



**UiT** Norges arktiske universitet

Fakultet for Naturvitenskap og Teknologi - Institutt for Fysikk og Teknologi

**Analyse av energibruk og teknisk drift ved Bryne videregående skole**

Louise Mitchell Tjøtta

Masteroppgave i Energi, klima og miljø - EOM-3901 desember 2019



## Sammendrag

Tidligere Bryne videregående skole (vgs.) og Time vgs. ble i 2015 slått sammen til nye Bryne vgs. I den anledning ble det bygget tre nye skolebygg med et moderne og komplekst energisystem. Skolen er et pilotprosjekt i tråd med Rogaland fylkeskommune sin miljøpolitikk og er bygget med fokus på bærekraftige prinsipper, lavt energiforbruk og bruk av energikilder med begrenset CO<sub>2</sub> utslipp. Skolens varme- og kjølebehov dekkes av to identiske varmepumper med balansert uttak og tilbakeføring av varme i energibrønner, to gasskjeler og solfangeranlegg med både vakum- og plansolfangere. Hensikten med oppgaven er å belyse flere av energisystemets driftstekniske forhold og foreslå tiltak for forbedring. Det er utført en dybdeanalyse hvor skolens energibruk per energipost er undersøkt for driftsåret 01.08.18 – 31.07.19. Videre er sammenhenger mellom energisystemets tekniske drift og ytelse kartlagt. Med utgangspunkt i resultatene er det foreslått fire tiltak for en forbedret teknisk drift.

- Endring av hovedvarmens utekompenseringskurve for å garantere tilførsel av varme fra gasskjelene til hovedvarmen dersom varmepumpene ikke leverer som ønsket.
- Installasjon av tilbakeslavsventil i bypass i bygg A og B. Bypassene er installert for å utnytte overskuddsvarme fra romoppvarming til ventilasjonsoppvarming, men fører til at hovedvarmens turvann blandes direkte med returvann ved lavt behov for ventilasjonsoppvarming. Med utgangspunkt i estimert COP i CoolPack kunne det potensielt vært spart  $29 \cdot 10^3$  kWh det gjeldende driftsåret dersom blanding kunne vært unngått.
- Utbedring av måleinstrumenter med målefeil, og da spesielt de måleinstrumentene som er forriglet mot sikkerhetssystemer.
- Endring av reguleringsstrategi for veksling mellom bruk av kollektorvæske fra energibrønnene i samlestock EB03 og isvann fra fordamperutløpet til varmepumpene til prosesskjøling. Dette vil sikre at væsken med lavest temperatur benyttes og det oppnås best mulig COP for de lokale kjølemaskinene.

Dersom tiltakene gjennomføres forventes en reduksjon i energiforbruk og mer pålitelig overvåkning av energisystemet. Det vil også redusere risikoen for at temperaturkrav til rom – og ventilasjonsoppvarming ikke oppfylles.



## Forord

Masteroppgaven er skrevet ved Norges Arktiske Universitet (UIT) høsten 2019 og er utført i forbindelse med emnet EOM-3901 som avsluttende arbeid innen spesialiseringsretningen fornybar energi på sivilingeniør-programmet Energi, klima og miljø.

I forbindelse med valg av tema for oppgaven tok jeg kontakt med Olav Ekkje i Sweco Norge AS som introduserte meg for pilotprosjektet. Han la til rette for at jeg kunne skrive om Bryne vgs., stor takk til han. Takk til Rogaland fylkeskommune som har gitt med tilgang til informasjon og datamateriale. Det har vært både spennende og lærerikt å utføre en dybdeanalyse på et reelt energisystem med innovative løsninger og installasjoner av høy kvalitet. Arbeidet med oppgaven har vært en stor læringsprosess som jeg vil ta med meg videre ut i arbeidslivet.

Jeg ønsker å takke Behzad Mojahed og Svein Berge i Sweco for å besvare mine spørsmål. Likeledes vil jeg takke Knut Ivar Eskeland, driftstekniker ved Bryne vgs., som har delt sin kunnskap om driften av energisystemet og skolen.

Stor takk til hovedveileder Eivind Brodal, førsteamanuensis ved institutt for automasjon og prosessteknologi, for god oppfølging, veiledning og tilgjengelighet. Takk til medveileder Raymond Riise, førsteamanuensis ved institutt for bygg, energi og materialteknologi.

Min fantastiske familie og samboer Erlend, jeg er svært takknemlig for støtten dere har gitt meg gjennom hele studieløpet.



# Innholdsfortegnelse

<b>Sammendrag</b> .....	<b>I</b>
<b>Forord</b> .....	<b>III</b>
<b>Innholdsfortegnelse</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Innledning</b> .....	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Problemstilling og målformulering .....	3
1.3 Oppgavens struktur.....	3
<b>2 Metode</b> .....	<b>5</b>
2.1 Litteraturstudie .....	5
2.1.1 Systemgrenser .....	5
2.1.2 Standard SN/TR 3069:2019 .....	6
2.1.3 Standard NS 3031:2014 .....	7
2.2 Utfordringer rundt formålsdelt etterprøving av energibruk på Bryne vgs.....	8
2.3 Informasjons- og datainnsamling.....	8
2.4 Feilkilder og databehandling .....	9
2.4.1 Håndtering av feilmålinger.....	9
2.4.2 Metode ved manglende data.....	10
2.5 Beregningsverktøyet CoolPack.....	11
<b>3 Energisystemet på Bryne vgs.</b> .....	<b>15</b>
3.1 Oppsummerende beskrivelse av energisystemet.....	15
3.2 Grunnvarme – og varmpumpeanlegg .....	19
3.3 Instrumentering og målepunkt.....	21
<b>4 Resultater og diskusjon</b> .....	<b>25</b>
4.1 Del 1: Formålsdelt etterprøving av energibruk.....	26
4.1.1 Prosjekterte verdier for netto energibruk og levert energi .....	26
4.1.2 Formålsdelt etterprøving av brutto energibruk.....	28
4.1.2.1 Energibruk til rom – og ventilasjonsoppvarming.....	28
4.1.2.2 Energibruk til tappevann .....	33
4.1.2.3 Energibruk til ventilasjonskjøling .....	34
4.1.2.4 Energibruk til pumper i energisentralen .....	35
4.1.2.5 Energibruk til vifter .....	37
4.1.2.6 Energibruk til belysning .....	38
4.1.3 Etterprøving av levert energi .....	39
4.1.4 Diskusjon del 1: Formålsdelt etterprøving av energibruk .....	39
4.2 Del 2: Kartlegging av driftstekniske egenskaper og energisystemets ytelse .....	42
4.2.1 Energisystemets varmeytelse .....	42
4.2.2 Varmepumpenes gjennomsnittlige effektfaktor – SCOP .....	43
4.2.3 Temperatursettpunkt i energisentralen og i romoppvarmingskretser.....	46
4.2.4 Endring i varmpumpenes COP grunnet bypass i bygg A og B .....	56
4.2.5 Temperatursettpunkt på romnivå for romoppvarming .....	59
4.2.6 Opprinnelig strategi for tilbakeføring av varme i energibrønnene.....	61

4.2.6.1	Tilbakeføring av solvarme i energibrønnene.....	61
4.2.6.2	Tilbakeføring av avkastvarme i energibrønnene .....	63
4.2.7	Energibalansen i brønnene .....	64
4.2.8	Temperaturutvikling i energibrønnene.....	66
4.2.9	Volumstrøm i energibrønnene.....	67
4.2.10	Reguleringsstrategi for bruk av samlestokk EB03 til prosesskjøling .....	69
<b>5</b>	<b>Konklusjon .....</b>	<b>73</b>
<b>6</b>	<b>Forslag til videre arbeid.....</b>	<b>75</b>
	<b>Referanseliste .....</b>	<b>77</b>
<b>7</b>	<b>Vedlegg .....</b>	<b>81</b>
7.1	<i>Vedlegg A</i> .....	81
7.2	<i>Vedlegg B</i> .....	84
7.3	<i>Vedlegg C</i> .....	85
7.4	<i>Vedlegg D</i> .....	87
7.5	<i>Vedlegg E</i> .....	88
7.6	<i>Vedlegg F</i> .....	92
7.7	<i>Vedlegg G</i> .....	93
7.8	<i>Vedlegg H</i> .....	95
7.9	<i>Vedlegg I</i> .....	96
7.10	<i>Vedlegg J</i> .....	98

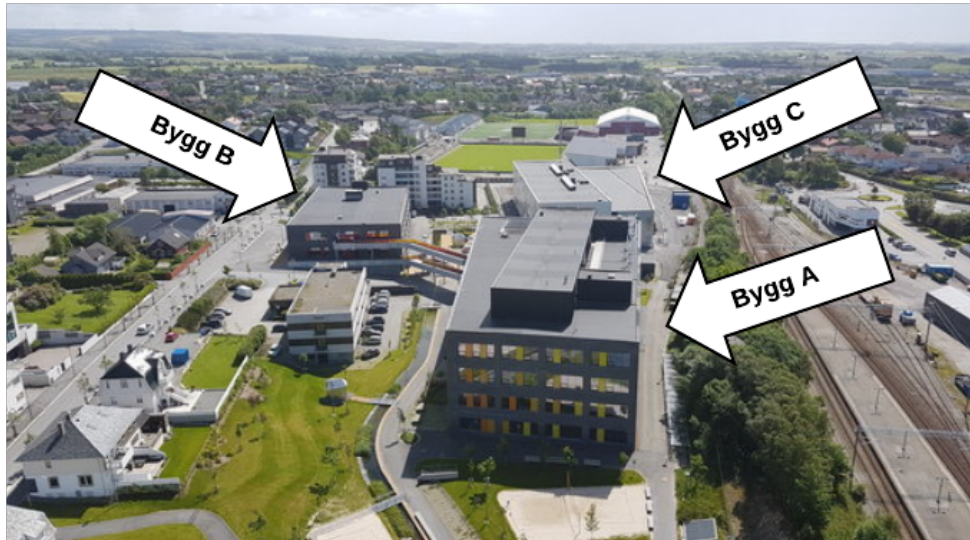


# 1 Innledning

Masteroppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven «Kartlegging av energisystemet ved Bryne videregående skole» (Tjøtta, 2019) utført våren 2019 og skrevet i samarbeid med rådgivingselskapet Sweco Norge AS og Rogaland fylkeskommune. Prosjektoppgaven presenterte en overordnet beskrivelse av energisystemet ved Bryne videregående skole, og det ble utført innledende målinger for å kartlegge hvorvidt prosjekterte verdier for skolens energibruk korrelerte med reelle verdier for driftsåret 2018. Basert på funn i prosjektoppgaven er det utarbeidet mål for masteroppgaven som skal resultere i tiltak for en forbedret teknisk drift ved Bryne vgs.

## 1.1 Bakgrunn

Nye Bryne vgs. er en sammenslåing av tidligere Time vgs. og Bryne vgs. Den nye videregående skolen består av tre bygninger (A, B og C) som rommer totalt ca. 1550 elever. Bygg A og B ble tatt i bruk i 2015, og bygg C ble tatt i bruk i 2017. Figur 1 viser et bilde av skolebygningene og lokasjonen av energisentralen på taket til bygg A. Skolen har et totalt bruttoareal (BRA) på 26506 m<sup>2</sup>. Bygg A består av fire etasjer i tillegg til energisentralen på taket, og bygg B består av tre etasjer. Bygg C er delt inn i to soner, undervisningsområde og verksted, førstnevnte på to etasjer og sistnevnte på tre etasjer. Tabell 1 gir en oversikt over BRA til de tre skolebygningene som utgjør Bryne vgs.



Figur 1. Bryne vgs. (Bryne videregående skole, 2017).

Tabell 1. BRA Bryne vgs.

<b>Bryne videregående skole</b>	
BRA bygg A	12451 m <sup>2</sup>
BRA bygg B	5355 m <sup>2</sup>
BRA bygg C	8700 m <sup>2</sup>
<b>Sum</b>	<b>26506 m<sup>2</sup></b>

Skolens varmebehov dekkes av en kombinasjon av varmepumper med grunnvarme som energikilde, solfangieranlegg med to typer solfangere og gasskjeler. Energibrønnene er utformet som et balansert borehullsbasert energilager. Energisystemet er et vannbasert oppvarmings- og kjølesystem, som er både mengde – og temperaturregulert.

Bryne vgs. er et pilotprosjekt for gjennomføring av byggherren Rogaland fylkeskommune sin miljøpolitikk. Skolen er derfor bygget med fokus på bærekraftige prinsipper, lavt energiforbruk og bruk av energikilder med begrenset CO<sub>2</sub> utslipp. Tabell 2 presenterer energimerke til bygg A, B og C.

Tabell 2. Energimerke til bygg A, B og C (Sweco Norge AS, 2015, Multiconsult Norge AS, 2016).

<b>Energimerking for Bryne vgs. bygg A, B og C</b>			
<b>Bryne vgs.:</b>	<b>Bygg A</b>	<b>Bygg B</b>	<b>Bygg C</b>
Oppvarmingskarakter	Gul	Gul	Lysegrønn
Energikarakter	A	A	A

## 1.2 Problemstilling og målformulering

Masteroppgavens problemstilling er som følgende; *hvordan kan den tekniske driften av energisystemet ved Bryne vgs. forbedres?*

For å besvare problemstillingen er det utført en dybdeanalyse av energisystemet. Basert på analyseresultatene er det utarbeidet forslag til tiltak for forbedring av den tekniske driften av energisystemet. Dybdeanalysen er gjennomført basert på følgende tre delmål:

- **Delmål 1:** Etterprøving av skolens energibruk ved sammenligning av målte og prosjekterte verdier for energibruk på energipostnivå.
- **Delmål 2:** Kartlegging av sammenhenger mellom energisystemets driftstekniske egenskaper og ytelse.
- **Delmål 3:** Utarbeide tiltak for å forbedre den tekniske driften av energisystemet, basert på resultater fra delmål 1 og 2.

## 1.3 Oppgavens struktur

Masteroppgaven har følgende oppbygning:

- I kapittel 1 introduseres oppgaven, problemstilling og delmål.
- I kapittel 2 er relevant norsk metodikk presentert, deretter er metoden brukt i oppgaven beskrevet.
- I kapittel 3 gis en introduksjon av energisystemet.
- I kapittel 4 er først resultat fra gjennomføring av delmål 1 presentert og diskutert, deretter er resultat fra gjennomføring av delmål 2 og 3 presentert og diskutert.
- I kapittel 5 gis konklusjonen, og problemstillingen besvares.
- I kapittel 6 gis forslag til videre arbeid.



## 2 Metode

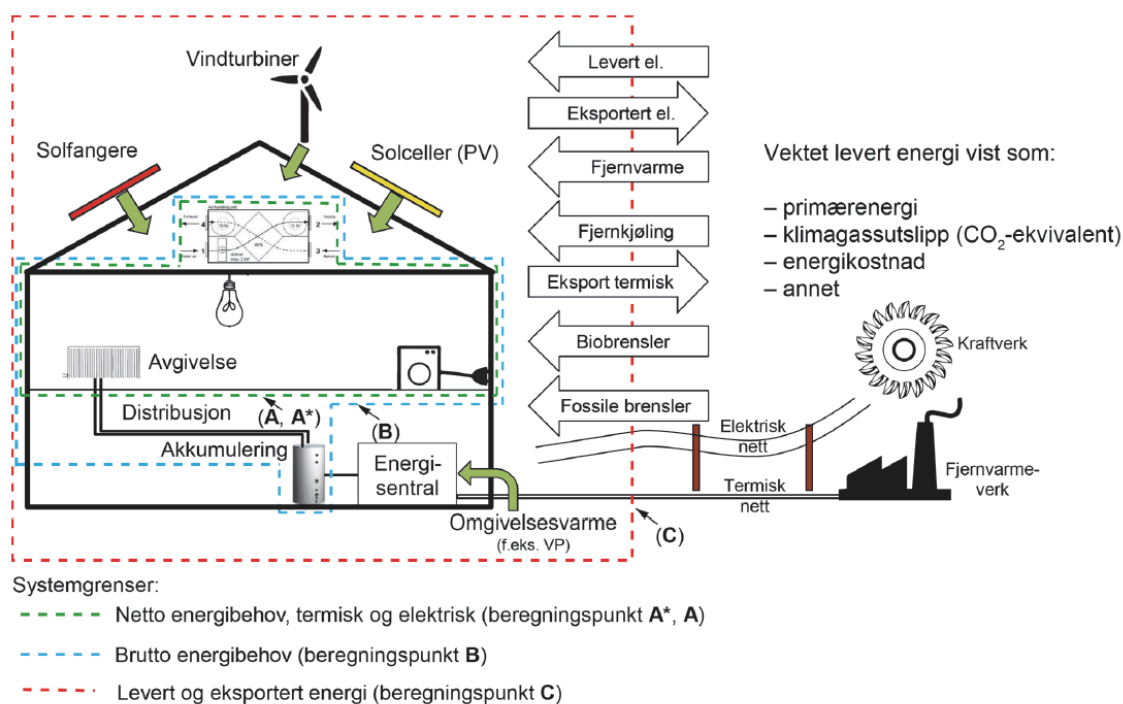
I følgende kapittel beskrives metoden som er benyttet i masteroppgaven. Først presenteres relevant norsk metodikk og utfordringer relatert til formålsdelt etterprøving av energibruk. Deretter gjennomgås metode for informasjons- og datainnsamling, samt databehandling. Til slutt gis en kortfattet introduksjon til beregningsverktøyet *CoolPack* som er brukt i arbeidet med masteroppgaven.

### 2.1 Litteraturstudie

Oppfølging og etterprøving av energibruk er viktige verktøy i arbeidet med å utnytte energikilder på en mest mulig effektiv måte. Derimot varierer fremgangsmåten i stor grad fra bygg til bygg. I 2013 publiserte SINTEF Fag en rapport om metodikk for etterprøving av bygningers energibruk på energipostnivå (Dokka og Grini, 2013). Rapporten var tiltenkt som et underlag til standarden SN/TR 3069:2019 *Formålsdelt etterprøving av bygningers energibruk* (Standard Norge, 2019) som ble publisert 2019-03-20. Standarden er en veileder for formålsdelt etterprøving av bygningers energibruk. Den er primært tiltenkt til frivillig bruk av byggforvaltere og driftsansvarlige, men kan også benyttes i fase 3 av energisparekontrakter i henhold til NS 6430:2014 *Alminnelige kontraktsbestemmelser for energisparing*. Metoden gitt i standard SN/TR 3069:2019 brukes i gjennomføring av delmål 1, 2 og 3.

#### 2.1.1 Systemgrenser

Ved etterprøving av bygningers energibruk på energipostnivå står begrepene netto energibehov, brutto energibehov og levert energi sentralt. Det er viktig å holde styr på energibegrepene når man skal etterprøve bygningers energibruk, slik at man sammenligner korrekt tallmateriale. Ifølge Standard Norge (2016) er netto energibehov definert som bygningens energibehov uten hensyn til energisystemets virkningsgrad eller tap i energikjeden, mens brutto energiforbruk er definert som avgitt energi fra energisentralen. Levert energi er definert som summen av all energi levert over bygningens systemgrenser for å dekke bygningens samlede energibehov inkludert systemtap som ikke gjenvinnes. Figur 2 illustrerer systemgrensene for energibegrepene.



Figur 2. Skjematisert fremstilling av systemgrenser og energiflyten mellom en bygning og tilknyttede energisystem (Standard Norge, 2016).

## 2.1.2 Standard SN/TR 3069:2019

Formålsdelt etterprøving av bygningers energibruk tar utgangspunkt i sammenligning av en referanseberegning som angir forventet energibehov og målt energiforbruk. Målet er å avdekke eventuelle avvik som kan tyde på feil eller mangelfull teknisk drift.

I følge Standard Norge (2019) skal referanseberegningen resultere i en tabell som viser brutto energibehov med en inndeling per energipost og en tabell som viser levert energi med en inndeling per energibærer.

Før man sammenligner referanseberegningen med målt reelt energibruk må nødvendige korrigeringer utføres slik at man sammenligner korrekt tallmateriale. I energiberegninger utført i henhold til beregningsmetodikk gitt i NS 3031:2014 og SN/TS 3031:2016 oppgis byggets netto energibehov og levert energibehov i energibudsjetten, mens i bygg måles vanligvis brutto energibruk og ikke netto varmeavgivelse til rommet/sonen. Dermed må man korrigere for energien brukt til å dekke de eventuelle akkumulerings-, distribusjons-, og avgivelsestapene i energisystemet. Den mest nøyaktige metoden å korrigere energiforbruket

på er å regne ut alle tap detaljert ved bruk av gjeldende standarder. Det er et for tidkrevende arbeid for masteroppgaven og derfor er det benyttet en forenklet metode hvor det brukes veiledende verdier for virkningsgrader for tap etter tillegg B i NS 3031:2014 (Dokka og Grini, 2013, Standard Norge, 2014). Videre omregnes netto energibehov til brutto energibehov ved å dele på virkningsgradene.

Et annet viktig moment ved sammenligning av beregnet energibehov og målt energiforbruk er at en god del av energibruken i bygg er væravhengig. Derfor må målt energiforbruk korrigeres for klimavariasjoner. En mye brukt metode er månedstemperaturkorrigering, hvor klimaavhengig energibruk temperaturkorrigeres hver måned, med en beregnet korreksjonsfaktor (Standard Norge, 2019). Antagelsen for korreksjonen er at energibruken til oppvarming er proporsjonal med differansen mellom basistemperaturen, som kan tolkes som utetemperaturen når oppvarmingsbehovet begynner, og utetemperaturen.

Dersom det avdekkes betydelige eller systematiske avvik for en eller flere energiposter ved sammenligning av referanseberegningen og målt energiforbruk må de undersøkes nærmere. Da stilles spørsmål ved alle driftsforhold som påvirker energiposten(e) med avvikende forbruk i håp om å få en forståelse for hva som forårsaker avviket.

### 2.1.3 Standard NS 3031:2014

Både SINTEF Fag sin rapport og SN/TR 3069:2019 henviser til NS 3031:2014, *Beregning av bygningers energiytelse – Metode og data*. 1.februar 2018 ble NS 3031:2014 tilbaketrasket og erstattet av en ny felles europeisk standard NS-EN ISO 52000-1:2017. Likevel informerer Standard Norge på deres nettside at selv om NS 3031:2014 er tilbaketrasket skal den benyttes inntil videre ved kontroll opp mot TEK 17 (Byggeforskriftene), Energimerkeordningen, BREEAM NOR og passivhusstandardene NS 3700:2013 og NS 3701:2012 (Standard Norge, 2014).

## 2.2 utfordringer rundt formålsdelt etterprøving av energibruk på Bryne vgs.

Målerstrukturen på Bryne vgs. er ikke fullstendig kompatibel med inndeling av energiforbruket i energiposter. I praksis er det derfor utfordrende med formålsdelt etterprøving av energiforbruk på energipostnivå. I energioppfølgingsystemet finnes maler for gruppering av kurser og energimålere som er tatt i bruk som utgangspunkt i oppgaven. Følgende energiforbruk kunne derimot ikke inndeles på energipostnivå:

- **Bygg A:** Energiforbruket til 3b pumper og 5 teknisk utstyr måles sammenlagt og det er ikke tilgjengelig målinger for energiforbruk til 6b ventilasjonskjøling og 6a romkjøling.
- **Bygg B:** Energiforbruket til 3b pumper og 5 teknisk utstyr måles sammenlagt og det er ikke tilgjengelig målinger for energiforbruk til 6a romkjøling.
- **Bygg C:** Energiforbruket til 3b pumper, belysning, 5 teknisk utstyr i teknisk rom og vifter måles sammenlagt.

