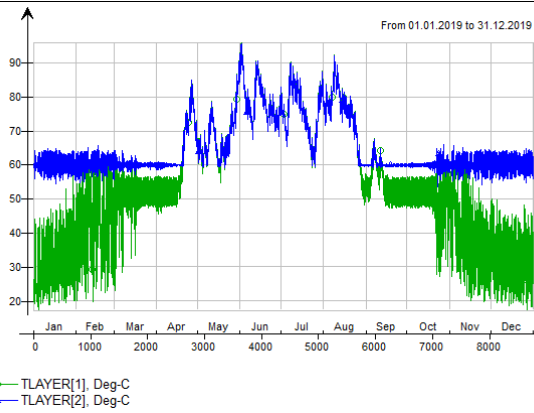


—□— Q Direct Solar, W

Solassisterert varmepumpe med plan solfanger



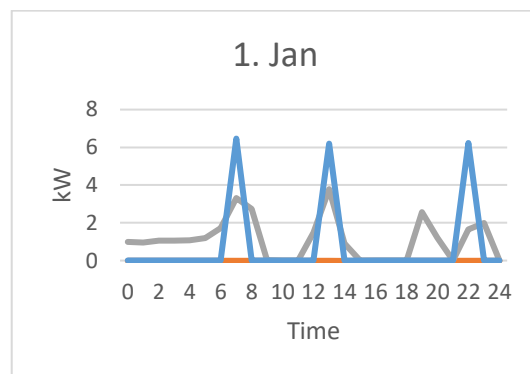
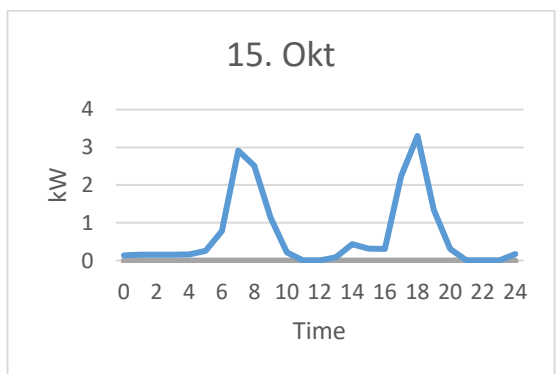
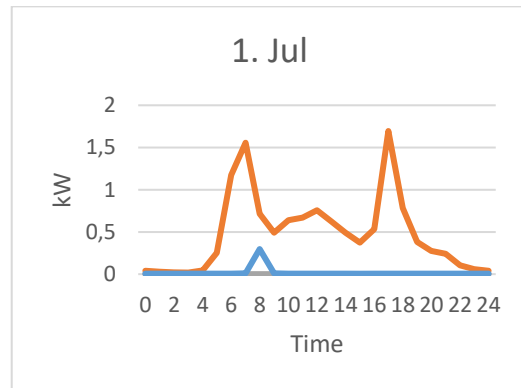
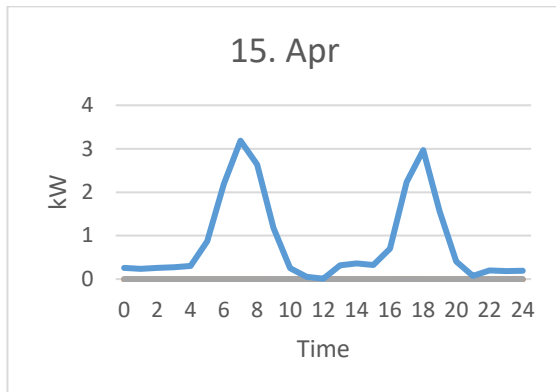
Solassistert varmepumpe med vakuumsolfanger



Vedlegg Q Passivhuskrav for energiforsyning

| Lokasjon | Varmebehov $\frac{kWh}{\text{år}}$ | Varmt tappevann $[\frac{kWh}{\text{år}}]$ | Maks levert energi $[\frac{kWh}{\text{år}}]$ |
|--------------|------------------------------------|---|--|
| Oslo | 8214 | 5066 | 5672 |
| Kristiansand | 7747 | 5066 | 5214 |
| Trondheim | 8215 | 5066 | 5682 |

Vedlegg R Dekningsgrad av varmekilder for et døgn i hver årstid.