Bygg A og B, og bygg C er prosjektert av ulike selskap, som kan være årsaken til ulikheter i kursinndeling. Basert på punktene gitt over ekskluderes energiforbruk til romkjøling og teknisk utstyr i etterprøvingen av brutto energibruk. Brutto energiforbruk til pumper beregnes basert på målt momentant effektforbruk.

## 2.3 Informasjons- og datainnsamling

Til arbeidet med prosjekt- og masteroppgaven er det gitt tilgang til fylkeskommunens dokumentasjon for forvaltning, drift og vedlikehold (FDV). Funksjonsbeskrivelser, produktinformasjon, informasjon om innregulering o.l. er hentet ut. Det er også bevilget tilgang til skolens energioppfølgingsystem (EOS) og sentraldriftsovervåkningsanlegg (SD-anlegg). I EOS overvåkes energieffektiviteten til anlegget, og fra EOS er det eksportert tilgjengelig data for energiforbruket i Excel-fil. I SD-anlegget styres, reguleres og overvåkes det automatiserte energisystemet, og fra SD-anlegget er data for relevante målte parametere i energisystemet eksportert i Excel-fil eller CSV-fil. Både for EOS og SD-anlegget er det mulig å hente ut data for målinger logget helt tilbake til driftsstart.



All informasjon og data relatert til prosjektering og dimensjonering av energisystemet er delt av Sweco, hvor flere ansatte har bistått med veiledende samtaler. På befaring ved Bryne vgs. og samtaler over telefon har skolens driftstekniker bidratt med informasjon om hvordan skolen driftes per dags dato.

Prinsippkissene i masteroppgaven er forenklete representasjoner av energisystemet basert på flytskjema produsert av DNF AS (bygg A og B) og VB Teknisk AS (bygg C). Flytskjema er vedlagt i Vedlegg A. Prinsippkissene inkluderer ikke komponenter som manuelle ventiler og system for ekspansjon og vannbehandling. Det brukes samme ID på komponentene som det gitt i SD-anlegget.

## 2.4 Feilkilder og databehandling

All databehandling og visuell fremstilling av data er utført i matematikkverktøyet Matlab. Det er hovedsakelig gjennomført enkle numeriske beregninger.

### 2.4.1 Håndtering av feilmålinger

Feilmålinger er en realitet og det må kontinuerlig vurderes om dataen som brukes er realistisk. I data fra EOS er det for et fåtall måneder oppdaget urealistisk energiforbruk. For å korrigere for nevnt feilmålinger er det valgt å erstatte den urealistiske månedsverdien med middelverdien av energiforbruket måneden før og måneden etter. Ved sammenligning med energiforbruk for tidligere år fremstod dette som gode estimater.

I data fra SD-anlegget er det identifisert flere urealistiske målinger for flere av måleenhetene. Målinger som er åpenbare vill observasjoner (outliers) er fjernet under databehandling i Matlab og erstattet med den aktuelle målerens forrige målte verdi dersom det ansees som et godt estimat.

## 2.4.2 Metode ved manglende data

Ved gjennomføring av delmål 1 var det i utgangspunktet tenkt å kun benytte data fra EOS for etterprøvingen av skolens energiforbruk på energipostnivå. For bygg A og B var komplette data for energiforbruket til rom – og ventilasjonsoppvarming tilgjengelig å eksportere fra EOS, men ikke for bygg C. For å beregne det manglende energiforbruket ble det derfor utarbeidet et Matlab-script hvor målt momentanverdier av effektforbruket summeres, og i tidsperioden mellom hver logget måling hvor det ikke er registrert noe endring er effektforbruket identisk som ved forrige logging. Scriptet er vedlagt i Vedlegg B.

Ved gjennomføring av delmål 2 var det tenkt å vurdere energibalansen i energibrønnene ved å se på energien hentet fra og tilført til energibrønnene for oppladning. Energimåler 350.01 - OE01 (se Figur 9) differensierer ikke mellom energi hentet fra brønnene og energi tilført brønnene. Det er utarbeidet et Matlab-script vedlagt i Vedlegg C, hvor energien tilført og hentet fra energibrønnene er beregnet basert på følgende formel:

$$P = \dot{m} \cdot c_{\text{væske}} \cdot dT \quad (1)$$

$\dot{m}$  er kollektorvæskens massestrøm [kg/s],  $c_{\text{væske}}$  er kollektorvæskens spesifikke varmekapasitet [J/kgK] og  $dT$  er temperaturdifferansen [°C] mellom tur- og returvæsken til energibrønnene. Informasjon om egenskapene til kollektorvæsken er hentet fra beskrivelse av brønnene utført av Asplan Viak AS (2012b).

For å vurdere nøyaktigheten til de to metodene er det gjort beregninger for en vilkårlig energimåler i energisystemet, energimåler 320.01 – OE05 (se Figur 9), som måler varmeeffekten levert av varmepumpene og som har tilgjengelige målinger for energiforbruket i EOS. I kvalitetssjekken er kollektorvæskens egenskaper erstattet med egenskapene til vann. Tabell 3 presenterer avvik for beregningsmetode brukt i delmål 1, og Tabell 4 presenterer avvik for beregningsmetode brukt i delmål 2.

Tabell 3. Avvik for beregningsmetoden brukt ved gjennomføring av delmål 1.

ID	Periode (aug. – juli)	EOS [kWh]	Matlab [kWh]	Avvik [%]
320.01 - OE05	2018-2019	878867	876690	-0,25
320.01 - OE05	2017-2018	982244	982830	0,06
320.01 - OE05	2016-2017	650792	645200	-0,86
320.01 - OE05	2015-2016	568166	565720	-0,43

Tabell 4. Avvik for beregningsmetoden brukt ved gjennomføring av delmål 2.

ID	Periode (aug. – juli)	EOS [kWh]	Matlab [kWh]			Avvik [%]
			Uttak	Tilbakeledning	Sum	
320.01 - OE05	2018-2019	878867	888580	209	888789	1,13
320.01 - OE05	2017-2018	982244	994500	723	995223	1,32
320.01 - OE05	2016-2017	650792	655080	139	655219	0,68
320.01 - OE05	2015-2016	568166	575880	40	575920	1,36

Hva som er årsaken til at det måles noe tilbakeledning av energimåler 320.01 - OE05 er uvisst. Størst registrert avvik er – 0,86% for beregningsmetoden brukt i delmål 1 og 1,36% for beregningsmetoden brukt i delmål 2. Metodene ansees dermed å produsere gode nok estimater for formålet i masteroppgaven.

## 2.5 Beregningsverktøyet CoolPack

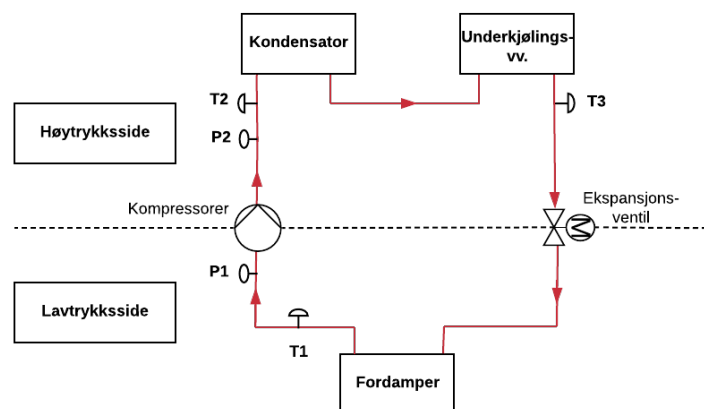
Beregningsverktøyet CoolPack er en samling av simuleringsmodeller til kjøleanlegg, og er utviklet på Institutt for Mekanikk, Energi og Konstruksjon (MEK) på Danmarks Tekniske Universitet. Beregningsverktøyet er gratis og kan lastes ned fra nettsiden IPU.dk. CoolPack er benyttet i masteroppgaven til å estimere effektfaktoren til en forenklet modell av varmpumpeanlegget ved ulike driftsforhold ved fremstilling av prosessforløpet i et trykk-entalpi-diagram (log ph-diagram) i simuleringsmodellen *Refrigeration Utilities*.

Effektfaktor (COP) beskriver forholdet mellom en varmepumpes avgitte effekt i varme og tilførte effekt, og beregnes ved bruk av følgende formel (Stene, 2018a):

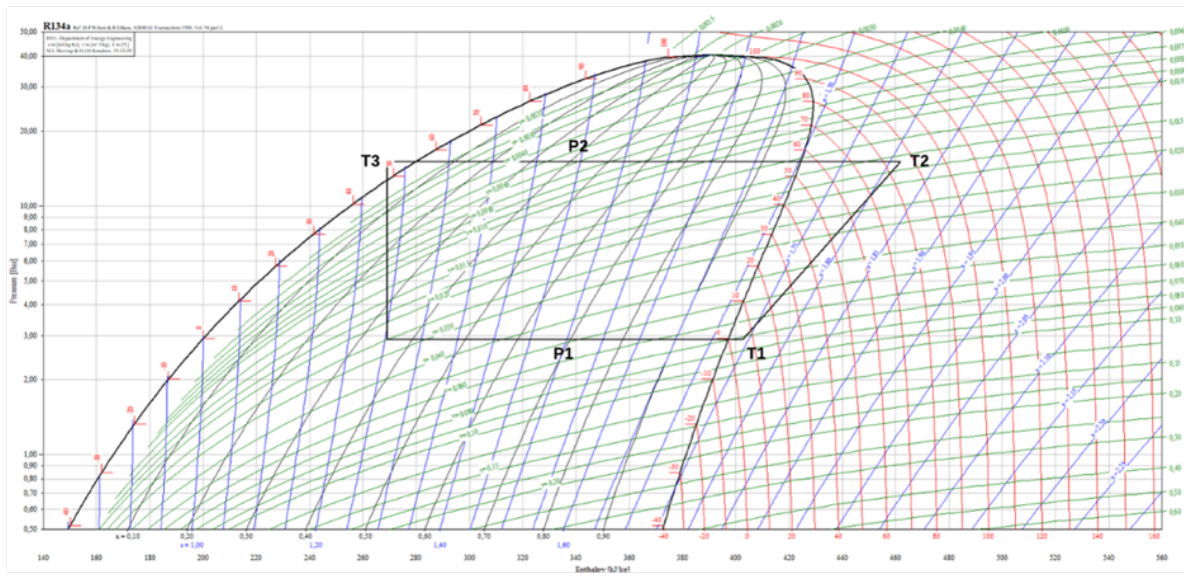
$$\text{COP} = \frac{m_R \cdot (h_1 - h_4)}{m_R \cdot (h_2 - h_3)} = \frac{Q_K}{E} \quad (2)$$

$m_R$  betegner arbeidsmediets massestrøm [kg/s] og  $h_1, h_2, h_3$  og  $h_4$  betegner arbeidsmediets spesifikke entalpi før og etter kompressorer, og før og etter ekspansjonsventil [kJ/kg].  $Q_K$  [kW] betegner avgitt varmeeffekt fra kondensator pluss eventuell overhetnings- og/eller underkjølingsvarmeveksler, og  $E$  [kW] betegner tilført elektrisk effekt for drift av varmepumpen. I masteroppgaven antas det at målinger for tilført elektrisk effekt til varmepumpene funnet i SD-anlegget kun er målt effektforbruk til kompressorarbeid.

Figur 3 presenterer den forenklete varmepumpemodellen benyttet ved estimering av COP ved ulike driftsforhold i CoolPack. Ytterligere beskrivelse av den forenklete modellen, bakgrunnen for den forenklete modellen og forutsetninger tatt ved estimering av COP gis i kapittel 4.2.4. I figuren betegner  $T_1, T_2$  og  $T_3$  henholdsvis temperaturen på arbeidsmediet etter fordampere, etter kompressorer og før ekspansjonsventil. Trykk  $P_1$  og  $P_2$  betegner trykket på lavtrykk- og høytrykkssiden. I Figur 4 er prosessforløpet til varmepumpemodellen fremstilt i log ph- diagram for arbeidsmediet R134a i CoolPack ved driftsbetingelsene gitt i Vedlegg D.



Figur 3. Forenklet varmepumpemodell brukt til estimering av COP i beregningsverktøyet CoolPack.



Figur 4. Fremstilt prosessforløp i log ph-diagram for den forenklede varmpumpemodellen med driftsbetingelser gitt i Vedlegg D.



### 3 Energisystemet på Bryne vgs.

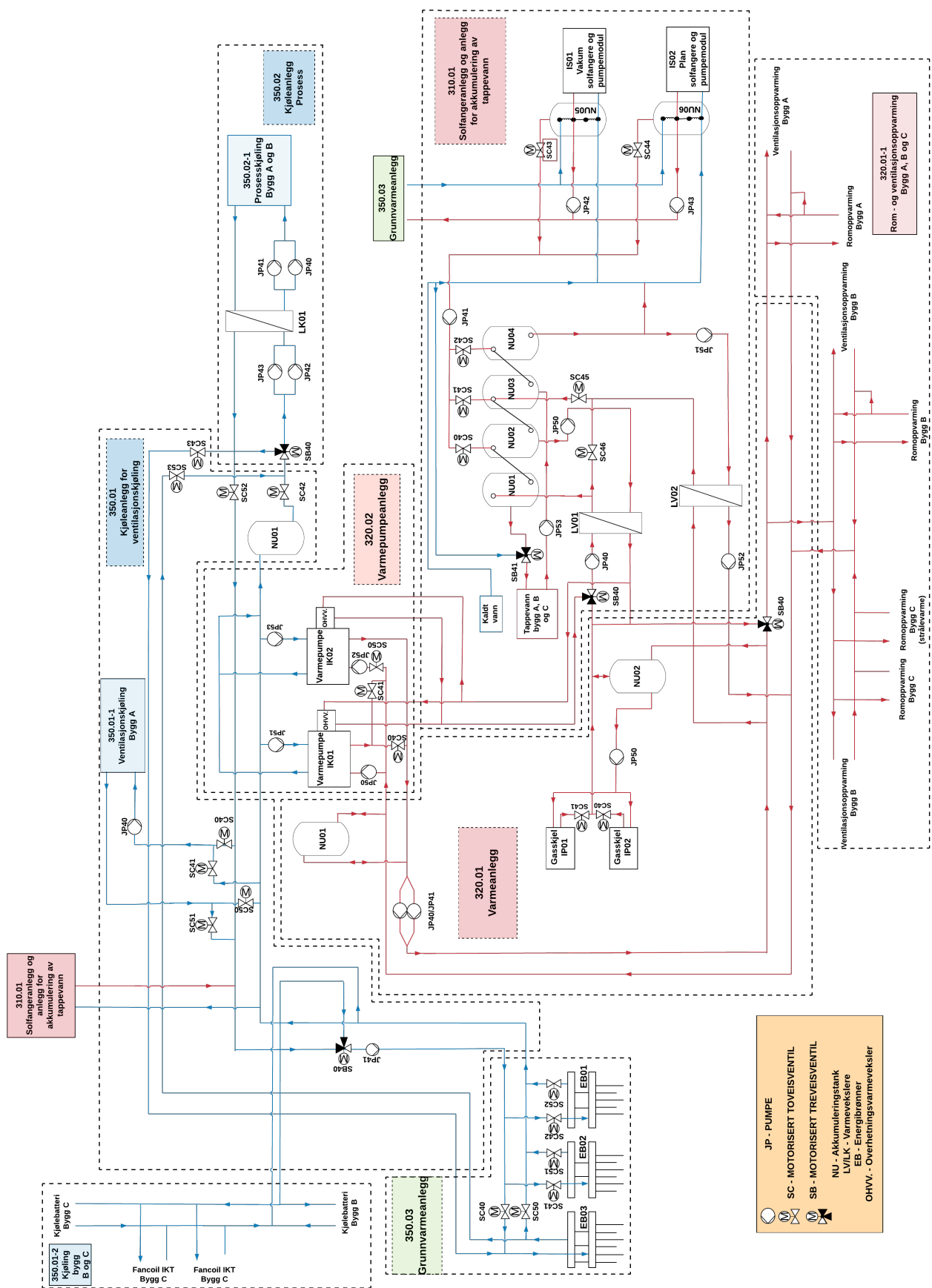
I følgende kapittel presenteres energisystemet på Bryne vgs. Først gis en tabellisert oppsummerende beskrivelse av energisystemet, etterfulgt av kort utfyllende informasjon om grunnvarme – og varmepumpeanlegget. Deretter vil instrumentering og relevante målepunkter i energisystemet presenteres.

#### 3.1 Oppsummerende beskrivelse av energisystemet

Energisystemet er inndelt i seks ulike delsystem med tilhørende distribusjonssystem, som er listet opp i Tabell 5. Energisystemet er komplekst og intrikat, og en prinsippskisse av energisystemet er vist i Figur 5. I prinsippskissen representerer de stiplede linjene systemgrensene for de seks ulike delsystemene som energisystemet er oppdelt i, og de heltrukne linjene representerer den energibærende væsketransporten mellom delsystemene. I Tabell 6 gis en oppsummerende beskrivelse av de seks delsystemene energisystemet er oppdelt i, deres hovedkomponenter og tilhørende distribusjonssystem.

Tabell 5. Oversikt over energisystemets ulike delsystem.

Delsystem ID	Beskrivelse
350.03	Grunnvarmanlegg
310.01	Solfangeranlegg og anlegg for akkumulering av tappevann
320.02	Varmepumpeanlegg
320.01	Varmeanlegg (inkl. varmedistribusjonssystem 320.01-1)
350.01	Kjøleanlegg for ventilasjonskjøling (inkl. kjøledistribusjonssystem 350.01-01/02)
350.02	Kjøleanlegg for prosesskjøling (inkl. kjøledistribusjonssystem 350.02-01)



Figur 5. Prinsippskisse av energisystemet ved Bryne vgs. (Tjøtta, 2019).



Tabell 6. Oppsummering av relevant informasjon om delsystemene og komponentene som inngår (Tjøtta, 2019).

ID	Komponent	Beskrivelse og funksjon
<b>350.03 Grunnvarmeanlegg</b>		
EB01 EB02 EB03	Energibrønner	<p><b>Beskrivelse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 33 vertikale energibrønner. Opprinnelig 34, men brønn nr. 7 er defekt.</li> <li>- Brønnene er fordelt på tre samlestocker – EB01/02/03.</li> <li>- 200m lengde.</li> <li>- Kollektorvæske: Propylenglykol 30 volum %.</li> </ul> <p><b>Funksjon:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- EB01 og EB02 benyttes til frikjøling og for varmeuttak til varmpumper.</li> <li>- EB03 brukes enten sammen med EB01 og EB02, eller prioriteres til prosesskjøling.</li> </ul>
<b>310.01 Solfangeranlegg og anlegg for akkumulering av tappevann</b>		
IS01 IS02	Solfangere	<p><b>Beskrivelse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 43,3 m<sup>2</sup> vakumrørsolfangere (IS01).</li> <li>- 42,4 m<sup>2</sup> plansolfangere (IS02).</li> </ul> <p><b>Funksjon:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Forvarming av varmt forbruksvann, dekningsgrad 10%.</li> <li>- Resterende solvarme tilbakeføres til energibrønnene.</li> </ul>
NU05 NU06	Akkumuleringstanker	<p><b>Beskrivelse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2x 2000 liter.</li> </ul> <p><b>Funksjon:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Varmeakkumulering av solvarme.</li> </ul>
NU01 NU02 NU03 NU04	Akkumuleringstanker	<p><b>Beskrivelse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 4x 1000 liter.</li> </ul> <p><b>Funksjon:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Varmeakkumulering av tappevann.</li> </ul>
LV01 LV02	Varmevekslere	<p><b>Beskrivelse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Motstrøms platevarmevekslere.</li> </ul> <p><b>Funksjon:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-LV01 veksler varme fra gasskjeler og kondensatorvarme fra varmpumper til ettervarming av tappevann.</li> <li>-LV02 veksler kondensatorvarme fra varmpumper til forvarming av tappevann.</li> </ul>

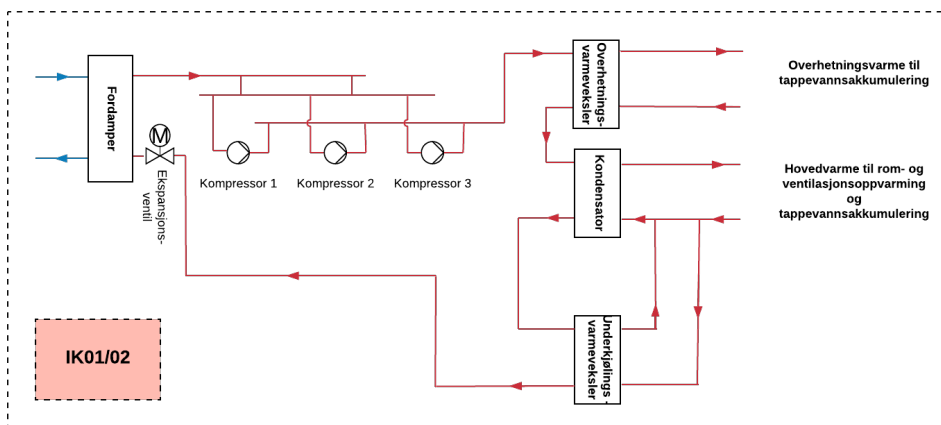
320.02 Varmepumpeanlegg		
IK01 IK02	Varmepumper	<p><b>Beskrivelse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- To identiske væske til væske 175 kW varmpumpeenheter med grunnvarme som energikilde.</li> <li>- Arbeidsmedie: R134a.</li> <li>- Hver enhet består av tre parallellkoblede stempelkompressorer med på/av-regulering.</li> <li>- Hver enhet har overhetnings - og underkjølingsvarmeveksler.</li> <li>- Dimensjonerende tur- og returtemperatur: 3°C/-1°C</li> </ul> <p><b>Funksjon:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Forsyner varme til rom- og ventilasjonsoppvarming av bygg A, B og C.</li> <li>- Forsyner varme til forvarming og ettervarming av tappevann.</li> </ul>
320.01 Varmeanlegg		
NU01	Akkumuleringstank	<p><b>Beskrivelse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2000 liter.</li> </ul> <p><b>Funksjon:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Varmeakkumulering for varmpumpene.</li> <li>- Sikrer nok vann til varmpumpene.</li> </ul>
IP01 IP02	Gasskjeler	<p><b>Beskrivelse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- To gasskjeler med biogass som energikilde på henholdsvis 190 kW (IP01) og 470 kW (IP02).</li> </ul> <p><b>Funksjon:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dekker spisslasten ved Bryne vgs.</li> </ul>
NU02	Akkumuleringstanker	<p><b>Beskrivelse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2000 liter.</li> </ul> <p><b>Funksjon:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Varmeakkumulering for gasskjelene.</li> <li>- Sikrer nok vann til gasskjelene.</li> </ul>
System	Formål	Forklaring
Varmedistribusjonssystem		
320.01-1	Distribusjonssystem for rom- og ventilasjonsoppvarming bygg A, B og C	- Varme fra varmpumper og gasskjeler distribueres til bygg A, B og C for rom- og ventilasjonsoppvarming.
ID	Komponent	Beskrivelse og funksjon
350.01-02 Kjøleanlegg		
NU01	Akkumuleringstank	<p><b>Beskrivelse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1000 liter.</li> </ul>

		<b>Funksjon:</b> - Lagring av kjøling fra fordamperkretsen til varmpumpene
<b>LK01</b>	Varmeveksler	<b>Beskrivelse:</b> - Motstrøms platevarmeveksler. <b>Funksjon:</b> - Veksler enten kjøling fra isvannet fra fordampertløpet eller kollektorvæsken fra energibrønnene til kjøleanlegg for prosesskjøling.
<b>System</b>	<b>Formål</b>	<b>Forklaring</b>
<b>Kjøledistribusjonssystem</b>		
<b>350.01-1</b>	Distribusjonssystem for ventilasjonskjøling i bygg A og varmeopptak i avkastbatteri.	- Til kjøling i bygg A brukes vanligvis en blanding av returvæske fra prosesskjøling og isvann. - Returvæsken fra ventilasjonskjølingen blandes vanligvis med kollektorvæsken fra energibrønnene før innløpet til fordampene i varmpumpene. - Aggregat 360.01-04 er utstyrt med avkastbatteri for at overskuddsvarme skal tilbakeføres til brønnene utenfor aggregatenes driftstid.  - Dimensjonerende tur- og returtemperatur: 12°C/17°C
<b>350.01-2</b>	Ventilasjonskjøling i bygg B og C	- Frikjøling med kollektorvæsken fra energibrønnene.  - Dimensjonerende tur- og returtemperatur: 12°C/17°C
<b>350.02</b>	Prosesskjøling i bygg A og B	- Kjøling av spesialrom. - Isvann fra varmpumper eller kollektorvæske fra energibrønner reduserer temperaturen til turvannet til prosesskjøling som brukes i lokale kjølemaskiner.  - Dimensjonerende tur- og returtemperatur: 10°C/16°C

### 3.2 Grunnvarme – og varmpumpeanlegg

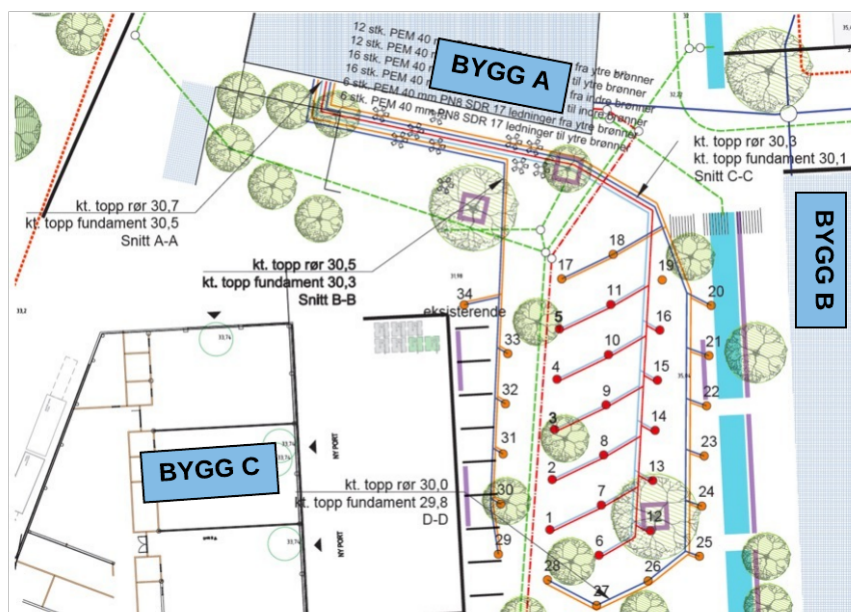
Grunnvarme - og varmpumpeanlegget er sentrale deler av energisystemet. Figur 6 presenterer en prinsippsskisse av de to identiske varmpumpeenhetene som er levert av det finske selskapet Oilon Scancool. Størrelsen på varmebehovet avgjør om både IK01 og/eller IK02 driftes, og antall kompressorer som kjøres. Det er ønsket at ved lavt varmebehov skal det veksles regelmessig mellom drift av IK01 og IK02, slik at ingen av varmpumpene står ubrukt over lenger tid. En akkumuleringstank sikrer nok vann til varmpumpene.

Prinsippskissen er en forenklet fremstilling av varmpumpeenhetenes oppbygning, basert på illustrasjoner i SD-anlegget vedlagt i Vedlegg E.



Figur 6. Prinsippskisse av de to identiske varmepumpeenhetene IK01 og IK02 (Tjøtta, 2019).

Grunnvarmeanlegget har blitt analysert og dimensjonert av Asplan Viak AS, og er utformet som et balansert borehullsbasert energilager der overskuddsvarme hovedsakelig fra solfangere og avkastvarme fra ventilasjonsanlegg skal sesonglagres fra sommer til vinter. Avstanden mellom brønnene er ca. 7 m (Asplan Viak AS, 2012b). Energibrønnene er utført i et sekskantmønster og er fordelt på tre samlestokker, med en indre kjerne bestående av brønnummer 1-16 (EB01) og de ytre resterende brønner bestående av brønnummer 17- 28 (EB02) og 29-34 (EB03). Figur 7 viser et illustrasjonsfoto av sekskantformasjonen til energibrønnene og plasseringen til de ulike samlestokkene.

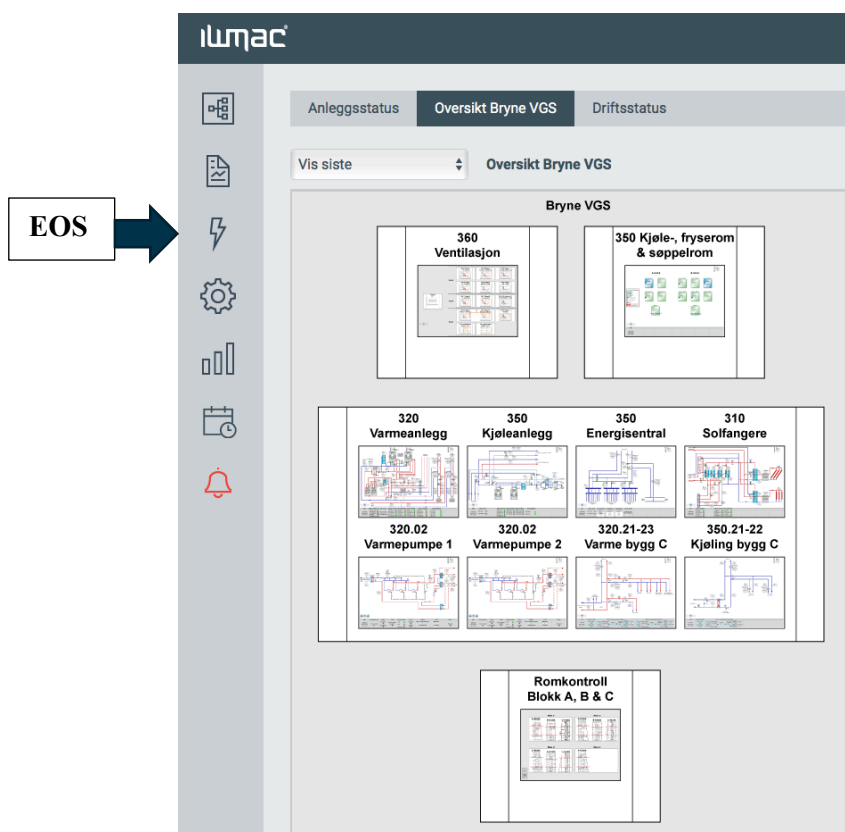


Figur 7. Illustrasjonsbilde av sekskantformasjonen til energibrønnene og de ulike samlestokkene (Asplan Viak AS, 2012b).

### 3.3 Instrumentering og målepunkt

Det er installert et betydelig antall følere, sensorer o.l. (måleinstrumenter) i energisystemet og i følgende delkapittel vil det bli beskrevet hva som er installert. En prinsippskisse av hele energisystemet inkludert måleutstyr utover energimålere er svært detaljert. Relevant måleutstyr er derfor inkludert i prinsippskissene presentert med resultatene i kapittel 4. I Vedlegg F gis en oversikt over målenøyaktigheten til relevante måleinstrumenter.

Det brukes ett dataprogram for å konfigurere og overvåke energisystemet og dets ytelse, toppsystemet IWMAC, et web-basert kombinert EOS og SD-anlegg. I EOS overvåkes energieffektiviteten til anlegget og i SD-anlegget styres, reguleres og overvåkes det automatiserte energisystemet for å sikre god driftsøkonomi. I IWMAC finner man en visuell oversikt over energisystemet som er vist i Figur 8.



Figur 8. Utsnitt fra IWMAC, Bryne vgs. sitt EOS og SD-anlegg.

Mengden installerte måleinstrumenter varierer stort fra bygg til bygg, og kost / nytte aspekter står sentralt når det velges nivå av integrasjon av måleinstrumenter i et energisystem. Tabell 7 presenterer de mest sentrale måleinstrumenter i energisystemet og deres tilgjengelige måleenheter. Måleenheter for internverdier i varmepumpen er også av interesse i dybdeanalysen, og er presentert i Tabell 8. Trykkmålinger i varmepumpen er i relativt trykk bar(g), og ikke absolutt trykk bar(a) hvor atmosfærisk trykk er inkludert. Derfor adderes 1 bar på den avleste bar(g) verdien for å få absolutt trykk.

Tabell 7. Måleenheter i energisentralen.

ID	Beskrivelse	Enhet
<b>Temperaturføler</b>		
RT <sub>1</sub>	Turtemperatur	°C
RT <sub>2</sub>	Returtemperatur	°C
<b>Trykk giver</b>		
PT <sub>1</sub>	Turtrykk	bar
PT <sub>2</sub>	Returtrykk	bar
<b>Energimåler</b>		
OE	Effekt	kW
OE <sub>T1</sub>	Turtemperatur	°C
OE <sub>T2</sub>	Returtemperatur	°C
OE <sub>V</sub>	Volumstrøm	m <sup>3</sup> /h
<b>Pumpe</b>		
JP <sub>D</sub>	Drift	Av/på
JP <sub>P</sub>	Pådrag	%
JP <sub>E</sub>	Effektforbruk	W
<b>Motoriserte ventiler</b>		
SB	Ventilåpning	%
SC	Ventilposisjon	Åpen/stengt

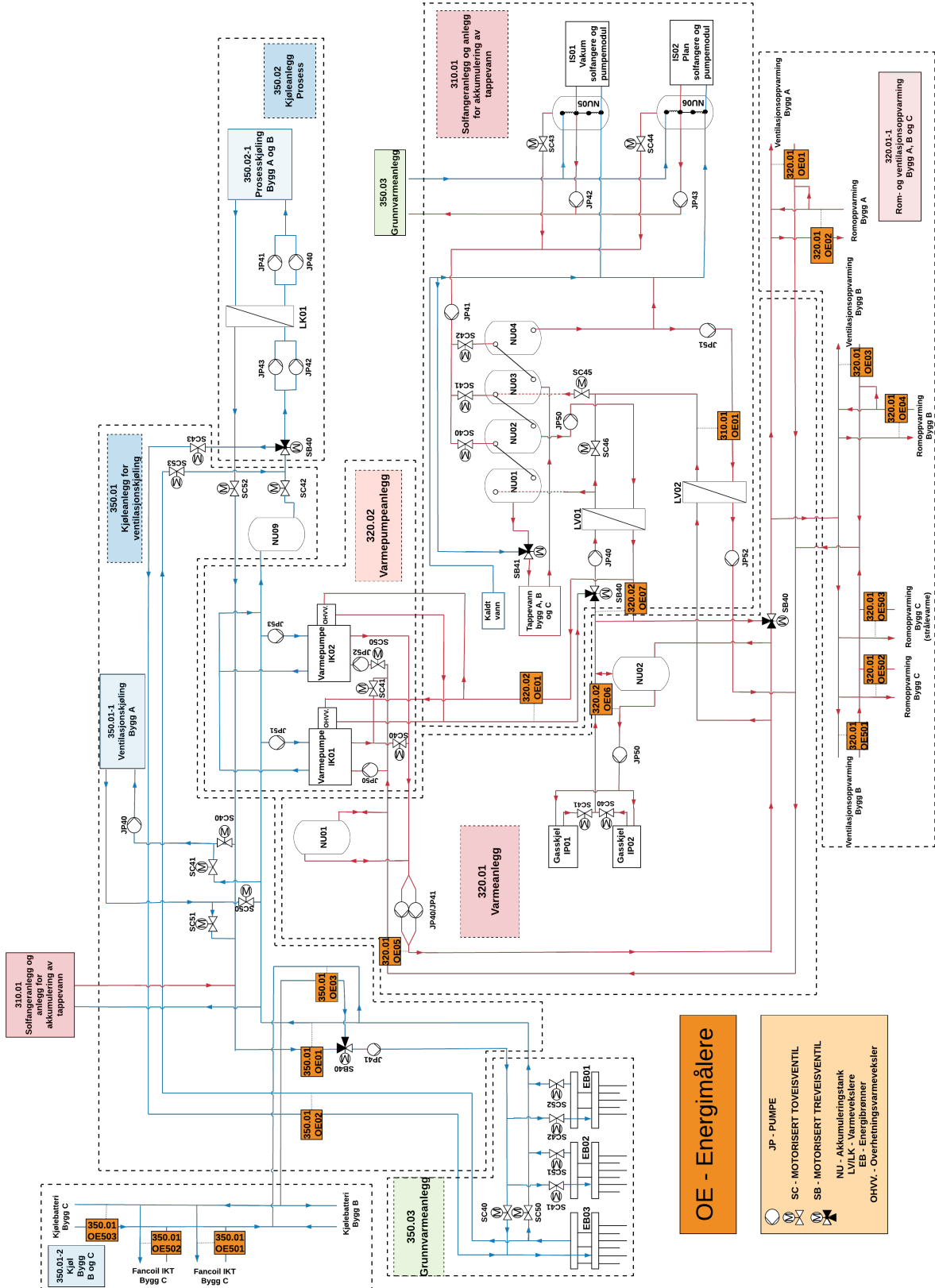
Tabell 8. Interne måleenheter i varmepumpene.

ID	Beskrivelse	Enhet
T	Temperatur	°C
P	Trykk	Bar
$\eta$	Kompressoreffektivitet	%
Q <sub>VP</sub>	Produsert varmeeffekt	kW
E <sub>VP</sub>	Effektforbruk til kompressorer	kW

Tabell 9 presenterer en oversikt over energimålerne i energisystemet og hva som måles. Energimålerne gjør målinger av volumstrøm og temperatur på tur- og returvæsken, og beregner deretter termisk effekt og totalt energiforbruk på bakgrunn av målingene. Data for totalt målt energiforbruk eksportert fra EOS anlegget og måledata for de resterende parameterne hentes fra SD-anlegget. Energimålerne er av typen Kamstrup Multical ® 603, kombinert med volumstrømmåler Kamstrup Ultraflow ® 54 og temperaturføler Micro Matic PT1000. Foruten i delsystem 350.01 hvor det sirkulerer kollektorvæske (propylenglykol 30 %) og det derfor benyttes volumstrømmåler av typen MWN Nubis. Plasseringen til de ulike energimålerne er presentert i Figur 9.

Tabell 9. Oversikt over energimålerne i energisystemet.

Delsystem	Energimåler ID	Beskrivelse
310.01	OE01	Kondensatorvarme vekslet via LV02 til forvarming av tappevann
320.01-1	OE01	Energi til ventilasjonsoppvarming i bygg A
320.01-1	OE02	Energi til romoppvarming i bygg A
320.01-1	OE03	Energi til ventilasjonsoppvarming i bygg B
320.01-1	OE04	Energi til romoppvarming i bygg B
320.01	OE05	Energi fra varmpumpenes kondensatorer
320.01	OE06	Energi fra gasskjeler
320.01	OE07	Energi fra gasskjeler veksler via LV01 til ettervarming av tappevann
320.01-1	OE501	Energi til ventilasjonsoppvarming i bygg C
320.01-1	OE502	Energi til romoppvarming i bygg C
320.01-1	OE503	Energi til romoppvarming i verksted i bygg C
320.02	OE01	Energi fra varmpumpenes overhetningsvarmevekslere
350.01-1	OE01	Energiuttak og tilbakeføring av energi fra til EB01/02/(03)
350.01-1	OE02	Frikjøling fra brønn EB03 til prosesskjøling
350.01-1	OE03	Frikjøling til bygg B og C
350.01-2	OE501	Frikjøling til fancoil rom C.2.121 i bygg C
350.01-2	OE502	Frikjøling til fancoil rom C.2.105 i bygg C
350.01-2	OE503	Frikjøling til kjølebatteri ventilasjonsaggregat i bygg C



Figur 9. Prinsippskisse av energisystemet med oversikt over plassering av energimålere (Tjøtta, 2019).



## 4 Resultater og diskusjon

I følgende kapittel er resultater fra gjennomføring av delmål 1, 2 og 3 presentert. Kapittelet er oppdelt i følgende to hoveddeler:

### **Del 1: Formålsdelt etterprøving av energibruk**

Del 1 presenterer resultater og diskusjon gjeldende for delmål 1, og er strukturert på følgende måte:

- Prosjekterte verdier for netto energibruk og levert energi
- Etterprøving av brutto energibruk
- Etterprøving av levert energi
- Diskusjon

### **Del 2: Kartlegging av driftstekniske egenskaper og energisystemets ytelse**

Del 2 presenterer resultater og diskusjon gjeldende for delmål 2 og delmål 3. De første fem delkapitlene gjelder kartlegging av forhold relatert til varmeproduksjon i energisentralen og romoppvarming:

1. Energisystemets varmeytelse
2. Varmepumpenes gjennomsnittlige effektfaktor – SCOP
3. Temperatursettpunkt i energisentralen og i romoppvarmingskretser
4. Endring i varmpumpenes COP grunnet bypass i bygg A og B
5. Temperatursettpunkt på romnivå for romoppvarming

De neste fem delkapitlene gjelder kartlegging av forhold relatert til energibrønnene:

6. Strategi for tilbakelading av energibrønnene
7. Energibalansen i energibrønnene
8. Temperaturutvikling i energibrønnene
9. Volumstrøm i energibrønnene
10. Reguleringsstrategi for bruk av samlestock EB03 til prosesskjøling

Alt av resultat presentert i kapittelet gjelder for driftsåret 01.08.2018 – 31.07.2019, dersom ikke annet er spesifisert.

## 4.1 Del 1: Formålsdelt etterprøving av energibruk

I følgende kapittel er målt brutto energiforbruk og levert energi sammenlignet med verdier fra prosjekteringsunderlaget.

### 4.1.1 Prosjekterte verdier for netto energibruk og levert energi

Prosjekterte verdier presentert i følgende delkapittel er hentet fra energisimuleringer (årssimulering) gjort i det dynamiske simuleringsprogrammet Simien. Energisimuleringer for bygg A og B er utført av DNF AS, og er for bygg C utført av Multiconsult Norge AS.

Utvalgte deler av energiberegningene kan finnes i Vedlegg G. I en årssimulering i Simien benyttes lokal klimadata og ofte byggets reelle driftsbetingelser ved driftsstart. Det produseres en rapport med byggets forventet forbruk og energiytelse, i tillegg kan man hente ut en oversikt over timesverdier for varme- og kjøleeffektbehov. Simien er et simuleringsprogram med høy kompleksitet og det foreligger usikkerheter relatert til både inndata og beregningene. Disse usikkerhetene går ikke inn på i denne masteroppgaven.

Både bygg A, B og C tilfredsstiller energikrav og minstekrav til bygningskroppen gitt i byggteknisk forskrift (TEK10). Bygg C tilfredsstiller også krav for sertifisering som lavenergibygg gitt i NS 3701:2012. Tabell 10 presenterer en oversikt over de ulike varme- og kjølebehovene ved skolen.

Tabell 10. Oversikt over skolens varme- og kjølebehov.

Varmebehov:	Kjølebehov:
Oppvarming av tappevann	Ventilasjonskjøling
Romoppvarming	Kjøling av spesialrom (prosesskjøling)
Ventilasjonsoppvarming	
Oppladning av energibrønner	

Tabell 11 presenterer prosjektert netto energibehov og Tabell 12 presenterer prosjektert levert energi for bygg A og B, bygg C og totalt. Følgende punkter gir en oversikt over de ulike energikildenes prosjekterte dekningsgrad av varme- og kjølebehovene;

- Varmepumpene er planlagt å dekke 90% av energibehovet til rom- og ventilasjonsoppvarming og 60% av energibehovet til oppvarming av tappevann.
- Gasskjelen er planlagt å dekke 10% av energibehovet til rom- og ventilasjonsoppvarming og 30% av energibehovet til oppvarming av tappevann.
- Solfangerne er planlagt å dekke 10% av energibehovet til oppvarming av tappevann, og resterende energi tilbakeføres til energibrønnene.
- Proseskjøling dekkes 100% av direkte elektrisitet.
- Ventilasjonsskjøling dekkes av direkte kjøling fra energibrønnene (frikjøling).

Tabell 11. Prosjektert netto energibehov hentet fra energiberegninger i Simien vedlagt i Vedlegg G.

Energipost	Prosjektert netto energibehov [kWh/år]			
	Bygg A	Bygg B	Bygg C	Totalt
1a Romoppvarming	134328	69178	94518	298024
1b Ventilasjonsoppvarming	29032	11373	59970	100375
Tappevannsoppvarming	125475	53964	87840	267279
Vifter	114770	47011	141982	303763
3 Pumper	12661	5445	4001	22107
4 Belysning	241049	103670	192630	537349
5 Teknisk utstyr	242145	104142	115579	461866
6a Romkjøling	0	0	0	0
6b Ventilasjonsskjøling	19683	8 008	0	27691
<b>Sum</b>	<b>919143</b>	<b>402791</b>	<b>696520</b>	<b>2018454</b>

Tabell 12. Prosjektert levert energi hentet fra energiberegninger i Simien vedlagt i Vedlegg G.

Energipost	Prosjektert levert energi [kWh/år]		
	Bygg A og B	Bygg C	Totalt
Elektrisk energi	1033920	453692	1487621
Gass	101002	44686	145688
<b>Sum</b>	<b>1134931</b>	<b>430767</b>	<b>1633309</b>

#### 4.1.2 Formålsdelt etterprøving av brutto energibruk

For sammenligning av prosjektert og målt energibruk er prosjektert netto energibehov korrigert til brutto energibehov, og presentert i Tabell 13. Se Vedlegg H for fremgangsmåte. Væravhengig målt brutto energiforbruk for perioden 01.08.2018 – 31.07.2019 er korrigert for klimavariasjoner. Se Vedlegg I for fremgangsmåte og beregnet korreksjonsfaktorer.

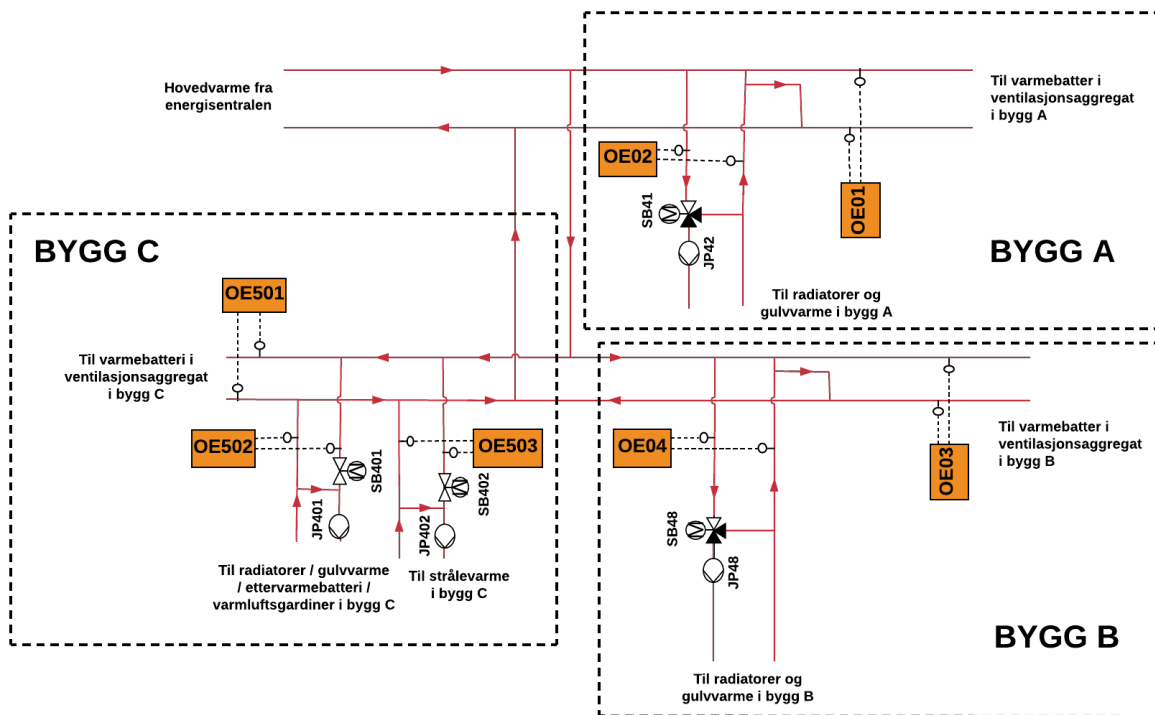
Tabell 13. Prosjektert brutto energibehov per energipost.