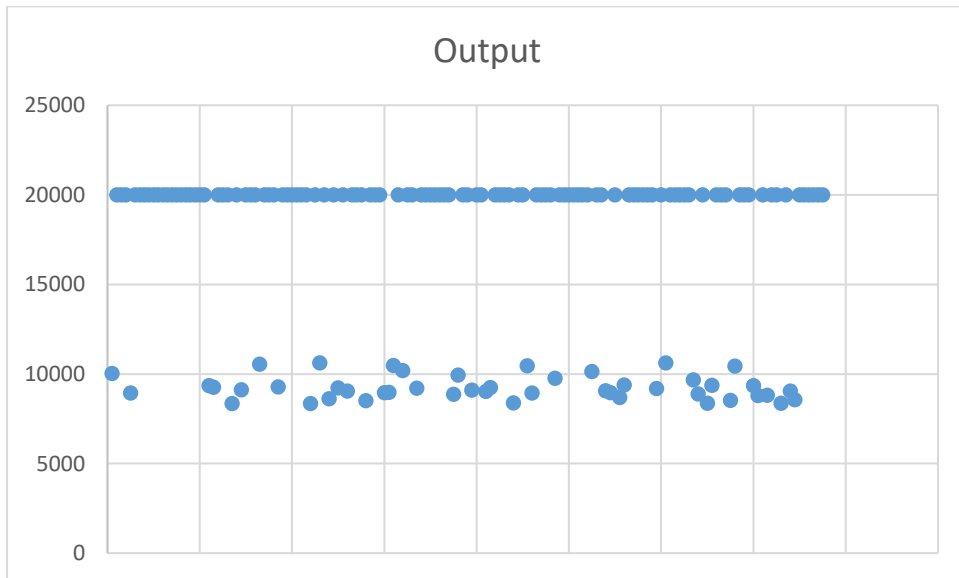
— Sun — Top — Condenser

Vedlegg S Parametere etter optimalisering

| | Lengde sol- fanger | Pumpe 1* | Pumpe 2* | Pumpe 3* | Pumpe 4* | Pumpe 5 | Min temp brine | Volum sol Tank | Radius varmt- vannstank | Vinke I Solfa nger | Orientering |
|-----------------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------|
| 90% flat Oslo | 6,5 | 0,68 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 0,05 | -10 | 0,7 | 0,15 | 34,5 | -3 |
| 80% flat Oslo | 6 | 1,8 | 1,64 | 1,32 | 0,52 | 0,05 | -4 | 1,3 | 0,3 | 45 | -9 |
| 70 % flat Oslo | 5 | 0,68 | 1 | 1,64 | 0,84 | 0,05 | 0 | 0,7 | 0,6 | 31,5 | 15 |
| 90% flat Kristiansand | 6 | 0,52 | 1,8 | 0,68 | 1,64 | 0,05 | -8 | 1,24 | 0,6 | 43,5 | 3 |
| 80% Kristiansand | 6,5 | 1,8 | 0,52 | 0,68 | 1,8 | 0,05 | 0 | 0,76 | 0,6 | 43,5 | 3 |
| 70 % Kristiansand | 4,5 | 0,68 | 0,84 | 1,8 | 1,48 | 0,24 | 0 | 0,94 | 0,35 | 31,5 | 9 |
| 90% Trondheim | 7 | 1,8 | 1,16 | 1,8 | 1,8 | 0,05 | -10 | 0,7 | 0,15 | 34,5 | 15 |
| 70% Trondheim | 7,5 | 1,8 | 1,16 | 1,8 | 1,8 | 0,05 | -4 | 1,3 | 0,4 | 45 | 9 |
| 70% Trondheim | 7 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,16 | 0,05 | 0 | 0,7 | 0,6 | 37,5 | 15 |