Energipost	Prosjektert brutto energibehov [kWh/år]			
	Bygg A	Bygg B	Bygg C	Totalt
1a Romoppvarming	152178	78371	107078	337627
1b Ventilasjonsoppvarming	31840	12473	65771	110084
Tappevannsoppvarming	209125	89940	146400	445465
Vifter	114770	47011	141982	303763
3 Pumper	12661	5445	4 001	22107
4 Belysning	241049	103670	192630	537349
5 Teknisk utstyr	242145	104142	115579	461866
6a Romkjøling	0	0	0	0
6b Ventilasjonskjøling	19683	8008	0	27691
<b>Sum</b>	<b>1023451</b>	<b>449060</b>	<b>773441</b>	<b>2245952</b>

##### 4.1.2.1 Energibruk til rom – og ventilasjonsoppvarming

Figur 10 er en forenklet prinsippsskisse av de separate kretsene for rom- og ventilasjonsoppvarming i bygg A, B og C, inkludert energimålere. I Tabell 14 gis en oversikt over hvilke energimålere som inngår i hvilken energipost.

Til romoppvarming brukes hovedsakelig radiatorer under alle vinduer i skolebygningen, ellers brukes radiatorer/konvektorer i gulv eller strålevarme integrert i himlingen. Ved åpning av vinduer vil radiatorer skrus av. I garderober og i rom med dusj er det montert gulvvarme, og i verksted i bygg C er det montert varmepaneler i tak. For ventilasjonsoppvarming benyttes vannbatteri i ventilasjonsaggregat. Det er seks aggregat i bygg A (360.01-360.06), tre i bygg B (360.11-360.13) og tre i bygg C (360.21-360.23).



Figur 10. Prinsippskisse av varmedistribusjonssystemet (320.01 – 01) inkludert energimålere.

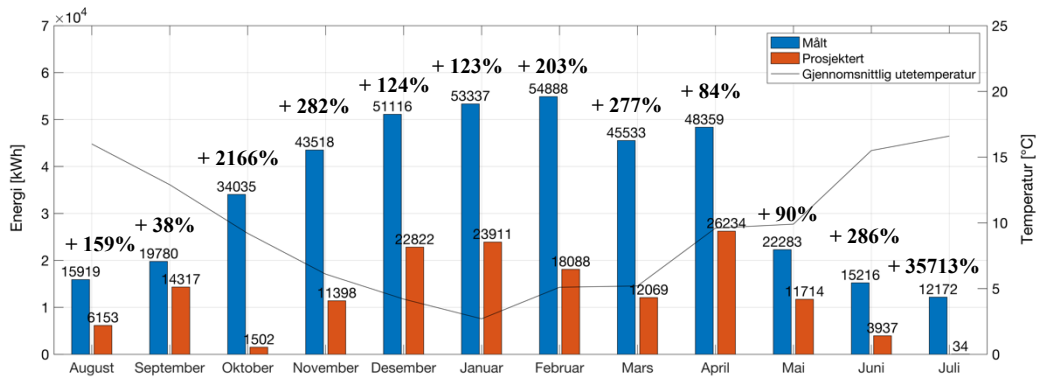
Tabell 14. Energimålere inkludert i energipost 1a og 1b.

Energipost	Gjeldende energimålere
1a Romoppvarming	OE02, OE04, OE502 og OE503
1b Ventilasjonsoppvarming	OE01, OE03 og OE501

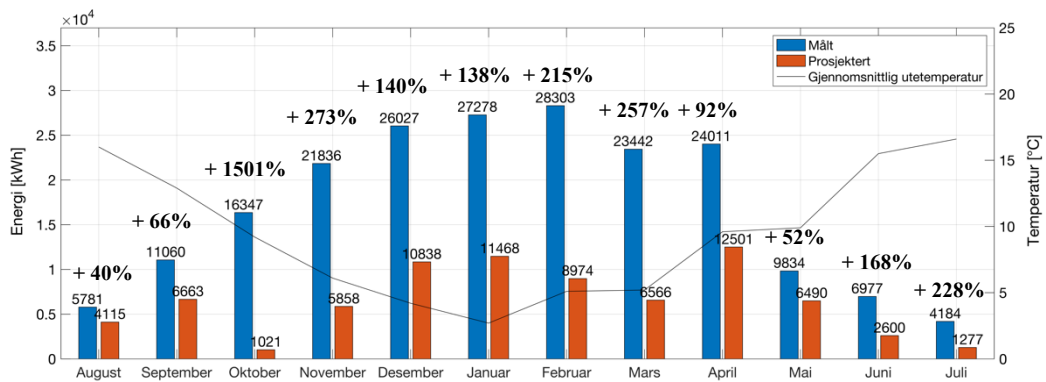
### 1a Romoppvarming

Det er et gjennomgående høyt energiforbruk til romoppvarming for alle bygg, som vist i Figur 11, Figur 12 og Figur 13. Totalt avviker forbruket med 158% fra prosjekterte verdier, og avviket for bygg A, B og C er henholdsvis 173%, 162% og 134%.

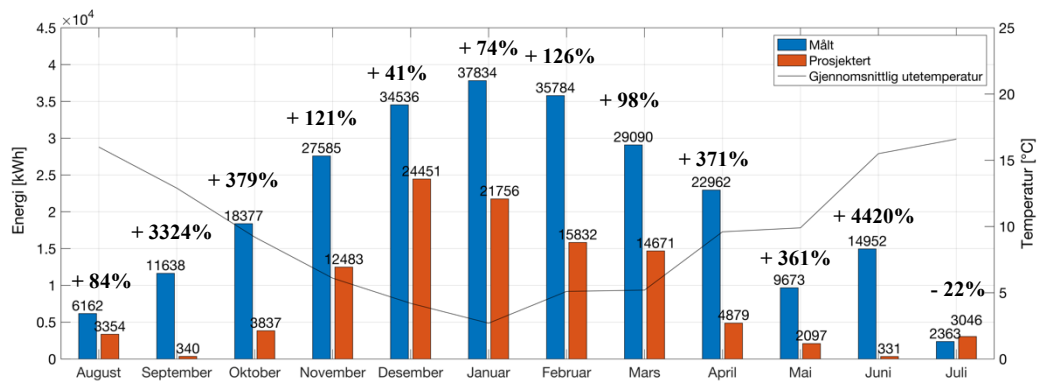
I energisimuleringene ble det benyttet temperatursettpunkt i og utenfor driftstid lik 22 °C og 19 °C, med en driftstid lik 08.00 timer. Det observeres i SD-anlegget at temperatursettpunkt i realiteten varierer hovedsakelig mellom 19 °C og 22 °C, for alle rom. Det observeres også at det brukes nattsenkning til 21 °C fra ca. kl. 21:30 til 07:00 i bygg A og B, og ingen nattsenkning i bygg C. Det gis ikke inntrykk av at temperatursettpunkt endres i helg eller ferier.



Figur 11. Målt og prosjektert energibruk til romoppvarming i bygg A.



Figur 12. Målt og prosjektert energibruk til romoppvarming i bygg B.

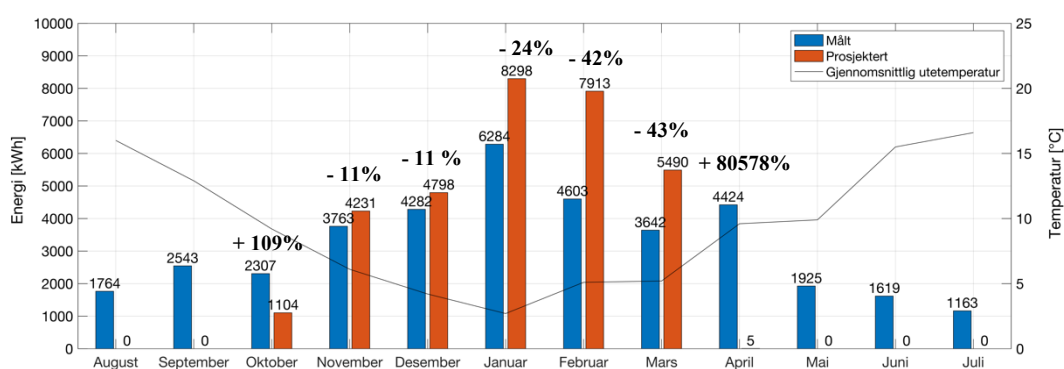


Figur 13. Målt og prosjektert energibruk til romoppvarming i bygg C.

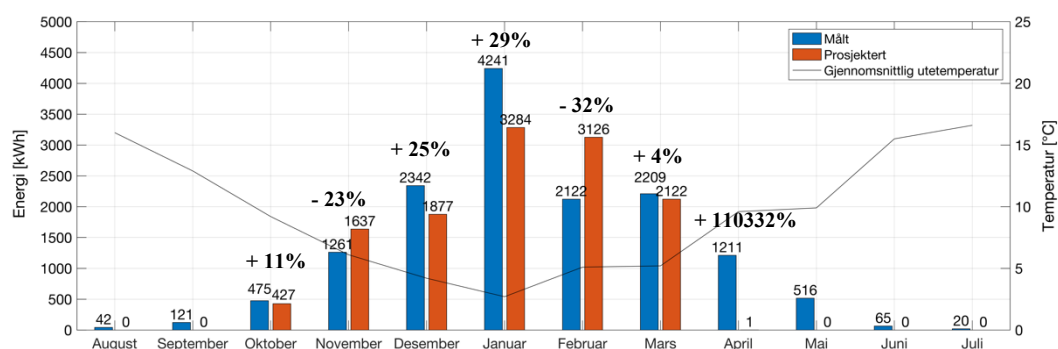
## 1b Ventilasjonsoppvarming

Energiforbruket til ventilasjonsoppvarming er totalt 44% mer enn prosjektert. Per bygg avviker forbruket med 20% (A), 17% (B) og 61% (C), som illustreres i Figur 14, Figur 15 og Figur 16.

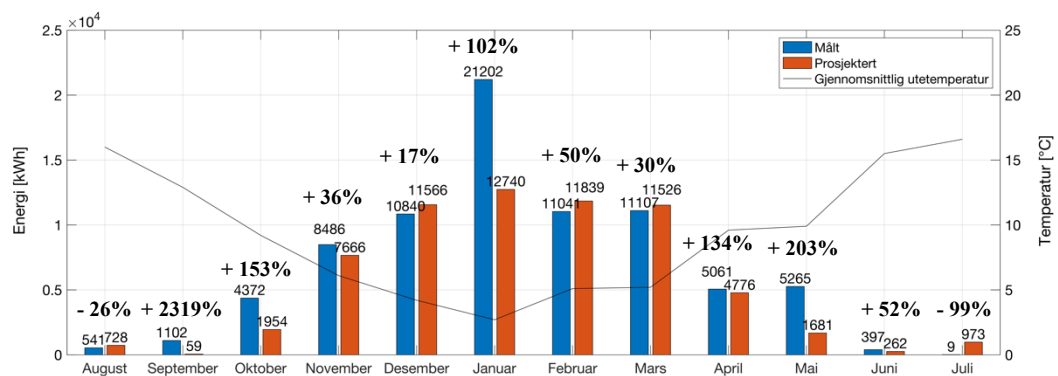
I energiberegningene ble det brukt et temperatursettpunkt for tilluften fra ventilasjonsaggregatene lik 19 °C i perioden oktober til mars, og 16 °C i perioden april til september, med en driftstid lik 10:00 timer. I realiteten er temperatursettpunktene utekompenserte og varierer mellom 16 °C og 19 °C. Unntatt i aggregat 360.05 hvor settpunktet varierer mellom 14 °C og 13 °C. Reell driftstid varierer mellom 8,5 – 15 timer avhengig av aggregat og bruk av tilhørende rom.



Figur 14. Målt og prosjektert energibruk til ventilasjonsoppvarming i bygg A.



Figur 15. Målt og prosjektert energibruk til ventilasjonsoppvarming i bygg B.



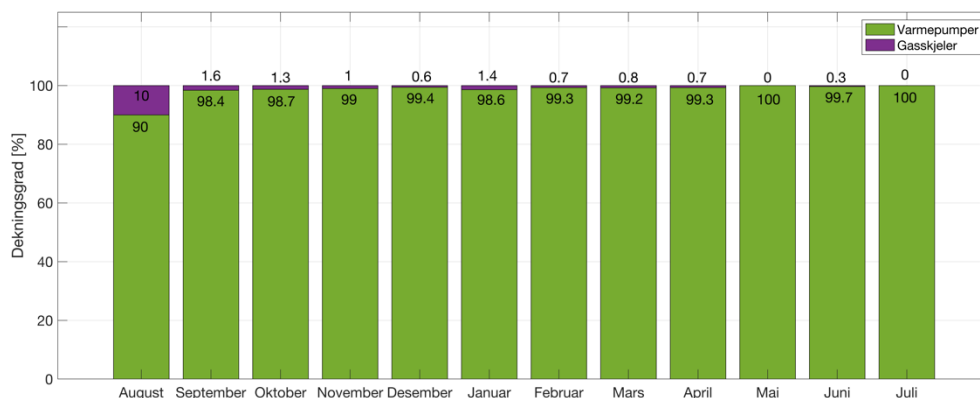
Figur 16. Målt og prosjektert energibruk til ventilasjonsoppvarming i bygg C.

### Energikildenes dekningsgrad av energiforbruket til rom- og ventilasjonsoppvarming

Målt dekningsgrad for varmepumper og gasskjeler avviker fra prosjekterte verdier, og er presentert i Tabell 15. Gasskjelen dekker kun 0,7% av energiforbruket til rom- og ventilasjonsoppvarming, som illustreres i Figur 17.

Tabell 15. Målt og beregnet energidekningsgrader for rom- og ventilasjonsoppvarming.

	Varmepumper [%]		Gasskjeler [%]	
	Prosjektert	Målt	Prosjektert	Målt
Rom- og ventilasjonsoppvarming	90	99,3	10	0,7

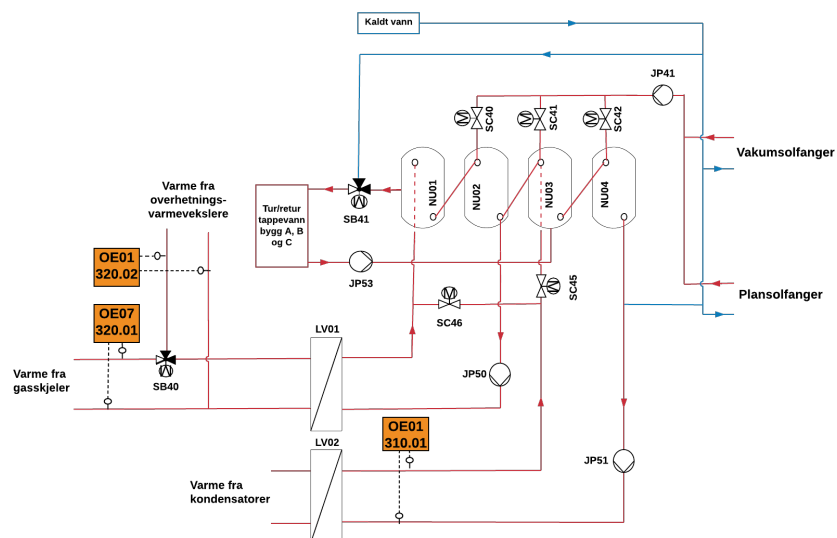


Figur 17. Målt energidekningsgrad til rom- og ventilasjonsoppvarming.



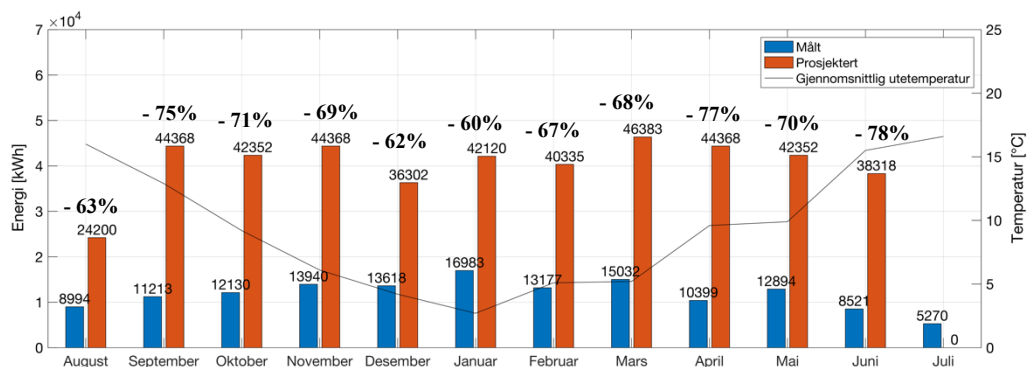
#### 4.1.2.2 Energibruk til tappevann

Figur 18 er en forenklet prinsippsskisse av anlegget for akkumulering av tappevann, inkludert energimålere. Tappevannet forvarmes i NU03/04 med solvarme og kondensatorvarme fra varmpumper, og ettervarmes i NU01/02 med gassvarme og overhettingsvarme fra varmpumper. I energiberegningene er det brukt standardverdier fra NS 3031:2014 for energibehov til tappevann.



Figur 18. Prinsippsskisse av anlegg for akkumulering av tappevann (310.01) inkludert energimålere.

Energiforbruket til tappevannsoppvarming avviker totalt 68%, som illustreres i Figur 19. Avviket per måned varierer mellom 60% - 78%. Både målt og prosjektert energibruk inneholder ikke solvarmens bidrag til tappevannsoppvarming.



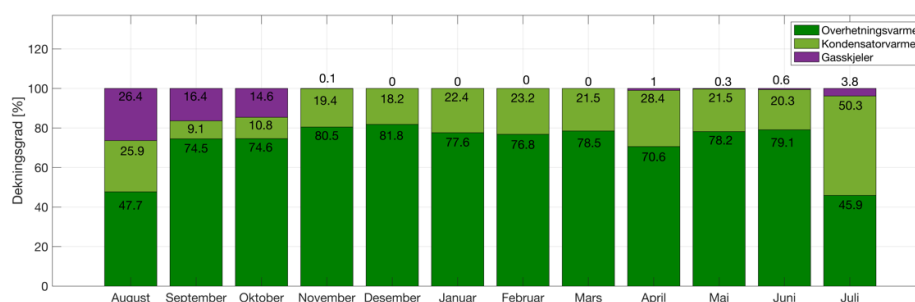
Figur 19. Målt og prosjektert energibruk til tappevannsoppvarming.

## Energikildenes dekningsgrad av energiforbruket til tappevannsoppvarming

Varmepumpene og gasskjelenes dekningsgrad av tappevannsoppvarmingen avviker fra prosjekterte verdier, og er presentert i Tabell 16. Gasskjelene dekker kun 4,5% av energiforbruket til tappevannsoppvarming, og fra desember til mars er dekningsgraden null som illustreres i Figur 20.

Tabell 16. Målt og beregnet energidekningsgrader tappevannsoppvarming.

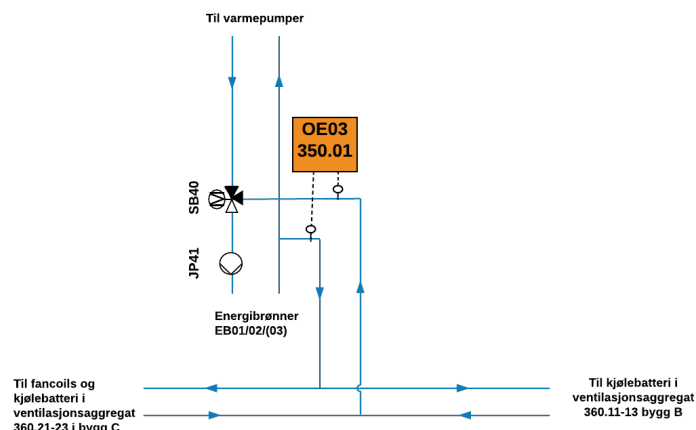
	Varmepumpe [%]		Gass [%]	
	Prosjektert	Målt	Prosjektert	Målt
Tappevannsoppvarming	60	95,5	30	4,5



Figur 20. Målte energidekningsgrader til tappevannsoppvarming.

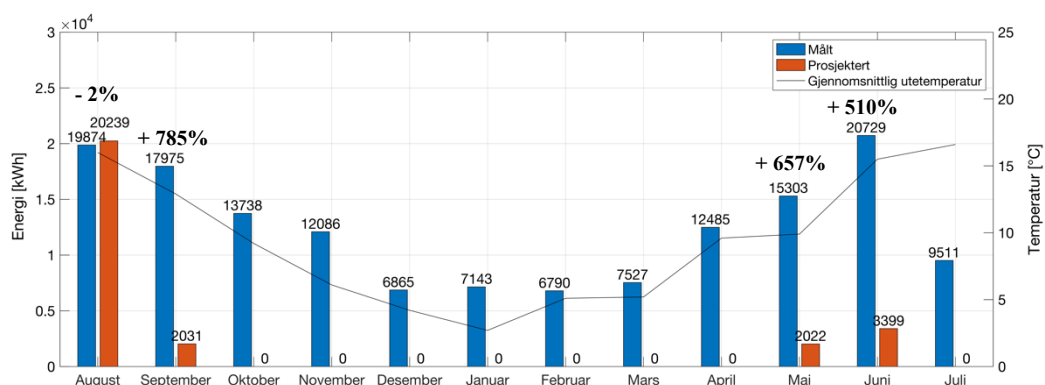
### 4.1.2.3 Energibruk til ventilasjonskjøling

Figur 21 er en forenklet prinsippkisse av kjøledistribusjonssystemet, inkludert energimåleren. Til ventilasjonskjøling benyttes kun «gratis» kjøling. I bygg A benyttes kjøling i form av returvæske fra prosesskjøling eller fra fordampertørløpet, og i bygg B og C benyttes frikjøling fra energibrønnene direkte i kjølebatteri i aggregat. Forbruket i bygg A er ikke inkludert på grunn av manglende måling.



Figur 21. Prinsippkisse av deler av kjøledistribusjonssystemet (350.01-01/02) inkludert energimålere.

Målt forbruk er 442% mer enn prosjektert, og presenteres i Figur 22. Det er kun prosjektert ventilasjonskjøling for fire av tolv måneder, mens det i realiteten er et forbruk hele året. Fra samtaler med *Sweco* er det informert om at varmegjenvinnernes regulering er justert for å øke kjølebehovet, slik at mer varme tilbakeføres til energibrønnene.



Figur 22. Målt og prosjektert energibruk til ventilasjonskjøling.

#### 4.1.2.4 Energibruk til pumper i energisentralen

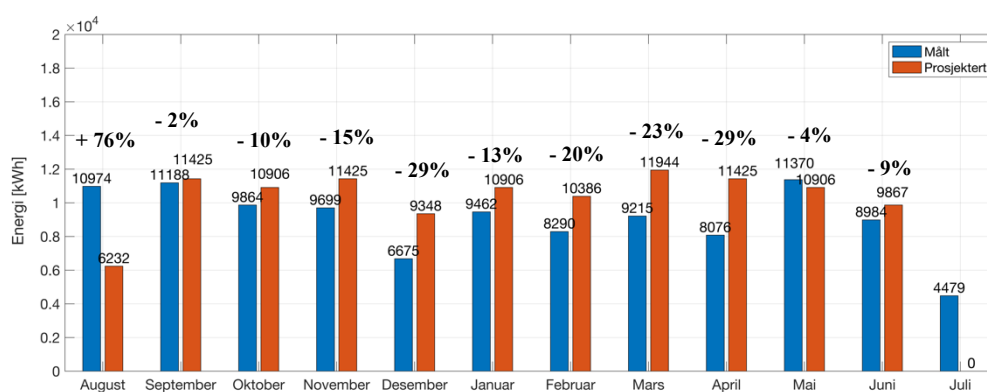
Energiforbruket til pumper er beregnet basert på målinger av momentant effektforbruk hentet fra SD-anlegget, og er presentert i Tabell 17. Det er tilgjengelig måledata for 10 av 24 pumper. Energiforbruket er beregnet til å være 81358 kWh, som utgjør 268% prosent mer enn total prosjektert verdi på 22107 kWh. Energisystemets største pumpe, 350.01 – JP41 i energibrønnene, utgjør 68,6% av totalt beregnet energiforbruk.

Tabell 17. Målt energiforbruk til pumper i energisentralen.

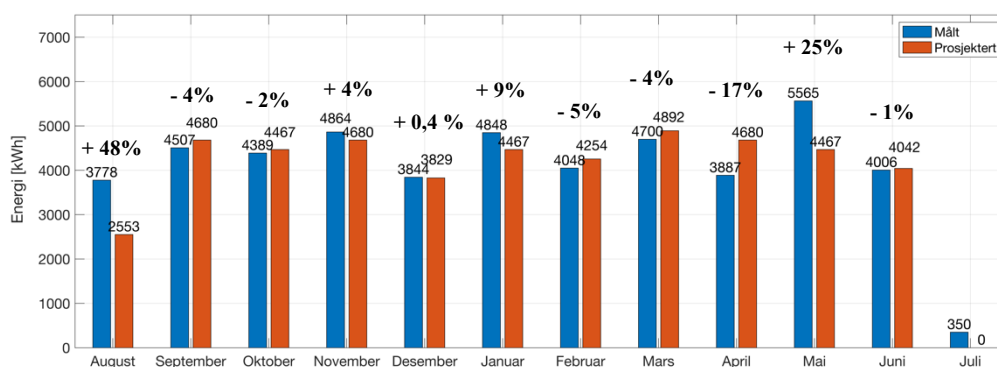
Delsystem	ID	Energiforbruk [kWh]	Beskrivelse
310.01	JP40	-	Frakt av overhettingsvarme og/eller gassvarme til LV01
310.01	JP41	-	Frakt av solvarme til tappevannsakkumulering
310.01	JP42	-	Frakt av solvarme fra vakumsolfangerne til energibrønnene
310.01	JP43	-	Frakt av solvarme fra plansolfangerne til energibrønnene
310.01	JP50	-	Frakt av vekslet varme via LV01 for ettervarming av tappevann
310.01	JP51	-	Frakt av vekslet varme via LV02 for forvarming av tappevann
310.01	JP52	-	Frakt av kondensatorvarme etter veksling via LV02
310.01	JP53	-	Sirkulasjonspumpe tappevann
320.01	JP40	1993	Frakt av hovedvarmen (tvillingpumpe)
320.01	JP41	3468	Frakt av hovedvarmen (tvillingpumpe)
320.01	JP42	2543	Turvann romoppvarmingskrets bygg A
320.01	JP48	-	Turvann romoppvarmingskrets bygg B
320.01	JP50	131	Frakt av vann til gasskjeler
320.02	JP50	-	Returvann til kondensator IK01
320.02	JP51	-	Turvæske til fordamper IK01
320.02	JP52	-	Returvann til kondensator IK02
320.02	JP53	-	Turvæske til fordamper IK02
350.01	JP40	1427	Turvæske til ventilasjonskjøling bygg A
350.01	JP41	56010	Turvæske til energibrønnene
350.01	JP40 1	-	Turvæske til ventilasjonskjøling bygg C
350.01	JP50 1	-	Returvann fra ventilasjonskjøling bygg C
350.02	JP40	3759	Turvann til prosesskjøling (tvillingpumpe)
350.02	JP41	3488	Turvann til prosesskjøling (tvillingpumpe)
350.02	JP42	4358	Turvæske til veksler LK01 for prosesskjøling (tvillingpumpe)
350.02	JP43	4181	Turvæske til veksler LK01 for prosesskjøling (tvillingpumpe)
<b>Sum</b>		<b>81358</b>	

#### 4.1.2.5 Energibruk til vifter

Energiforbruket til viftedrift er 6% mindre enn prosjektert for bygg A og 4% mer enn prosjektert for bygg B, som illustreres i Figur 23 og Figur 24. Forbruket er høyt i august når det forventes å være størst behov for ventilasjonskjøling (Asplan Viak AS, 2012a). Det observeres et betydelig forbruk i juli for bygg A, selv om skolen er tilnærmet tom. Ventilasjonsaggregat 360.01 og 360.02 i bygg A driftes i henholdsvis hele og halve juli, mens resterende aggregat er slått av fra og med 6. juli.



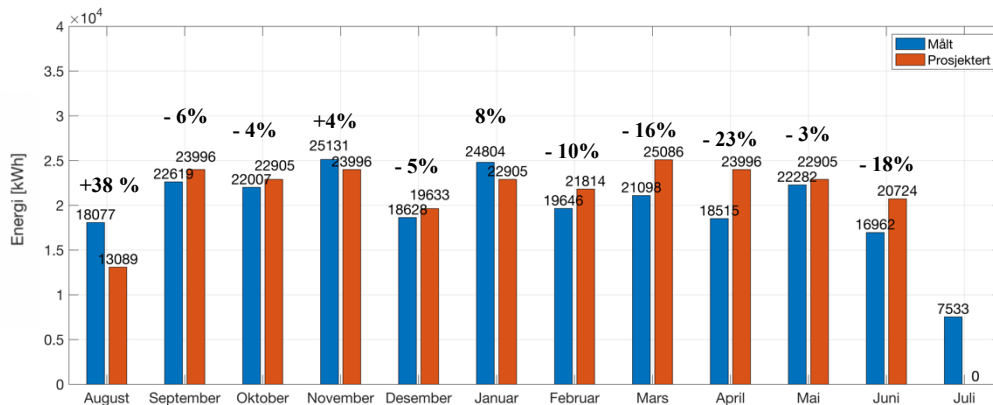
Figur 23. Målt og prosjektert energibruk til vifter i bygg A.



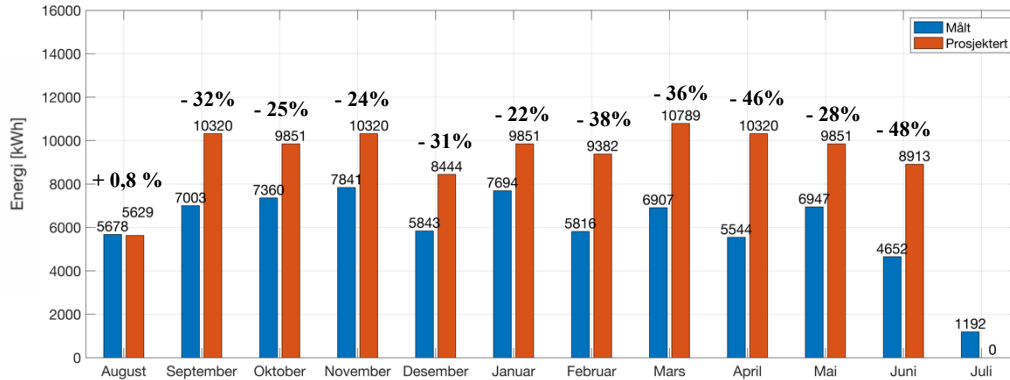
Figur 24. Målt og prosjektert energibruk til vifter i bygg B.

#### 4.1.2.6 Energibruk til belysning

For bygg A og B er målt energiforbruk 2% og 30% mindre enn prosjektert, og illustreres i Figur 25 og Figur 26. Selv om skolen står tom største delen av juli måles det energiforbruk i begge bygg.



Figur 25. Målt og prosjektert energibruk til belysning i bygg A.



Figur 26. Målt og prosjektert energibruk til belysning i bygg B.

#### 4.1.3 Etterprøving av levert energi

Målt levert elektrisitet og gass (brennverdi) er sammenlignet med prosjekterte verdier, og resultatene er presentert i Tabell 18. Elektrisk levert energi er hentet fra energioppfølgingssystemet og inneholder forbruket til teknisk utstyr, pumper, vifter, forbrukskurs, heis og belysning. For bygg C er forbruket til teknisk utstyr kun for utstyr i teknisk rom. Levert elektrisk energi er 1,4% høyere enn det forventede behovet, som utgjør 21535 kWh. Gassforbruket er 88,3% mindre enn prosjektert.

Tabell 18. Prosjektert og målt levert energi.

	Gass (brennverdi) [kWh]	Elektrisk energi [kWh]
<b>Målt</b>	17053	1508965
<b>Prosjektert</b>	145688	1487612
<b>Avvik</b>	128635	21535
<b>Avvik [%]</b>	- 88,3%	+1,4%

#### 4.1.4 Diskusjon del 1: Formålsdelt etterprøving av energibruk

I Tabell 19 gis en oppsummering av resultatene fra formålsdelt etterprøving av brutto energibruk per energipost, og følgende observasjoner trekkes frem:

- For energipost 1a romoppvarming er prosjektert energibehov til bygg A og B ikke troverdig for et klimaavhengig forbruk, hvor man forventer at energibehovet øker i tråd med synkende utetemperatur. Derfor er trolig prosjektert energibehov underestimert for månedene oktober til og med mars. Samme trend finnes ikke i prosjektert energibehov for bygg C, hvor energiberegningene er utført av et annet selskap. Derfor er mest sannsynlig avvik for bygg A og B lavere enn det som er presentert i kapittel 4.1.2.1. Reelle driftsbetingelser for romoppvarming avviker noe fra de brukt i energiberegninger, og manglende bruk av nattsinking til 19 °C bidrar også trolig til noe av avvikene.
- Det er brukt 18719 kWh til romoppvarming i juli selv om skolen nesten står tom. Fra observasjoner i SD-anlegget gis det inntrykk av at temperatursettpunkt i energisentralen og på romnivå ikke endres i sommerferien, noe som potensielt kan redusere skolens energiforbruk.

- Til rom- og ventilasjonsoppvarming er varmpumpenes dekningsgrad betydelig høyere enn prosjektert som kan både bety at de er overdimensjonert, at reelle driftsbetingelser er bedre enn driftsbetingelser brukt ved dimensjonering av varmpumpene og/eller at gasskjelene reguleres som back-up fremfor spisslast.
- For tappevannsenergi-posten er avvikene per måned mellom 60 – 78%, og det tyder på at det er prosjektert et for stort energibehov når det brukes standardverdier fra NS 3031:2014. Standardverdiene er basert på totalt oppvarmet areal, mens det i større grad er antall brukere som avgjør behovet (SINTEF, 2018).
- I prosjektoppgaven ble det avdekket at energiproduksjonen til solfangeranlegget var 68% mindre enn prosjektert for driftsåret 2018 (Tjøtta, 2019). Lav energiproduksjon fra solfangeranlegget fører til at en større andel av forvarmingen av tappevannet må dekkes av kondensatorvarme gjennom året, og dermed øker energikostnader til varmpumpedrift.
- For energi-post 6b ventilasjonskjøling er det mest sannsynlig at avvik hovedsakelig er forårsaket av justert regulering av varmegjenvinnerne i ventilasjonsaggregatene, for økt tilbakeføring av energi til brønnene. Temperatursettpunkt og driftstid til ventilasjonsaggregatene er i realiteten noe forskjellig fra inndata i Simien, som også kan være en bidragsfaktor til avvikene. Høyt forbruk av ventilasjonskjøling fører ikke direkte til økt energikostnader da frikjøling fra energibrønnene er gratis kjøling. Det kan likevel føre til økt strømforbruk til pumpedrift på grunn av behov for større mengder med frikjøling til kjølebatteriene.
- Forbruk av levert elektrisk energi avviker kun 1,4% med prosjekterte verdier. Det kan forventes at det totale forbruket av levert elektrisk energi er noe større ettersom teknisk utstyr utenom teknisk rom ikke er inkludert for bygg C.
- Gasskjelene brukes 88,3% mindre enn prosjektert, som igjen antyder at de ikke reguleres som spisslast.
- Etterprøving av brutto energibruk indikerer at det på ulike energi-poster brukes både mer og mindre energi enn hva som er prosjektert. Det kan delvis forklare at målt levert elektrisk energi avviker kun med 1,4% fra prosjekterte verdier.



Tabell 19. Oppsummering av sammenligning av målt og prosjektert brutto energibruk per energipost.

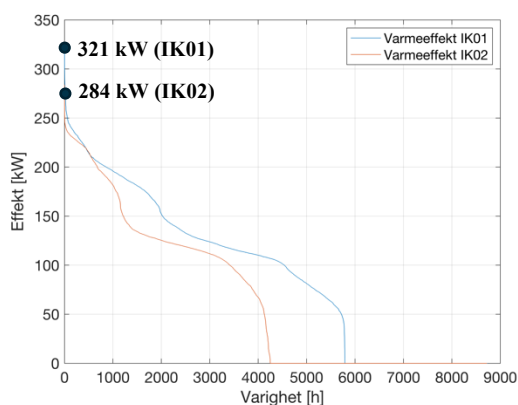
<b>Formålsdelt etterprøving av brutto energibruk</b>				
<b>1a Romoppvarming</b>				
	Målt [kWh]	Prosjektert [kWh]	Avvik [kWh]	Avvik [%]
<b>Bygg A</b>	416155	152179	263976	+173%
<b>Bygg B</b>	205077	78371	126706	+162%
<b>Bygg C</b>	250956	107078	143878	+134%
<b>Sum</b>	872188	337628	534560	+158%
<b>1b Ventilasjonsoppvarming</b>				
	Målt [kWh]	Prosjektert [kWh]	Avvik [kWh]	Avvik [%]
<b>Bygg A</b>	38319	31840	6479	+20%
<b>Bygg B</b>	14625	12473	2152	+17%
<b>Bygg C</b>	106020	65771	40249	+61%
<b>Sum</b>	158964	110084	48880	+44%
<b>Tappevann</b>				
	Målt [kWh]	Prosjektert [kWh]	Avvik [kWh]	Avvik [%]
<b>Sum</b>	142171	445465	303294	-68%
<b>Vifter</b>				
	Målt [kWh]	Prosjektert [kWh]	Avvik [kWh]	Avvik [%]
<b>Bygg A</b>	108274	114770	6496	-6%
<b>Bygg B</b>	48786	47011	1775	+4%
<b>3b Pumper</b>				
	Målt [kWh]	Prosjektert [kWh]	Avvik [kWh]	Avvik [%]
<b>Sum</b>	81358	22 107	59251	+268%
<b>4 Belysning</b>				
	Målt [kWh]	Prosjektert [kWh]	Avvik [kWh]	Avvik [%]
<b>Bygg A</b>	237302	241049	3747	- 2 %
<b>Bygg B</b>	72477	103670	31193	- 30%
<b>6b Ventilasjonskjøling</b>				
	Målt [kWh]	Prosjektert [kWh]	Avvik [kWh]	Avvik [%]
<b>Bygg A og B</b>	150027	27691	122336	+442%

## 4.2 Del 2: Kartlegging av driftstekniske egenskaper og energisystemets ytelse

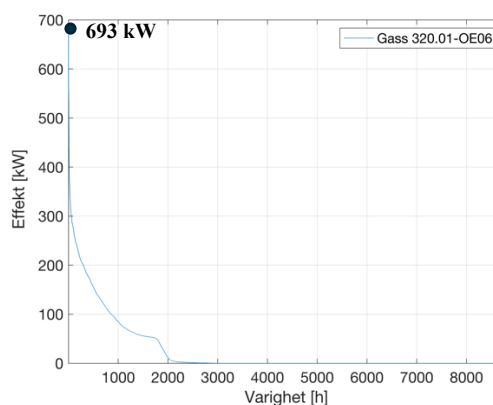
I følgende delkapitler kartlegges og diskuteres driftstekniske egenskaper og energisystemets ytelse for forhold relatert til varmeproduksjon i energisentralen, romoppvarming og energibrønnene. Det er valgt å diskutere resultatene og foreslå tiltak for forbedring fortløpende i kapittelet. De foreslåtte tiltakene er gjengitt i konklusjonen.

### 4.2.1 Energisystemets varmeytelse

Varmepumpene og gasskjelenes varmeytelse er undersøkt. Varmepumpene skal kunne levere 175 kW hver når varmekildens temperatur er 3 °C og varmpumpens temperatursettpunkt er 65 °C (dimensjonerende forhold). Gasskjelene er dimensjonert for å levere en maksimal varmeytelse på 660 kW samlet. Figur 27 presenterer en varighetskurve for varmpumpenes produserte varmeeffekt. Figur 28 presenterer en varighetskurve for forbruket av varmeeffekt levert av gasskjelene, som måles av energimåler 320.01- OE06 plassert mellom gasskjelene og akkumuleringstank NU07 (se Figur 9).



Figur 27. Varighetskurve for produsert varmeeffekt av varmpumpene IK01 og IK02.



Figur 28. Varighetskurve for forbruket av varmeeffekt levert av gasskjelene. Måles av energimåler 320.01 - OE06.

Det var mistenkt at varmpumpene var overdimensjonert da de dekker størstedelen av energibehovet til rom – og ventilasjonsoppvarming og tappevannsoppvarming. Basert på målt maksimal produsert varmeeffekt gis det inntrykk av at varmpumpene ikke er overdimensjonert, men yter godt over dimensjonert varmeytelse med maksimalt målt varmeproduksjon på 321 kW (IK01) og 284 kW (IK02). Maksimalt målt forbruk av

varmeeffekt levert av gasskjelene er 693 kW. Det er noe høyere enn dimensjonert maksimal varmeytelse på 660 kW, som sannsynligvis forårsakes av at det ikke er gasskjelenes direkte produksjon som måles.

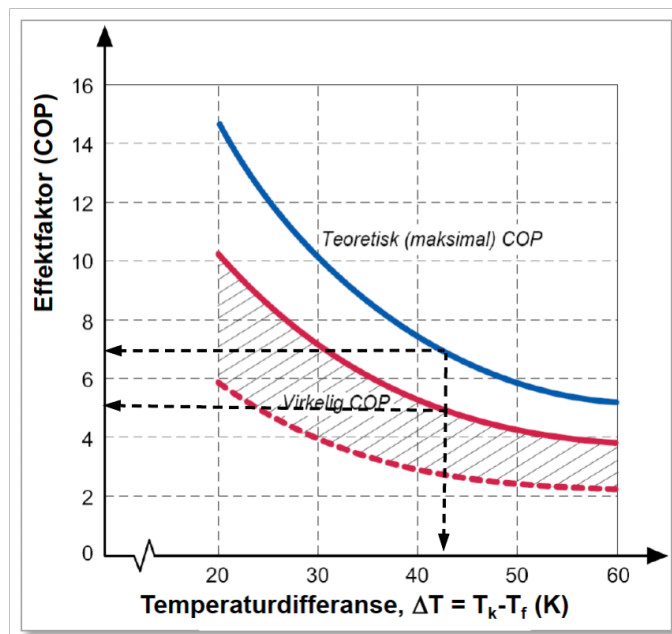
#### 4.2.2 Varmepumpenes gjennomsnittlige effektfaktor – SCOP

Sesongverdier for varmpumpenes COP, betegnet som SCOP, er beregnet for å undersøke effektiviteten til varmpumpeanlegget. Gjennomsnittlige månedsverdier for produsert varmeenergi  $Q_{VP}$ , tilført elektrisk energi til kompressorarbeid  $E_{VP}$  og SCOP presenteres i - Tabell 20. Beregnet årlig SCOP på 4,1 (IK01) og 4,3 (IK02) indikerer at varmpumpens effektivitet er god.

Tabell 20. Tilført elektrisk energi til kompressorarbeid  $E_{VP}$ , produsert varmeenergi  $Q_{VP}$  og SCOP for IK01/02.

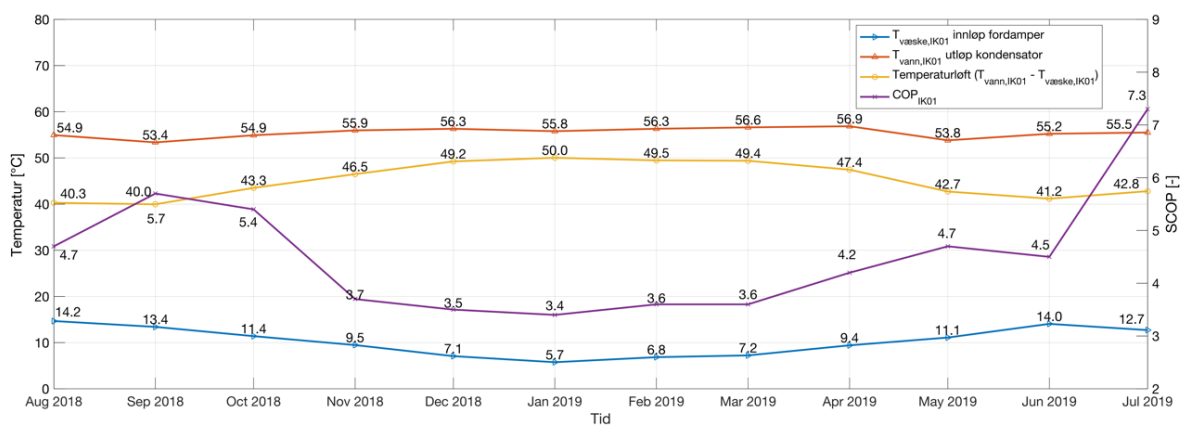
Måned	$Q_{IK01}$ [kWh]	$E_{IK01}$ [kWh]	SCOP <sub>IK01</sub>	$Q_{IK02}$ [kWh]	$E_{IK02}$ [kWh]	SCOP <sub>IK02</sub>
August 2018	45737	9737	4,7	5460	1435	3,8
September 2018	78378	13687	5,7	6462	2487	2,6
Oktober 2018	78991	14707	5,4	54809	10708	5,1
November 2018	76156	20565	3,7	55250	14541	3,8
Desember 2018	88395	25420	3,5	66588	17985	3,7
Januar 2019	100650	29313	3,4	83968	23373	3,6
Februar 2019	80949	22604	3,6	54608	14024	3,9
Mars 2019	86032	23548	3,6	56681	14158	4,0
April 2019	46918	11246	4,2	47104	9936	4,7
Mai 2019	50522	10808	4,7	51303	10328	5,0
Juni 2019	36052	8064	4,5	35006	7639	4,6
Juli 2019	7781	1071	7,3	54832	7659	7,2
<b>Sum</b>	<b>776561</b>	<b>190770</b>	<b>4,1</b>	<b>572071</b>	<b>134273</b>	<b>4,3</b>

I august og september er SCOP for IK02 lav, og det er usikkert hva som kan være årsaken. I juli er SCOP spesielt høy for både IK01 og IK02, og det undersøkes derfor om det er teoretisk mulig. Carnot-effektfaktoren  $\varepsilon_c$  er den maksimale teoretiske effektfaktoren som kan oppnås for en tapsfri varmpumpeprosess (Stene, 2018a). Figur 29 illustrerer Carnot-effektfaktoren og virkelig effektfaktor for en reversert Carnot-prosess ved ulike temperaturløft ( $\Delta T = T_k - T_f$ ). For IK01 er gjennomsnittlig temperaturløft i juli på 42,8 °C med en effektfaktor lik 7,2, og i Figur 29 vises det at målt effektfaktor ved et temperaturløft på den størrelsen er høyere enn teoretisk maksimal COP.