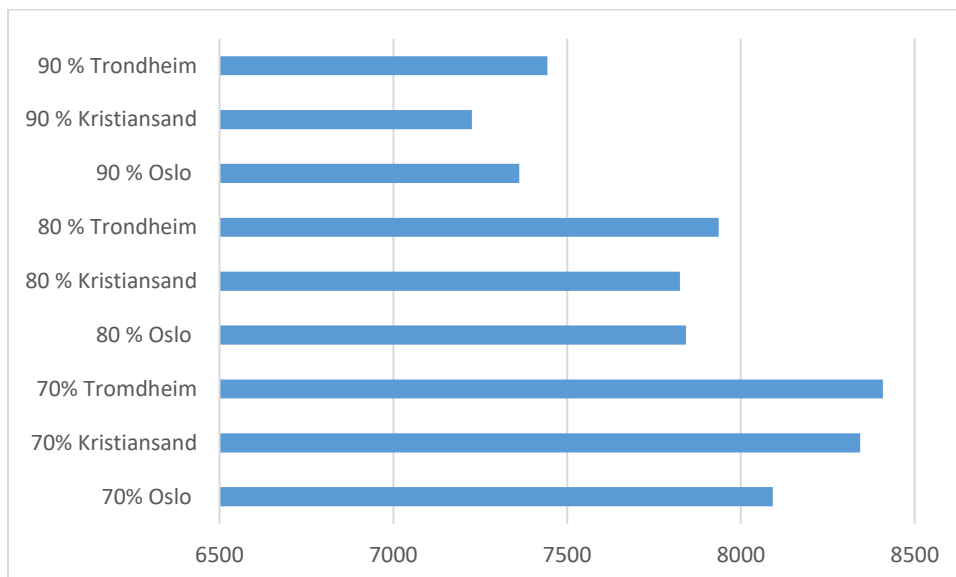
* Pumpe 1 er pumpe mellom solfanger og varmeveksler, pumpe 2 er mellom varmeveksler i solkretsen og soltank, pumpe 3 er mellom varmeveksler til varmtvannstank og soltank, pumpe 4 er mellom varmeveksler og varmtvannstank.

Vedlegg T Resultat av optimalisering 70% dekningsgrad Kristiansand

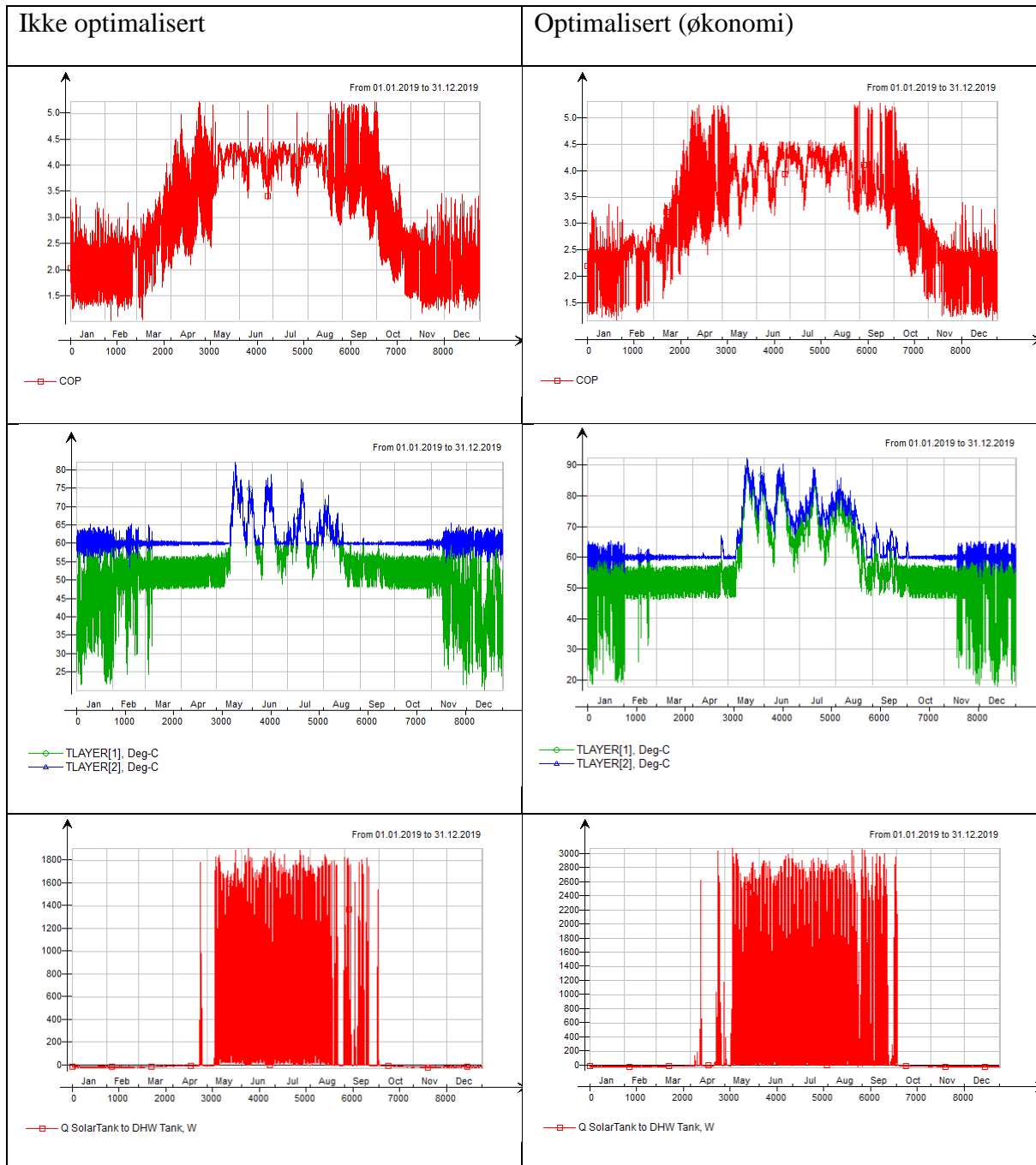


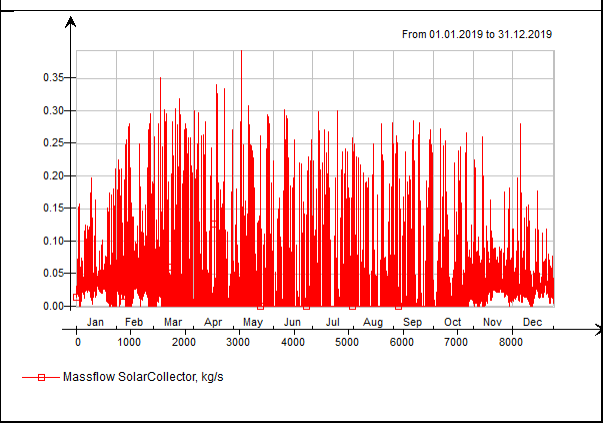
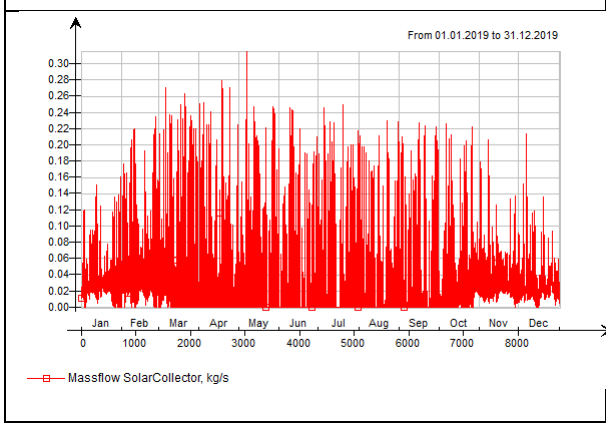
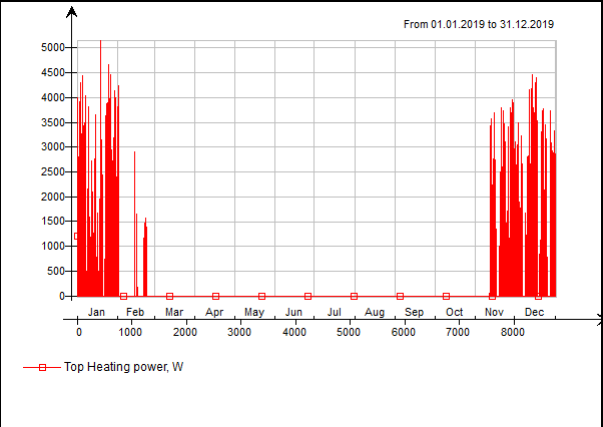
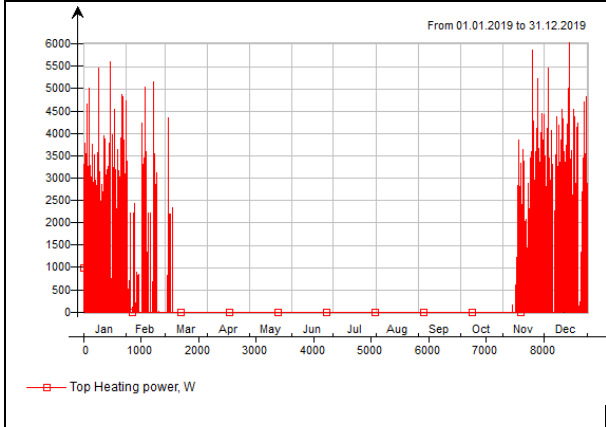
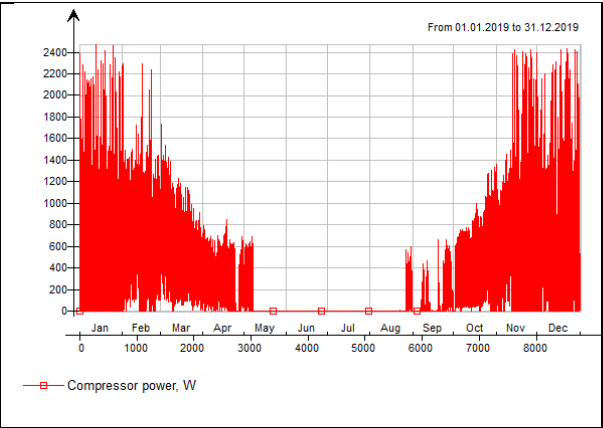
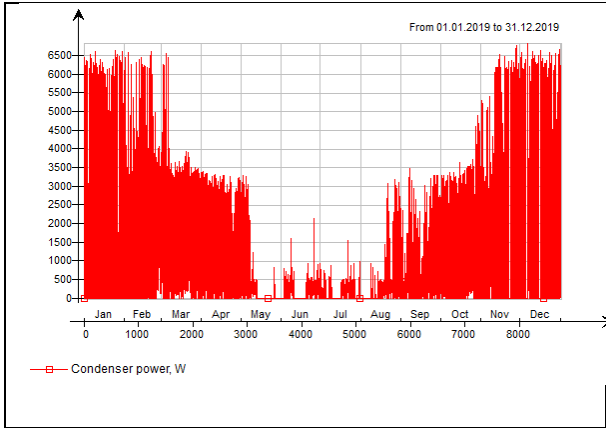
Vedlegg U Total levert energi til boligen etter optimalisering

| Betingelse | Total levert energi til bygningen [kWh] | | |
|---------------------------|---|--------------|-----------|
| | Oslo | Kristiansand | Trondheim |
| 90% Dekningsgrad fra SAHP | 7363 | 7226 | 7444 |
| 80% Dekningsgrad fra SAHP | 7842 | 7825 | 7936 |
| 70% Dekningsgrad fra SAHP | 8091 | 8343 | 8408 |