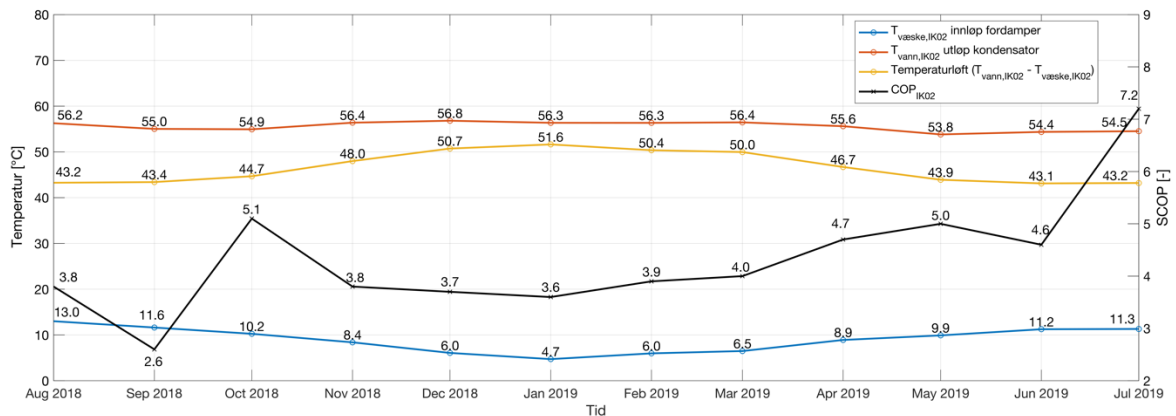


Figur 29. Carnot-effektfaktor og virkelig COP for reversert Carnot-prosess (Stene, 2018a).

Videre er forhold som påvirker SCOP undersøkt. Figur 30 og Figur 31 presenterer gjennomsnittlig månedsverdier for temperaturen på kollektorvæsken inn i fordampere, temperaturen på vannet ut av kondensatorene, størrelsen på temperaturløftet og SCOP for hver av varmepumpene.



Figur 30. Temperatur innløp fordampere, temperatur utløp kondensator, temperaturløft og SCOP for IK01.



Figur 31. Temperatur innløp fordampner, temperatur utløp kondensator, temperaturløft og SCOP for IK02.

Gjennomsnittlig temperatur inn på fordampere varierer med 8,5°C (IK01) og 8,3°C (IK02). Temperaturene på varmekilden er gjennomgående høy, med maksimal gjennomsnittlig temperatur på 14,2 °C (IK01) og 13 °C (IK02) målt i juli. I kapittel 4.2.1 er det vist at varmepumpene yter godt over dimensjonert varmeytelse, og det er sannsynlig at det hovedsakelig skyldes høy temperatur på varmekilden.

Temperaturen ut av kondensatorene er relativt stabil og varierer med 3,5 °C (IK01) og 3,0 °C (IK02). Fra november til mars følger SCOP endringen i størrelsen på temperaturløftet, noe som ikke er like tydelig for de resterende månedene. Per Kelvin økning i kondenseringstemperaturen eller senkning i fordampningstemperaturen skal SCOP avta med 2 - 3% (SINTEF Byggforsk, 2009). Fra oktober til november øker temperaturløftet med 3,2 °C (IK01) og 3,3 °C (IK02), som skal i teorien utgjøre mellom 6,4 – 9,9 % nedgang i SCOP. I realiteten synker derimot effektfaktoren med 31% (IK01) og 25% (IK02).

Gjennomsnittlig månedsverdier for effektfaktoren fluktuere altså noe fra april til oktober, men er relativt stabile i de resterende månedene når varmepumpene brukes mest. Det er ikke sikkert hva som er årsaken til fluktuasjonene. Det er mulighet for at det antyder at det gjøres feilmålinger når hyppigheten av og lengden mellom varmepumpenes start og stopp øker. Ved fremtidig bruk av målinger av produsert varmeenergi  $Q_{VP}$  og tilført elektrisk energi  $E_{VP}$  burde man stille kritisk til om verdiene er realistiske. Beregnet årlig gjennomsnittlig effektfaktor på 4,1 (IK01) og 4,3 (IK02) ansees likevel som en god tilnærming.

Videre er varmepumpenes effektfaktor også beregnet inkludert energiforbruket til pumpen i energibrønnene. Det er tatt i bruk følgende formel hvor  $E_{BP}$  betegner elektrisk energi tilført brønnpumpen [kWh] (Stene, 2018a):

$$SCOP_{EVP+EBP} = \frac{Q_{VP}}{E_{VP} + E_{BP}} \quad (3)$$

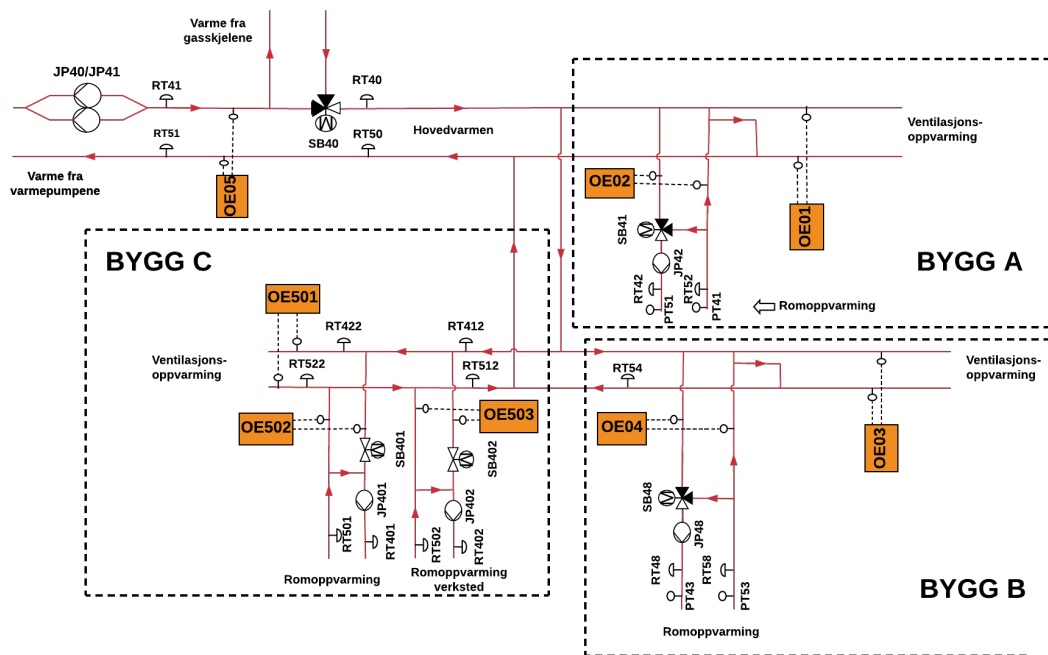
I kapittel 4.1.2.4 ble det avdekket at pumpen som frakter kollektorvæsken til energibrønnene (350.01 – JP41, se Figur 9) hadde et energiforbruk på totalt 56010 kWh. Pådraget til pumpen i energibrønnene har vært 100% fra anlegget startet å driftes i 2014. I løpet av driftsperioden er varmpumpen IK01 driftet 17,4 % mer enn IK02, og dermed er  $E_{BP,IK01}$  og  $E_{BP,IK02}$  henholdsvis 58,7% og 41,3% av pumpens totale energiforbruk. Det resulterer i en nedgang i årlig effektfaktor på 14,6% for IK01 og 16,3% for IK02. Beregnet  $SCOP_{EVP}$ ,  $SCOP_{EVP+EBP}$  og avviket mellom dem er presentert i Tabell 21.

Tabell 21. Beregnet  $SCOP_{EVP}$  og  $SCOP_{EVP+EBP}$  for perioden 01.08.18 – 31.07.19.

	IK01	IK02
<b><math>SCOP_{EVP}</math></b>	<b>4,1</b>	<b>4,3</b>
<b><math>SCOP_{EVP+EBP}</math></b>	<b>3,5</b>	<b>3,6</b>
<b>Avvik</b>	<b>14,6%</b>	<b>16,3%</b>

#### 4.2.3 Temperatursettpunkt i energisentralen og i romoppvarmingskretser

Temperatursettpunkt i energisentralen og i romoppvarmingskretsene er undersøkt. Figur 32 viser en prinsippskisse av deler av varmeanlegget og varmedistribusjonssystemet, og gir en oversikt over relevante måleinstrumenter benyttet i kapittelet. Hovedvarmen som er en kombinasjon av varme produsert av varmpumper og gasskjeler transporteres fra energisentralen til de ulike byggene hvor den forgreiner seg til egne kretser for rom- og ventilasjonsoppvarming i hvert bygg. I bygg C brukes strålevarme til romoppvarming i verksted, strålevarmen har andre temperaturkrav enn radiatorer og gulvvarme og er dermed en separat krets.

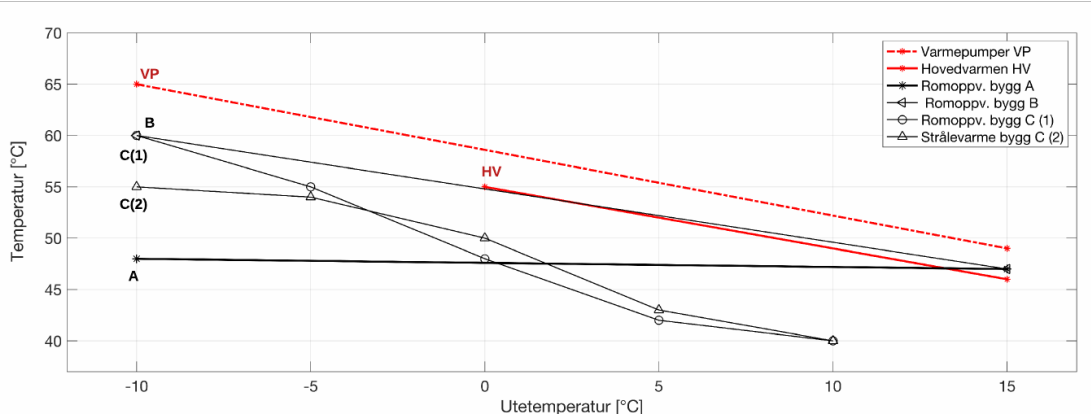


Figur 32. Prinsippskisse av deler av varmeanlegget (320.01) og varmedistribusjonssystemet (320.01-1) inkludert relevant måleinstrument.

Når skolens varmebehov avtar med stigende utetemperatur kan vanntemperaturene i energisystemet reduseres, dette gjøres med temperaturregulering basert på utetemperatur kompenseringsskurver (utekompenseringsskurver). Tabell 22 gir en oversikt over utekompenseringsskurvene i varmeanlegget og varmedistribusjonssystemet, og hva som reguleres. De respektive utekompenseringsskurvene er illustrert i Figur 33.

Tabell 22. Utekompenseringsskurver i varmeanlegget (320.01) og varmedistribusjonssystemet (320.01-1).

ID	Lokasjon	Regulering	Beskrivelse
VP	Energisentralen Bygg A	Varmepumpene varmeytelse	Turtemperatur ut av kondensatorer i IK01 og IK02.
HV	Energisentralen Bygg A	Ventilåpning SB40 (Treveis blandeventil)	Blander varme fra varmepumper og gasskjeler til settpunkttemperatur for hovedvarmen til rom- og ventilasjonsoppvarming.
A	Bygg A	Ventilåpning SB41 (Treveis blandeventil)	Blander hovedvarmen og returvann til settpunkttemperatur for romoppvarming i bygg A.
B	Bygg B	Ventilåpning SB48 (Treveis blandeventil)	Blander hovedvarmen og returvann til settpunkttemperatur for romoppvarming i bygg B.
C (1)	Bygg C	Ventilåpning SB401 (Enveis ventil)	Varierer mengden tilført hovedvarmen til krets for radiatorer, gulvvarme og varmluftsgardiner i bygg C.
C (2)	Bygg C	Ventilåpning SB402 (Enveis ventil)	Varierer mengden tilført hovedvarmen til krets for strålevarme i verksted i bygg C.

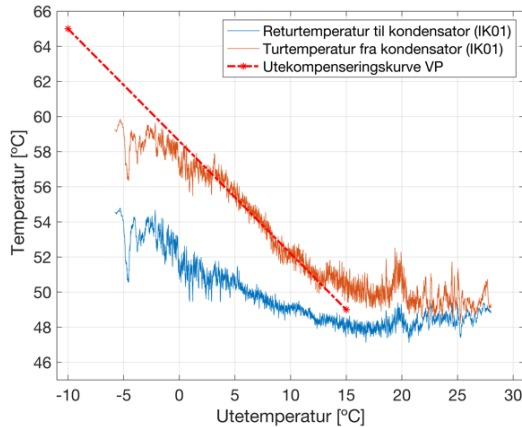


Figur 33. Utekompeniseringskurven til varmepumpene (VP), hovedvarmen (HV) og romoppvarmingskretsene i bygg A, B og C (1 og 2)

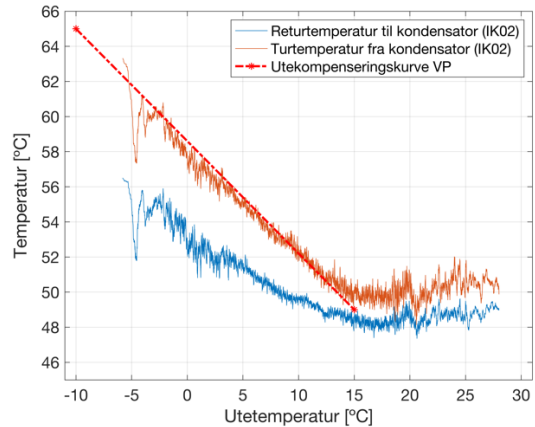
Hovedvarmens utekompenseringskurve styrer tilførselen av varme fra gasskjelene som blandes inn via åpning av treveisventil SB40 (se Figur 32) og skal sikre høy nok turtemperatur til rom- og ventilasjonskretsene i bygg A, B og C. Hovedvarmens utekompenseringskurve har nedre knekkpunkt ved en utetemperatur på 0 °C og da skal hovedvarmens turtemperatur være 55 °C. Utekompeniseringskurvene til romoppvarming i bygg B og bygg C (1) har derimot nedre knekkpunkt ved en utetemperatur på -10 °C, som gir en turtemperatur på 60 °C. Dette er 5 °C høyere enn hovedvarmens settpunkt ved nedre knekkpunkt. Fra Figur 33 ser man at dersom utetemperaturen er under 0 °C og varmepumpene ikke leverer tilstrekkelig som ønsket, vil hovedvarmens turtemperatur være lavere enn temperaturkravet til romoppvarmingen i bygg B. Det samme vil gjelde for bygg C (1) ved en utetemperatur under -5 °C.

Figur 34, Figur 35 og Figur 36 presenterer glidende gjennomsnitt for tur- og returtemperatur til IK01, IK02 og hovedvarmens tur – og returtemperatur ved ulike utetemperaturer. For analyseperioden er -5,8 °C lavest registrert utetemperatur.

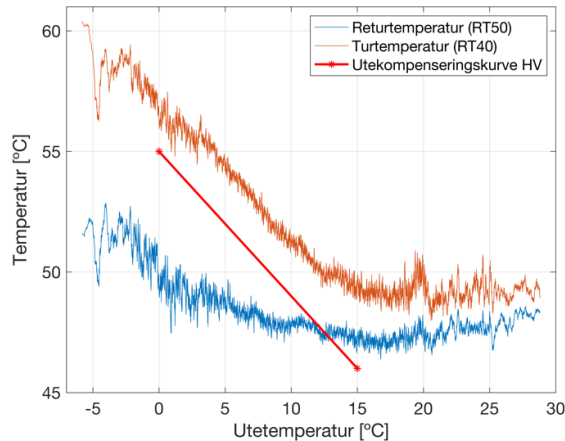




Figur 34. Utekompeningskurve og glidende gjennomsnitt for tur- og returtemperatur til IK01.



Figur 35. Utekompeningskurve og glidende gjennomsnitt for tur- og returtemperatur til IK02.



Figur 36. Utekompeningskurve og glidende gjennomsnitt for hovedvarmens tur – og returtemperatur.

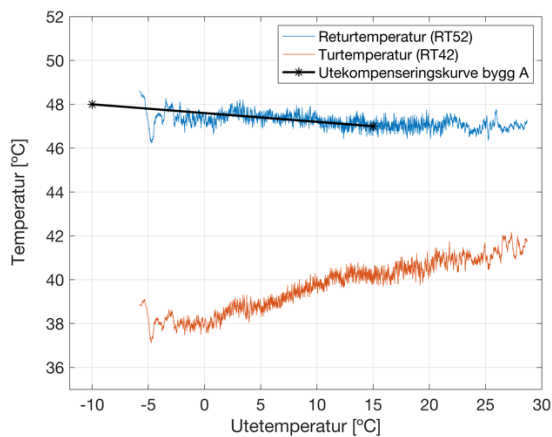
Varmepumpene følger utekompeningskurven tett for de fleste utetemperaturer, men ved utetemperatur under ca. 3 °C leverer IK01 og IK02 rett under hva kurven tilsier. Ved utetemperatur lavere enn ca. - 4 °C leverer ikke varmpumpene som ønsket, men det gjelder svært få målinger. Det leveres også noe høy turtemperatur ved utetemperatur over 15 °C.

Hovedvarmens turtemperatur ligger noen grader over utekompeningskurven for alle utetemperaturer, og indikerer at behovet for gasskjelene har vært svært lite.

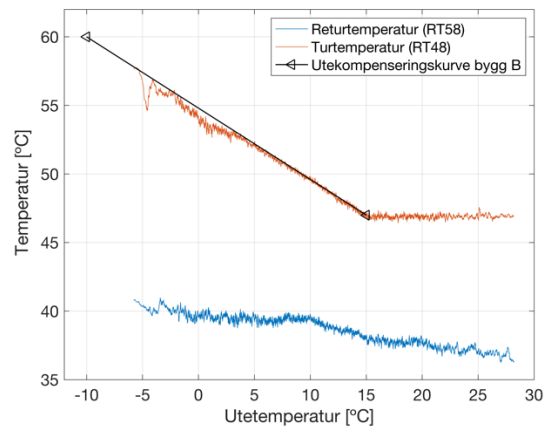
Utekompeningskurvene til hovedvarmen og varmpumpene antyder at varmpumpene er styrt til å dekke så mye av varmebehovet som mulig, og gasskjelene brukes som en back-up fremfor en spisslast. Returtemperaturen til kondensatorene i IK01 og IK02 har en noe høyere temperatur enn hovedvarmens returtemperatur, da det er inkludert varmebidraget fra

underkjølingsvarmevekslerne i varmepumpene. Det observeres at returtemperaturene er gjennomgående høye.

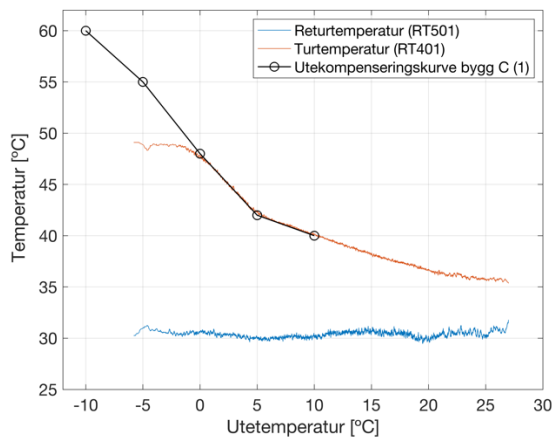
Videre er tur- og returtemperatur i romoppvarmingskretsene i bygg A, B og C studert. Figur 37, Figur 38, Figur 39 og Figur 40 presenterer utekompenseringskurvene og glidende gjennomsnitt for tur – og returtemperatur i bygg A, B, C (1) og C (2).



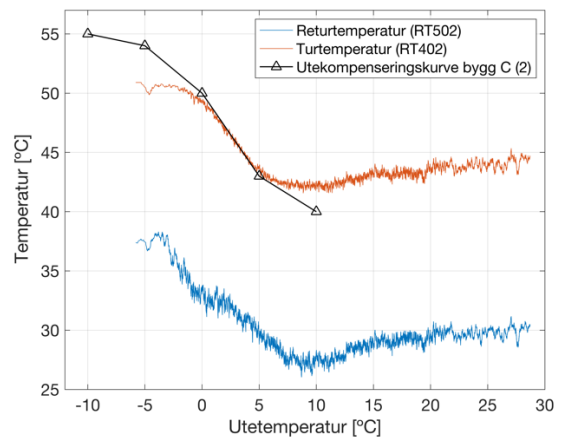
Figur 37. Utekompenseringskurve og glidende gjennomsnitt for tur – og returtemperatur i romoppvarmingskretsen i bygg A.



Figur 38. Utekompenseringskurve og glidende gjennomsnitt for tur – og returtemperatur i romoppvarmingskretsen i bygg B.



Figur 39. Utekompenseringskurve og glidende gjennomsnitt for tur – og returtemperatur i romoppvarmingskretsen i bygg C (1).



Figur 40. Utekompenseringskurve og glidende gjennomsnitt for tur – og returtemperatur i romoppvarmingskretsen i bygg C (2).

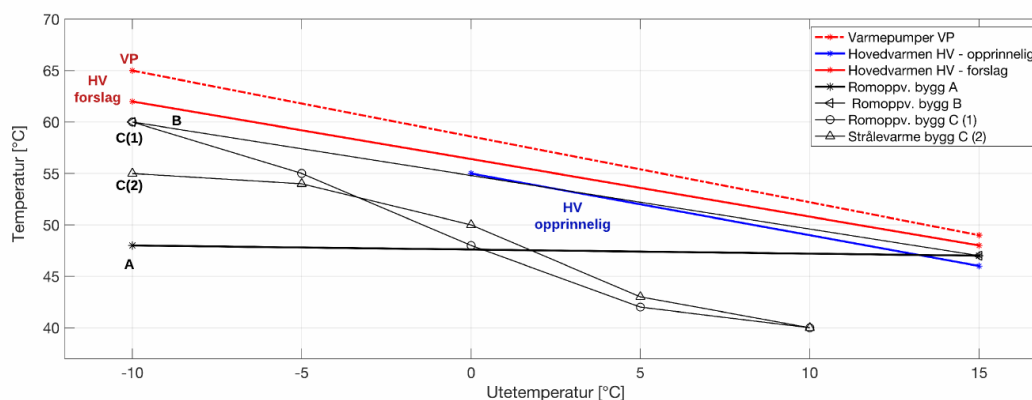
I bygg A og B følger turtemperaturen i romoppvarmingskretsene utekompenseringskurvene tett for alle utetemperaturer. I bygg C (1 og 2) avviker turtemperaturen fra utekompenseringskurvene ved en utetemperatur under 0 °C, og for C (2) er turtemperatur høyere enn hva utekompenseringskurven tilsier ved en utetemperatur over 5 °C.

Returtemperaturene i bygg C (1 og 2) er lavere enn i bygg A og B, og er for det meste under 35 °C. Verkstedene i bygg C har en planløsning og bruksmåte som er svært ulik fra bygg A og B, som mest sannsynlig er årsaken til lavere returtemperatur.

Fra Figur 37, Figur 38, Figur 39 og Figur 40 ser man at temperaturkravet til rom – og ventilasjonsoppvarmingskretsene oppfylles, foruten ved noen få tilfeller når utetemperaturen synker under 0 °C. Likevel burde utekompenseringskurven til hovedvarmen samkjøres med utekompenseringskurvene til romoppvarmingskretsene slik at gasskjelene kobles inn når det behøves. I Tabell 23 gis et forslag til en ny utekompenseringskurve for hovedvarmen, som visualiseres i Figur 41 med resterende utekompenseringskurver og opprinnelig kurve for hovedvarmen. Utekompenseringskurve er basert på at varmpumpens turtemperatur skal ligge noen grader over hovedvarmens kompenseringsskurve for å sikre at gasskjelen ikke slår inn hver gang varmpumpene sjalter og spisser unødvendig. I tillegg til at hovedvarmens turtemperatur er en til to grader over kompenseringsskurven til bygg B som har høyest temperaturkrav, slik at blandeventilen ikke er i konstant 100% åpen stilling. Endring av utekompenseringskurver i energisentralen er ikke noe driftsteknikerne på Bryne vgs. tidligere har gjort.

Tabell 23. Potensiell utekompenseringskurver for hovedvarmen.

<b>Dagens utekompenseringskurve:</b>	
<b>Utetemperatur [°C]</b>	<b>Settpunkt [°C]</b>
0	55
15	46
<b>Forslag til ny utekompenseringskurve:</b>	
<b>Utetemperatur [°C]</b>	<b>Settpunkt [°C]</b>
-10	62
15	48



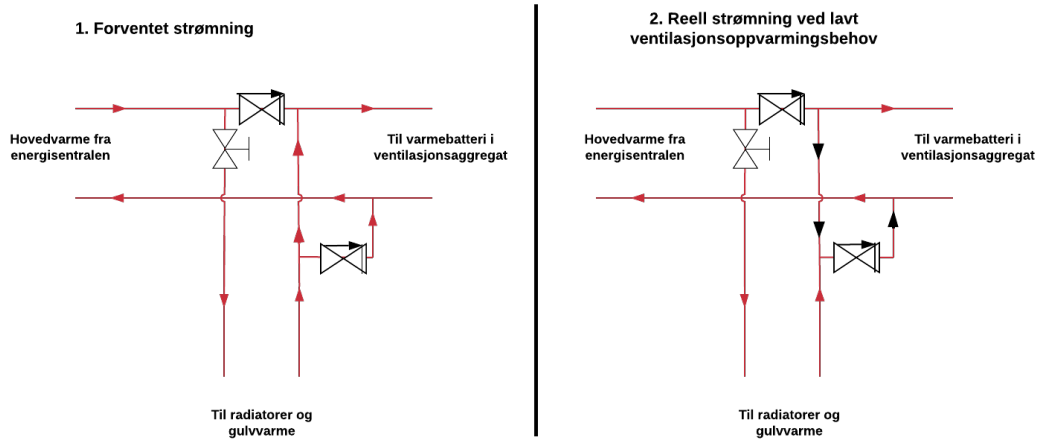
Figur 41. Potensiell utekompenseringskurve for hovedvarmen.

Ved sammenligning av hovedvarmens returtemperatur presentert i Figur 36 og returtemperaturen til de individuelle romoppvarmingskretsene presentert i Figur 37, Figur 38, Figur 39 og Figur 40 observeres det at hovedvarmens returtemperatur er betydelig høyere enn returtemperaturen i romoppvarmingskretsene. I bygg A og B finner man bypassen illustrert i Figur 42, når hovedvarmen forgreiner seg til separate kretser for romoppvarming og ventilasjonsoppvarming. Bypassen er installert for å utnytte overskuddsvarme fra returvann fra romoppvarmingen til ventilasjonsoppvarmingen.

For å sikre riktig vanntemperatur inn i varmebatteri i ventilasjonsaggregat blandes returvann fra varmebatteri med hovedvarmens turvann via blandeventiler (se Figur 65). Fra SD-anlegget observeres det at blandeventilene til varmebatteri i aggregat 360.01-06 i bygg A har for perioden hatt en maksimal åpning på 35%, og at blandeventilene er åpne svært kortvarig for alle aggregat utenom 360.06. For aggregat 360.11-13 i bygg B registreres det også svært kortvarig åpning av blandeventilene, men størrelsen på ventilåpningen varierer mellom 35% - 100%.

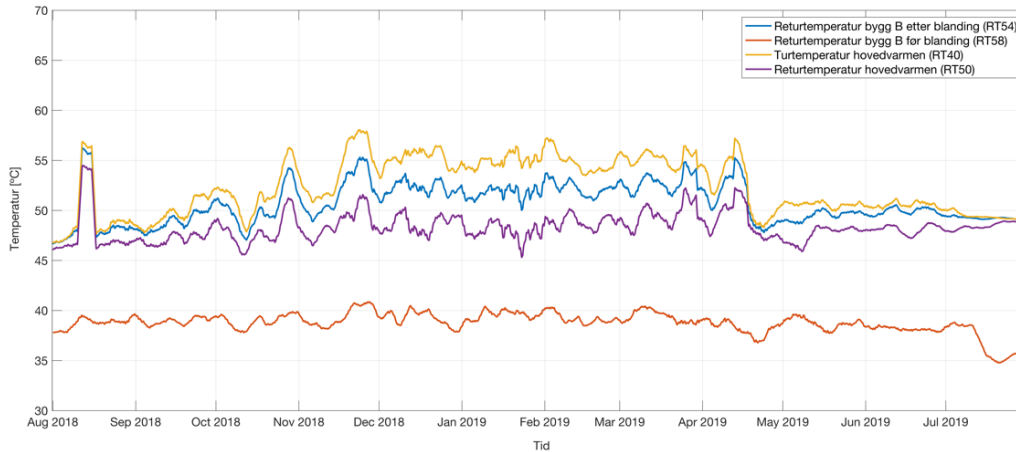
Dersom det ikke er behov for oppvarming av ventilasjonsluft står blandeventilene stengt, og det vil ikke være noe sirkulasjon i ventilasjonsoppvarmingskretsen. Dermed «trekkes» lite eller ingen vann mot varmebatteriene. Derfor går mest sannsynlig deler av eller all hovedvarmen via bypassen og direkte til returrøret. Det fører til at vann med høy temperatur blandes med vann med lavere temperatur. Selv om det tyder på at lavt behov for ventilasjonsoppvarming fører til blanding via bypass, er det avdekket i kapittel 4.1.2.1 at forbruket til ventilasjonsoppvarming i bygg A og B er mer enn prosjektert. Det er altså ikke et lavere ventilasjonsoppvarmingsbehov enn prosjektert som er årsaken til blandingen, men

man kan lure på om blanding via bypass rett og slett ikke var forutsett. I Figur 42 illustreres ønsket vannstrømning til venstre, og reell vannstrømning ved lavt varmebehov til ventilasjonsoppvarming til høyre.



Figur 42. Forventet strømning via bypass og reell strømning ved lavt ventilasjonsoppvarmingsbehov.

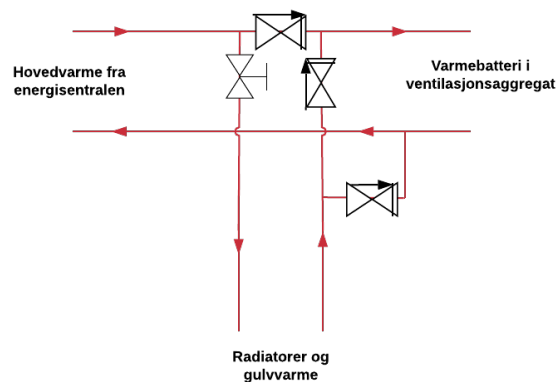
Figur 43 presenterer glidende gjennomsnitt for returtemperaturen i romoppvarmingskretsen i bygg B (RT58) før bypassen, returtemperaturen i rom- og ventilasjonsoppvarmingskretsen i bygg B etter bypassen (RT54) og hovedvarmens tur- og returtemperatur (RT40 og RT50). Se Figur 32 for plasseringen til de ulike temperaturfølerne. Fra Figur 43 kan det sees at returtemperaturen i bygg B etter blanding følger variasjonene i hovedvarmens turtemperatur tett. Hovedvarmens returtemperatur er lavere enn returtemperaturen i bygg B etter blanding, ettersom returvann fra bygg C med lavere temperatur er også blandet inn. Det er ikke tilgjengelig måling for returtemperaturen i bygg A etter blanding.



Figur 43. Glidende gjennomsnitt for returtemperatur bygg B før og etter bypass, og hovedvarmens tur – og returtemperatur.

Temperaturdifferansen mellom hovedvarmens tur – og returtemperatur er størst for månedene når det forventes størst varmebehov til ventilasjonsoppvarming, og nesten null for månedene når det forventes svært lite varmebehov for ventilasjonsoppvarming. Målt årlig gjennomsnittlig returtemperatur før og etter bypassen i bygg B er 38,7 °C (RT58) og 50,8 °C (RT54), og årlig gjennomsnittlig temperaturøkning på returvannet i bygg B er lik 11,9 °C.

Dersom det installeres en tilbakeslagsventil, som visualisert i Figur 44, vil hovedvarmens turvann ikke ha mulighet til å blandes med returvannet via bypassene når det er lavt energibehov til ventilasjonsoppvarming.

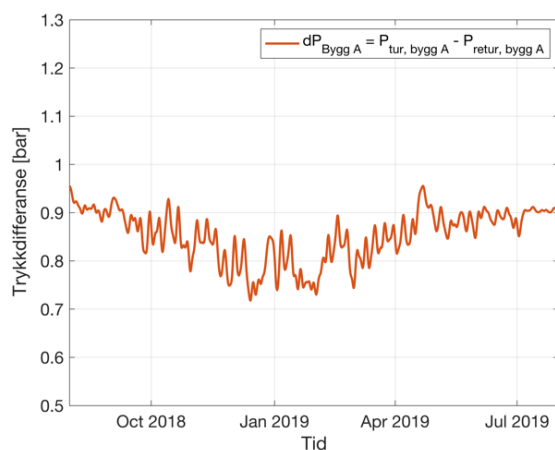


Figur 44. Bypass med installasjon av tilbakeslagsventil.

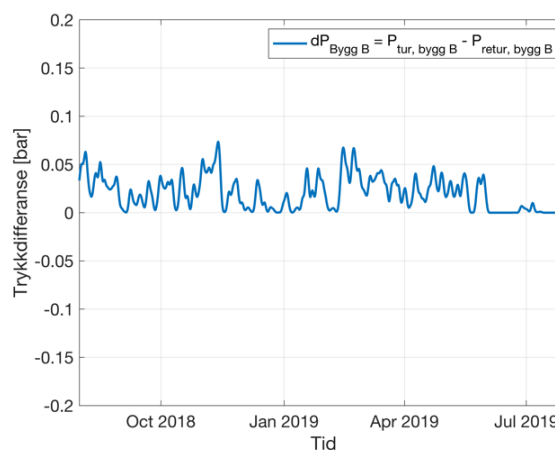
Energisystemet er prosjektert med både mengde – og temperaturregulering. Hoved tvillingpumpene (JP40/41, se Figur 32) i varmeanlegget transporterer hovedvarmen i energisystemet, og reguleres basert på hovedvarmens returtemperaturen (RT51) som er plassert rett før varmpumpene. På grunn av blandingen via bypassene er derimot ikke returtemperaturen representativ for varmebehovet i bygg A, B og C, slik at anlegget per dags dato ikke kan mengdereguleres som tiltenkt. Derimot, ved installasjon av tilbakeslagsventil i bypass vil også energisystemet mengdereguleres som opprinnelig planlagt.

I sammenheng med arbeidet med utekompenseringskurvene til romoppvarmingskretsene i bygg A og B observeres det i SD-anlegget at pumpene i romoppvarmingskretsene (JP42 og JP48, se Figur 32) har hatt maksimalt pådrag hele perioden. Pumpene er differansetrykk- og temperaturstyrt, da de arbeider mot å opprettholde et nesten konstant differansetrykk samtidig som pumpepådraget skal økes dersom returtemperaturen er under et visst settpunkt. Dersom pumpene står på 100% pådrag hele året skal det føre til spesielt høyt differansetrykk på sommerstid når energibehovet til romoppvarming er lavt. Vann vil pumpes mot radiatorenes stengte aktuatorer. Trykket i røret hvor vannet transporteres til radiatorene øker, mens trykket i røret hvor vannet transporteres vekk fra radiatorene vil være lavt. Dette kan medføre skade på utstyret, i tillegg til å resultere i et unødvendig høyt energiforbruk til pumper.

Figur 45 og Figur 46 presenterer glidende gjennomsnitt for trykkdifferansen mellom tur- og returrør til romoppvarming i bygg A og B. I Figur 45 kan man se at det faktisk opprettholdes et relativt konstant differansetrykk på ca. 0.8 bar i romoppvarmingskretsen i bygg A for hele perioden. Det er dermed tydelig at det er noe feil med målingen av pumpepådraget JP42, da pumpen ikke kan gå på 100% hele perioden og opprettholde et tilnærmet konstant differansetrykk. I Figur 46 kan man se at trykkdifferansen i romoppvarmingskretsen i bygg B varierer mellom 0 bar og 0.1 bar. Med et såpass lavt differansetrykk vil man anta at man har full gjennomstrømning gjennom alle radiatorene, noe som ikke stemmer. Det er svært sannsynlig at det er noe feil med målingen til trykkgivere PT43 og PT53, i tillegg til målingen til pumpepådraget til pumpe JP48 og JP42 i bygg A.



Figur 45. Glidende gjennomsnitt for trykkdifferansen mellom tur- og returrør til romoppvarming i bygg A.



Figur 46. Glidende gjennomsnitt for trykkdifferansen mellom tur- og returrør til romoppvarming i bygg B.

#### 4.2.4 Endring i varmepumpenes COP grunnet bypass i bygg A og B

Energi har ulik kvalitet som kan inndeles i eksergi og anergi. Eksergi er andelen av en energimengde som gjennom en reversibel (tapsfri) prosess fullt ut kan omformes til hvilken som helst annen energiform, mens anergi er den delen av en energimengde som ikke kan omformes. For å drive varmepumpeprosessen tilføres en eksergimengde tilsvarende varmebehovets eksergiandel, mens hele anergiandelen tas opp fra varmekilden.

Eksergiandelen i en varmemengde (%) øker med temperaturnivået, da det behøves mer eksergi å varme vann opp fra f.eks. 40 °C til 60 °C, fremfor 40 °C til 50 °C (Stene, 2018a).

Bypassen i bygg A og B fører til at vann med høy temperatur blandes med vann med lavere temperatur, og det oppstår dermed et uønsket og irreversibelt eksergitap.

Det er forsøkt å kartlegge hvilke konkrete konsekvenser blandingen og hovedvarens høye returtemperatur har for energisystemet, og det er valgt å se spesielt på påvirkningen hovedvarens returtemperatur har for underkjølingen av arbeidsmediet i varmepumpene. Underkjølingsvarmeveksleren er plassert mellom kondensator og ekspansjonsventil i hver varmepumpe, og reduserer temperaturen på arbeidsmediet ved å overføre varme fra arbeidsmediet til vannet som er på vei inn i kondensatoren. Varmeytelsen til varmepumpen øker, i tillegg vil en redusert temperatur på arbeidsmediet føre til mindre temperaturdifferanse over ekspansjonsventilen, som igjen reduserer strupingstapet. Underkjøling er spesielt gunstig for det aktuelle arbeidsmediet R134a, som typisk har høyt strupingstap (Enova SF et al., 2011).

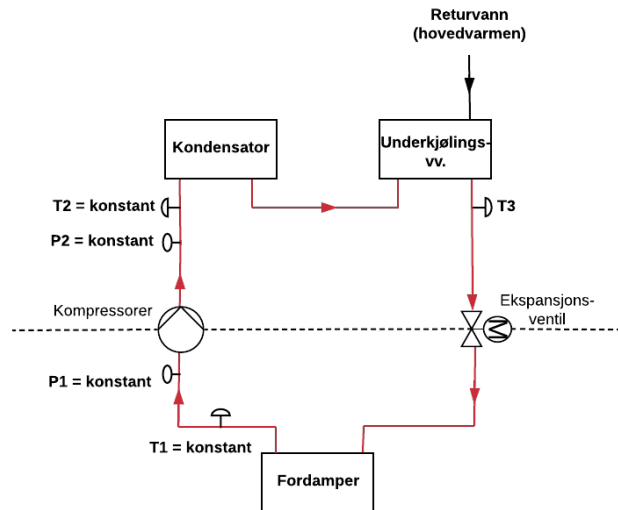


Ved bruk av beregningsverktøyet CoolPack er COP estimert for ulike temperaturer på arbeidsmediet ut av underkjølingsvarmeveksleren, ved å fremstille prosessforløpet til en forenklet modell av varmepumpene i log-ph diagram. Ved estimering av COP i CoolPack er det gjort følgende forutsetninger; det er forutsatt at trykket på høytrykkssiden er kun bestemt av settpunkttemperaturen til varmepumpen, så ved konstant settpunkttemperatur antas konstant trykk. Det er i likhet antatt at trykket på lavtrykkssiden kun er bestemt av temperaturen til varmekilden, og ved konstant temperatur på varmekilden antas et konstant trykk. Det er forutsatt en sammenheng mellom hovedvarmens returtemperatur inn i underkjølingsvarmeveksleren og arbeidsmediets temperatur før ekspansjonsventilen, og ved en endring i hovedvarmens returtemperatur på 1°C vil arbeidsmediets temperatur også endres med 1°C.

Tabell 24 oppsummerer verdiene brukt som inndata i CoolPack som er målt 07.01.19 kl. 15:19 for varmepumpe IK01, og er valgt ettersom størrelsen på verdiene ligger i nærhet av målt årlig gjennomsnittlig verdier. I Figur 4 i metodekapittelet er prosessforløpet ved driftsbetingelsene presentert i Tabell 24 fremstilt i log ph- diagram. Figur 47 illustrerer den forenklete modellen av varmepumpene og temperatur- og trykkforholdene som er brukt som utgangspunkt i estimeringen. COP er estimert i CoolPack ved å redusere temperaturen på arbeidsmediet ut av underkjølingsvarmeveksleren (T3) med 1°C for hver estimering, mens resten av inndataen holdes konstant.

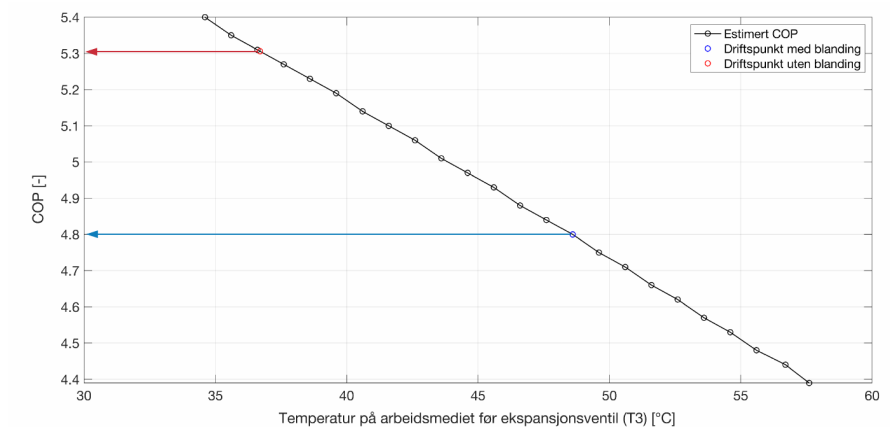
Tabell 24. Driftsbetingelser brukt til estimering av COP i CoolPack ved varierende temperatur på hovedvarmens returvann.

ID	Beskrivelse	Målerverdi	Driftsforhold
T1	Arbeidsmediets temperatur etter fordampere	5,7 °C	Konstant
T2	Arbeidsmediets temperatur etter kompressorer	85,5 °C	Konstant
T3	Arbeidsmediets temperatur før ekspansjonsventil	48,6 °C	Varyerer
P1	Trykk lavtrykksside	2,9 bar(a)	Konstant
P2	Trykk høytrykksside	15 bar(a)	Konstant



Figur 47. Forenklet modell av varmepumpene for estimering av COP i CoolPack ved varierende temperatur på hovedvarmens returvann.

Figur 48 presenterer resultatene fra estimering av COP i CoolPack. COP er estimert til å synke med i gjennomsnitt 0,9 % per °C økning av hovedvarmens returtemperatur på grunn av blanding via bypassene. Blått punkt illustrerer estimert COP med blanding. Rødt punkt illustrerer estimert COP uten blanding når det antas at bypassene fører til at hovedvarmens returtemperatur øker med 11,9 °C, som er størrelsen på temperaturøkningen på returvannet i bygg B. Basert på forutsetningen gjort for estimeringen vil hovedvarmens temperaturøkning føre til at arbeidsmediets temperatur før ekspansjonsventilen også øker med 11,9 °C, som gir en total reduksjon i COP på 10,7%. Estimerte verdier for COP er noe høy, men verdiene ligger innenfor intervallet for beregnet SCOP presentert i Tabell 20.



Figur 48. Estimert endring i COP ved økende temperatur på arbeidsmediet ut av underkjølingsvarmeveksleren som er et resultat av temperaturøkningen til hovedvarmens returtemperatur på grunn av blanding via bypassene.

Med utgangspunkt i resultatene beregnes potensielt spart elektrisk energi uten blanding på følgende måte:

$$E_{VP,spart} = \frac{Q_{VP}}{SCOP_{opprinnelig}} - \frac{Q_{VP}}{SCOP_{modifisert}} \quad (4)$$

Det er brukt målte verdier for produsert varmeenergi  $Q_{VP}$ , tilført elektrisk energi  $E_{VP}$  og opprinnelige SCOP presentert i Tabell 20. Ved en økning i COP på 10,7 % er potensielt spart elektrisk energi per varmepumpe beregnet til å være:

$$E_{IK01,spart} = \frac{776561}{4,1} - \frac{776561}{4,5} = 16 \cdot 10^3 \text{ kWh}$$

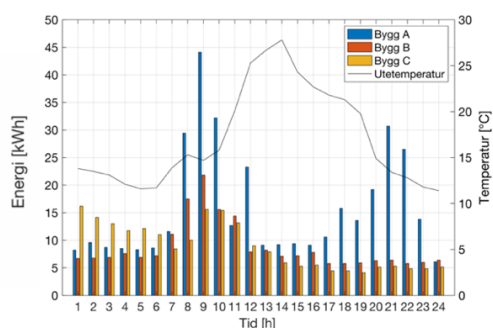
$$E_{IK02,spart} = \frac{572071}{4,3} - \frac{572071}{4,8} = 13 \cdot 10^3 \text{ kWh}$$

Dermed, basert på estimert COP i CoolPack kunne det potensielt vært spart totalt  $29 \cdot 10^3$  kWh i driftsåret 01.08.2018 – 31.07.2019 dersom blanding kunne vært unngått. Derfor ansees inntjeningstiden for installasjon av tilbakeslagsventiler i bypassene som neglisjerbar.