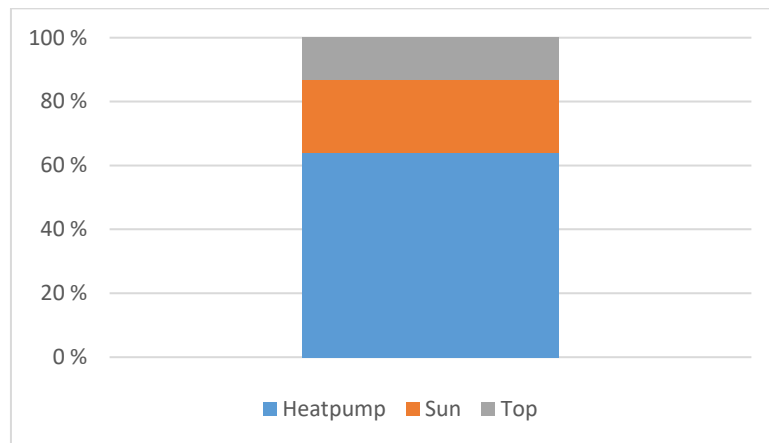


Vedlegg V Tabell sammenligning før og etter optimalisering (Lønnsomhet)





Vedlegg W Dekningsgrader for varmekilde etter opt mht. økonomi



Vedlegg X Dekningsgrader av ulike energikilder før optimalisering

| | Totalt varmebehov [kWh] | Varmepumpe [kWh] | Toplast [kWh] | Nyttbar sol [kWh] | Varmepumpe [kWh] | Toplast [kWh] | Nyttbar sol [kWh] |
|---------------------------------------|-------------------------|------------------|---------------|-------------------|------------------|---------------|-------------------|
| Oslo | | | | | | | |
| Kun elektrisitet til oppvarming | 8222 | 0 | 8222 | 0 | 0,0 % | 100,0 % | 0,0 % |
| Tradisjonelt solfangeranlegg (plan) | 8222 | 0 | 6421 | 1801 | 0,0 % | 78,1 % | 21,9 % |
| Tradisjonelt solfangeranlegg (Vakuum) | 8222 | 0 | 5759 | 2463 | 0,0 % | 70,0 % | 30,0 % |
| SAHP plan | 8222 | 5399 | 1710 | 1113 | 65,7 % | 20,8 % | 13,5 % |
| SAHP vakuum | 8222 | 3668 | 2456 | 2097 | 44,6 % | 29,9 % | 25,5 % |
| Kristiansand | | | | | | | |
| Kun elektrisitet til oppvarming | 7758 | 0 | 7758 | 0 | 0,0 % | 100,0 % | 0,0 % |
| Tradisjonelt solfangeranlegg (plan) | 7758 | 0 | 6196 | 1562 | 0,0 % | 79,9 % | 20,1 % |
| Tradisjonelt solfangeranlegg (Vakuum) | 7758 | 0 | 5621 | 2137 | 0,0 % | 72,5 % | 27,5 % |
| SAHP plan | 7758 | 5989 | 1184 | 585 | 77,2 % | 15,3 % | 7,5 % |
| SAHP vakuum | 7758 | 3783 | 2198 | 1778 | 48,8 % | 28,3 % | 22,9 % |

| Trondheim | | | | | | | |
|---------------------------------------|------|------|------|------|--------|---------|--------|
| Kun elektrisitet til oppvarming | 8223 | 0 | 8223 | 0 | 0,0 % | 100,0 % | 0,0 % |
| Tradisjonelt solfangeranlegg (plan) | 8223 | 0 | 6708 | 1515 | 0,0 % | 81,6 % | 18,4 % |
| Tradisjonelt solfangeranlegg (Vakuum) | 8223 | 0 | 6032 | 2191 | 0,0 % | 73,4 % | 26,6 % |
| SAHP plan | 8223 | 6207 | 1754 | 262 | 75,5 % | 21,3 % | 3,2 % |
| SAHP vakuum | 8223 | 3644 | 2797 | 1782 | 44,3 % | 34,0 % | 21,7 % |