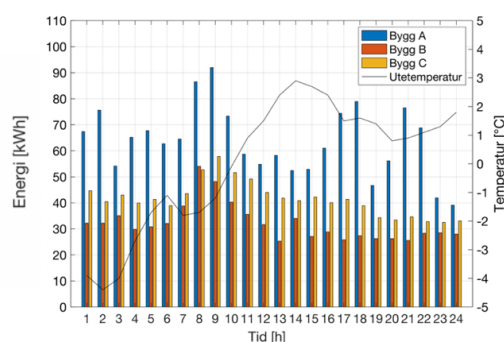
#### 4.2.5 Temperatursettpunkt på romnivå for romoppvarming

I tillegg til utekompensert regulering i energisentralen og varmesentraler i hvert bygg, er det også individuell regulering i hvert rom som følge av varierende mengde tilført varme fra andre kilder. Varmepådrag fra radiatorer reguleres basert på to ulike settpunkt per rom, basis- og aktuelt settpunkt. Basis settpunkt gjelder uten tilstedeværelse, mens aktuelt settpunkt gjelder ved tilstedeværelse og kan justeres opp og ned et par grader fra styringspanel i noen av rommene. Når det innføres nattsinking endres aktuelt settpunkt i bygg A og B til 21 °C, og overstyrer basis settpunktet. Som presentert i delkapittel 4.1.2.1 varierer aktuelt og basis settpunkt hovedsakelig mellom 21-22 °C, og 20-22 °C i driftstiden, foruten i verksted i bygg C hvor settpunktet er 19 °C hele døgnet. Det resulterer i at de fleste rom ha et konstant temperatursettpunkt på 21 °C gjennom hele døgnet.

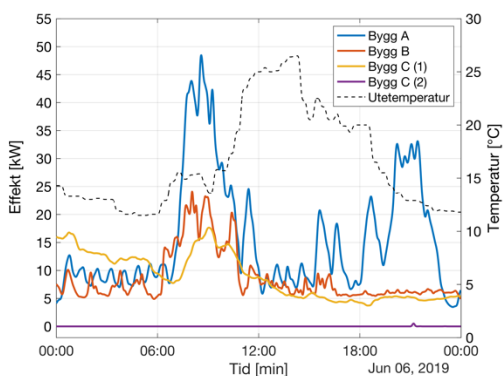
Figur 49 og Figur 50 presenterer energiforbruket til romoppvarming på en av de kaldeste og varmeste dagene i analyseperioden, tirsdag 29. januar og torsdag 06. juni. Figur 51 og Figur 52 presenterer glidende gjennomsnitt for effektforbruket til romoppvarming de samme dagene. Figurene inneholder også utetemperatur. Foruten økt effekt – og energiforbruk i tidsperioden 08:00 – 10:00, er forbruket nesten identisk i og utenfor driftstid for bygg B og C. For bygg A registreres det flere effekttopper i løpet av begge døgn, foruten den forventede effekttoppen ved driftsstart som gjenkjennes for bygg B og C også. For begge døgn observeres en effekttopp i perioden når nattsenkingen innføres, og det mistenkes at rom med basis settpunkt lik 20 °C opplever en temperaturheving når nattsenkingen starter.



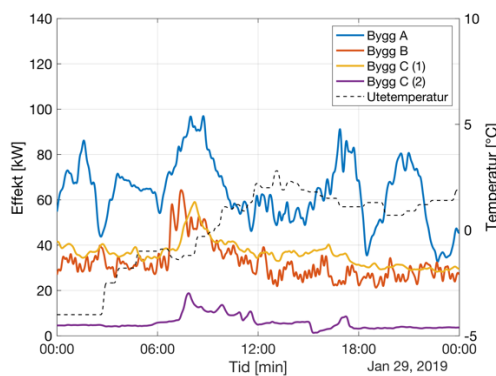
Figur 49. Energiforbruk til romoppvarming og utetemperatur den 06.06.19.



Figur 50. Energiforbruk til romoppvarming og utetemperatur den 29.01.19.



Figur 51. Effektforbruk til romoppvarming og utetemperatur den 06.06.19.



Figur 52. Effektforbruk til romoppvarming og utetemperatur den 29.12.19.

Nattsenking er et sentralt ENØK-tiltak, og innføring av nattsenking til 19 °C i likhet med energiberegningene kan potensielt resultere i energisparing. Små til mellomstore rom med relativt lett konstruksjon vil ha størst gevinst av nattsenking, ettersom romtemperaturen vil synke raskt og man vil kunne øke temperaturen innen rimelig tid med moderat effekt. Større

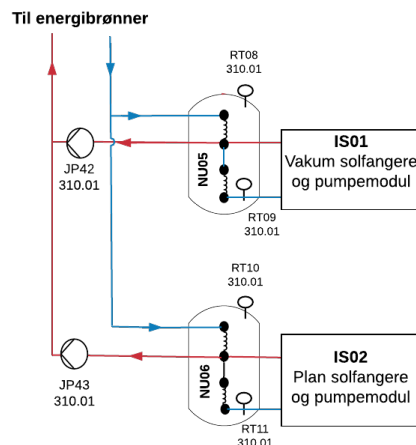
og trege rom trengs det høyere effektforbruk over lenger tid for å heve romtemperaturen et par grader, og optimalt sett burde slike rom ekskluderes fra nattsinking. Det er utfordrende å konkludere med om en reduksjon i nattsinkingstemperatur fører til energisparing eller ei, uten å gjennomføre energisimuleringer med dagens driftsbetingelser. Driftsteknikerne kan gjennomføre forsøk hvor nattsinkingen reduseres i en gitt periode, for å så observere energi- og effektforbruket. Nattsinking kan også eventuelt stoppes ved utetemperaturer lavere enn 0 °C, for å unngå de største effekttoppene.

#### 4.2.6 Opprinnelig strategi for tilbakeføring av varme i energibrønnene

Energibrønnene er dimensjonert for en jevn tilbakelading over året for å opprettholde en god energibalanse. Det var planlagt at varme fra solfangeranlegget og avkastvarme fra ventilasjonsaggregat i bygg A skulle brukes til tilbakelading av brønnene. I tillegg til varme fra frikjøling av bygningsmassene i bygg B og C, og gjenvunnet kondensatorvarme fra kjølemaskinene brukt til prosesskjøling. Som nevnt i kapittel 4.1.2.1 er reguleringen av varmegjenvinnerne i ventilasjonsaggregat justert for å øke tilbakeføringen av varme til energibrønnene. Derfor er bidraget fra solfangeranlegget og ventilasjonsaggregat for tilbakeføring av varme til energibrønnene undersøkt. Det er ikke tilgjengelig måling av mengden tilbakeført solvarme eller avkastvarmen, derfor er varigheten for tilbakeføringen undersøkt.

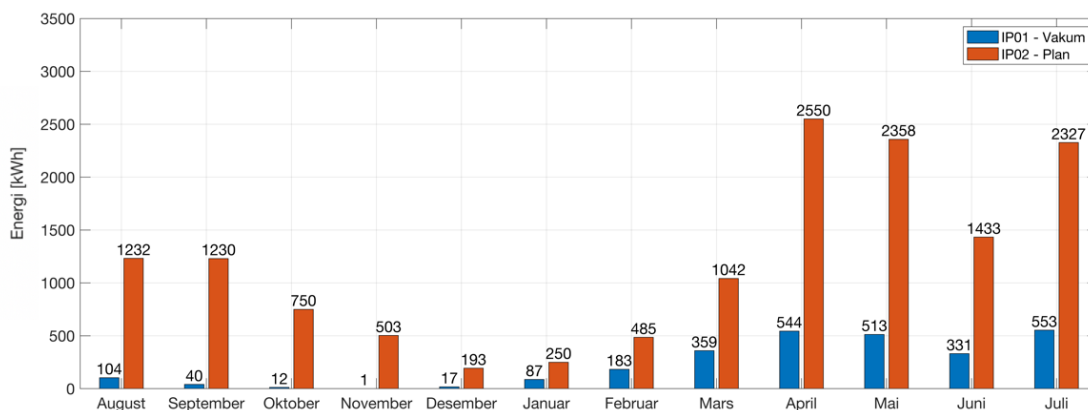
##### 4.2.6.1 *Tilbakeføring av solvarme i energibrønnene*

Figur 53 viser feltkomponentene som er brukt for å undersøke tilbakeføringen av solvarme. Varmen fra solfangerne benyttes til oppladning av energibrønnene dersom temperaturfølerne i bunnen av solfangertankene NU05/06 er over 50 °C og ventiler 310.01- SC43/44 (se Figur 9) for tilførsel av solvarme til akkumulering av tappevann er stengt. Da startes tilbakeføringen ved at pumpe JP42 og/eller JP43 starter, og tilbakeføringen stanser dersom temperaturen i toppen av akkumuleringstank NU05/06 er under 45 °C.



Figur 53. System for tilbakeledning av energibrønner med solvarme fra plan- og vakumsolfangere.

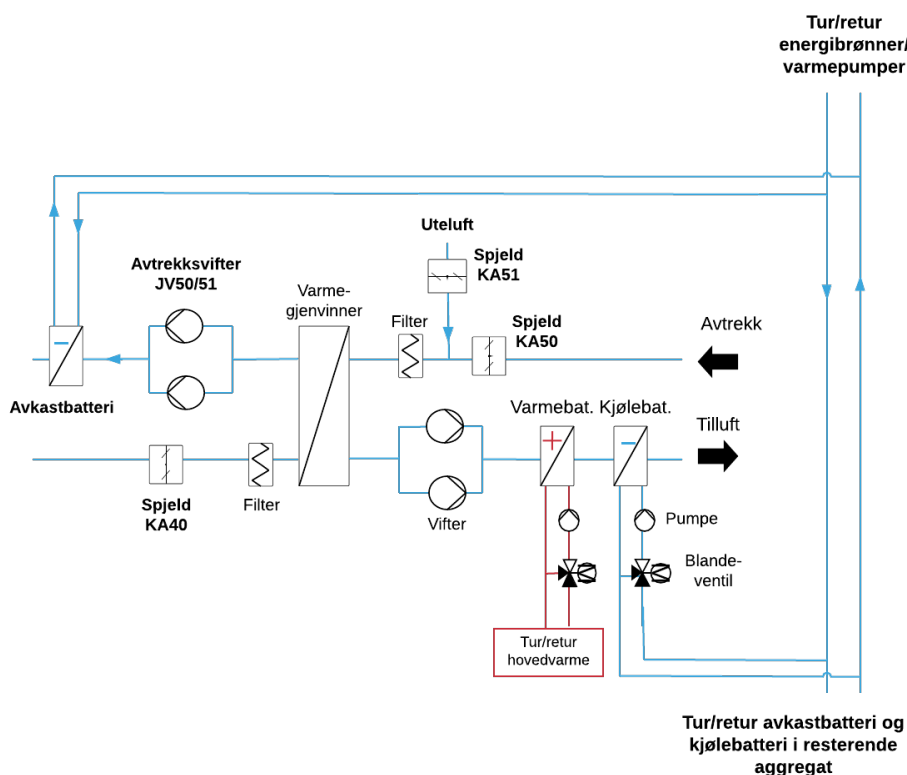
I løpet av perioden er det tilbakeført solvarme ca. 280 timer fra plansolfangere og 20 timer fra vakumsolfangerne. Figur 54 presenterer verdier for energiproduksjonen til vakum- og plansolfangerne hentet fra EOS. Det var prosjektert en total årlig energiproduksjon på 42117 kWh fra solfangeranlegget (Asplan Viak AS, 2012a). For perioden har vakumsolfangerne produsert 2744 kWh og plansolfangerne produsert 14354 kWh, som tilsammen utgjør totalt 17098 kWh. Den totale energiproduksjonen er 59% lavere enn prosjektert. Driftsteknikeren på Bryne vgs. har informert om at det ble gjennomført service på både plan- og vakumsolfangerne vinter 2019, uten at årsaken til vakumsolfangerne lave energiproduksjon ble avdekket. En stor del av solvarmens planlagte bidrag til opplading av energibrønnene må dermed dekkes av andre varmekilder.



Figur 54. Energiproduksjon vakum- og plansolfangere 01.08.2018 – 31.07.2019 hentet fra EOS.

#### 4.2.6.2 Tilbakeføring av avkastvarme i energibrønnene

Figur 55 viser oppbygningen av ventilasjonsaggregat 360.01 i bygg A som er identisk med aggregat 360.02 - 04. Aggregatene brukes til tilbakeføring av varme til energibrønnene utenfor driftstiden. Dersom utetemperaturen er 5 °C høyere enn turtemperaturen på kollektorvæsken fra energibrønnene (350.01-RT52) vil avkastbatteri plassert etter viftene i aggregatene hente varme fra avkastluften og tilbakeføre varmen til energibrønnene ved at ventiler 350.01-SC41/51 åpnes og ventiler 350.01-SC40/50 stenges (se Figur 9). Da går avkastvarmen direkte til energibrønnene og ikke til varmpumpene slik som i driftstiden. Spjeld KA51 åpnes, avtrekksvifter JV50/51 starter og ventil SB42 åpnes. Sekvenser blir motsatt når temperaturdifferansen er mindre enn 2 °C. Utenfor driftstiden er inntak – og avtrekkspjeld KA40/50 stengt. Ventilasjonsaggregatene driftes 06:30 – 21:00 i ukedager, og aggregat 360.02-03 driftes også fra 08:00-19:00 på lørdager.



Figur 55. Ventilasjonsaggregat 360.01 som er identisk med aggregat 360.02-04.

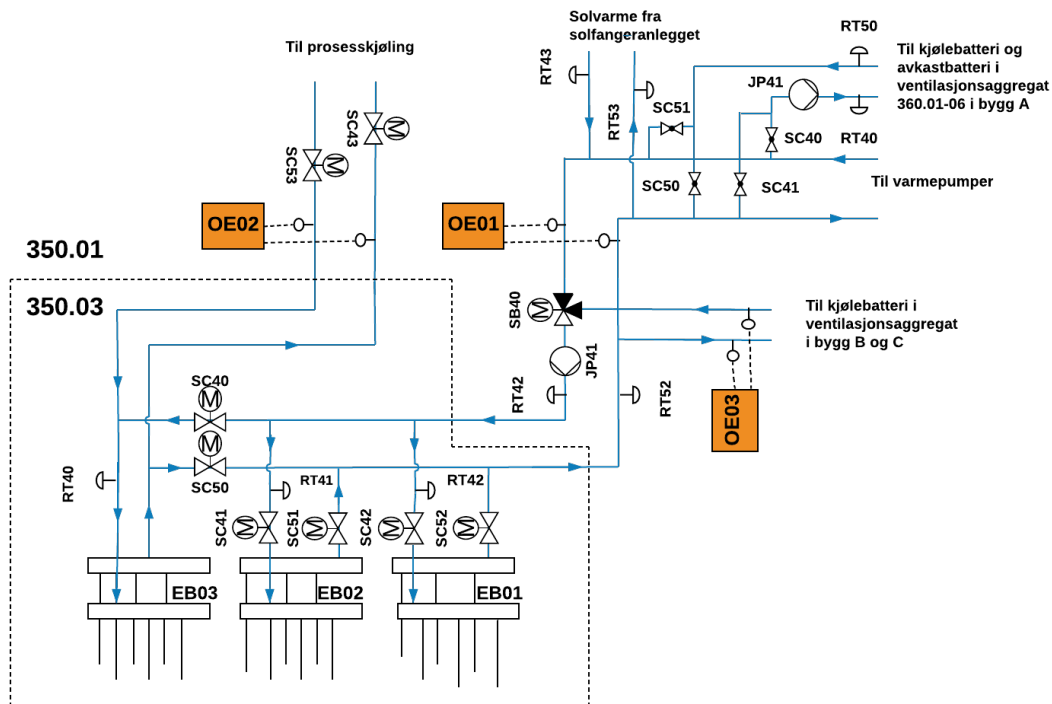
Fra og med driftsstart i 2014 og frem til oktober 2019 er det tilbakeført avkastvarme 750 timer fra aggregat 360.01-04. Sist gang det var tilbakeført avkastvarme var i juli 2018, etter en periode på ca. 3 år uten noe aktivitet. Som presentert i delkapittel 4.2.2 har kollektorvæsken fra energibrønnene relativt høy temperatur gjennom hele året. Det føre mest sannsynlig til at temperaturdifferanse på 5 °C mellom utetemperaturen og turtemperaturen til kollektorvæsken fra energibrønnene oppstår svært sjeldent utenfor aggregatenes driftstid. Avkastvarens planlagte bidrag til opplading av energibrønnene må dekkes av andre varmekilder.

#### 4.2.7 Energibalansen i brønnene

Energibrønnene er dimensjonert for en jevn tilbakeføring av varme gjennom driftsåret for å opprettholde en god energibalanse. Per dags dato brukes hovedsakelig varme fra frikjøling av bygningsmassene, noe solvarme og gjenvunnet kondensatorvarme fra kjølemaskinene brukt til prosesskjøling.

Tabell 25 presenterer en sammenligning mellom målte verdier for uttak og tilbakeføring av varme til energibrønnene, samt hvor mange prosent av varmemengden hentet fra brønnene som føres tilbake. Verdiene målt av energimålere 350.01-OE02 og 350.01-OE03 er hentet fra EOS, mens verdiene målt av energimåler 350.01-OE01 er beregnet ved bruk av Matlab og fremgangsmåten presentert i Vedlegg C. Figur 56 er en prinsippskisse av grunnvarmeanlegget 350.03 og deler av kjøleanlegget for rom- og ventilasjonsoppvarming 350.01, og viser plasseringen til energimålerne. Driftsperioden er definert fra 01.08 til 31.07 påfølgende år. Fra og med 11.07.2017 er det registrert forbruk i bygg C.





Figur 56. Prinsippskisse av grunnvarmeanlegg 350.03 og deler av kjøleanlegg for rom- og ventilasjonsoppvarming 350.01.

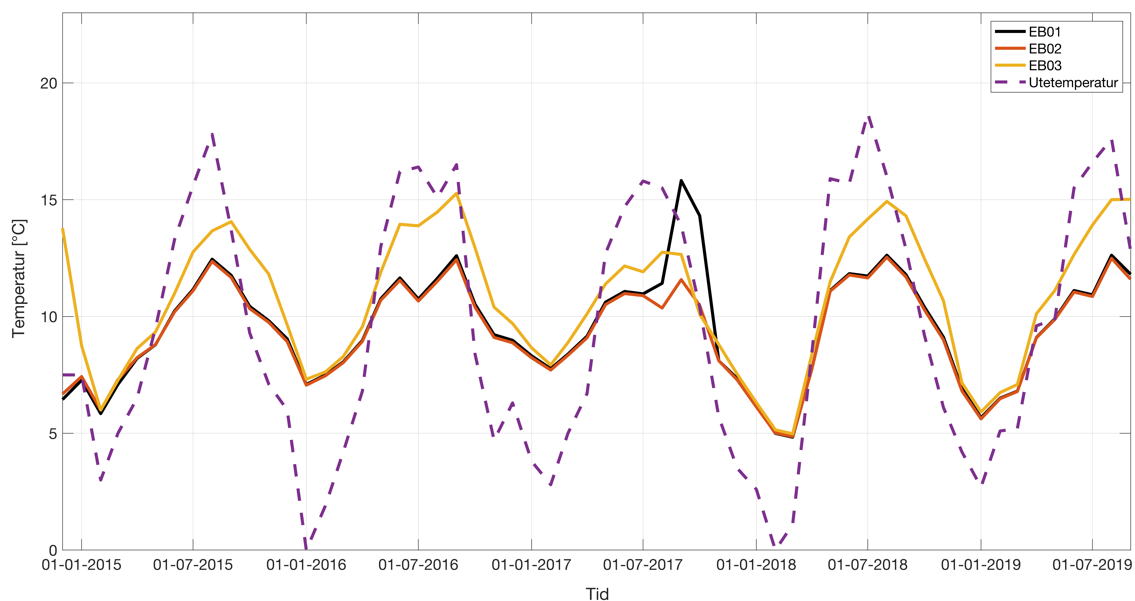
Tabell 25. Varmemengden hentet fra og tilbakeført til energibrønnene.

2018-2019	OE01 [kWh]	OE02 [kWh]	OE03 [kWh]	Sum [kWh]
Uttak	344810	-	-	344810
Tilbakeledning	61501	92327	150027	303855
<b>Tilbakeledning i prosent av uttak [%]</b>				<b>88,1%</b>
2017-2018	OE01	OE02	OE03	Sum målt
Uttak	391850	-	-	391850
Tilbakeledning	55226	76059	176667	307952
<b>Tilbakeledning i prosent av uttak [%]</b>				<b>78,9%</b>
2016-2017	OE01	OE02	OE03	Sum målt
Uttak	214510	-	-	214510
Tilbakeledning	59660	87471	104719	251850
<b>Tilbakeledning i prosent av uttak [%]</b>				<b>117,41%</b>
2015-2016	OE01	OE02	OE03	Sum målt
Uttak	172820	-	-	172820
Tilbakeledning	97391	103763	81466	282624
<b>Tilbakeledning i prosent av uttak [%]</b>				<b>163,5%</b>

Fra arbeidsnotat utarbeidet av Asplan Viak under dimensjoneringen av energibrønnene er det prosjektert en prosentvis tilbakelading på 72% av uttaket (Asplan Viak AS, 2012a). Det er tilbakeført en større andel enn dimensjonert mengde for alle driftsår. Dagens strategi for tilbakeføring av varme til brønnene fungerer godt. Justert regulering av varmegjenvinnere i ventilasjonsaggregat sikrer tilstrekkelig med varme, og utgjør mellom 49 – 57% av totalt tilbakeført varme fra og med driftsåret 2017-2018. Stor tilbakeføring av varme gir høyere varmeytelse og COP for varmpumpene, men det vil også redusere energibrønnenes frikjølingsleveransen på grunn av økende temperatur på kollektorvæsken (Stene, 2018b). Mengden tilbakeført varme burde derfor ikke overstige prosjektert verdi med for mye og over for lang tid.

#### 4.2.8 Temperaturutvikling i energibrønnene

Temperaturen til kollektorvæsken er gitt av varmeuttak/-leveranse fra/til grunnen, berggrunnenes egenskaper, borehullssystemet og driftsbetingelser (Stene, 2018b). Figur 60 illustrerer gjennomsnittstemperaturen på kollektorvæsken i energibrønnene i samlestokk EB01, EB02 og EB03 for perioden des. 2014 til sept. 2019. Kombinert med gjennomsnittlig utetemperatur. Uforstyrret temperatur i grunnen er 8,4 grader. Fra og med 11.07.2017 er det registrert forbruk i bygg C.



Figur 57. Glidende gjennomsnitt for månedsverdier for temperaturen til kollektorvæsken i samlestokk EB01, EB02 og EB03, kombinert med utetemperaturen.

Gjennomsnittstemperaturen til kollektorvæsken i samlestock EB01 og EB02 er for det meste lik, foruten i perioden 31.august til 03.november 2017. Da observeres det spesielt høy temperatur på kollektorvæsken i samlestock EB01. Temperaturen på kollektorvæsken i EB01, foruten brønn 16 og 11, øker gradvis fra 10 °C til 15 °C den 31.august. Så dropper temperaturene plutselig fra 14 °C til 9 °C kl. 04:45 den 3.november. Det antas at de høye temperaturene for perioden er grunnet feilmålinger, da det spesielt er usannsynlig at temperaturen dropper 5 °C fra ett sekund til neste.

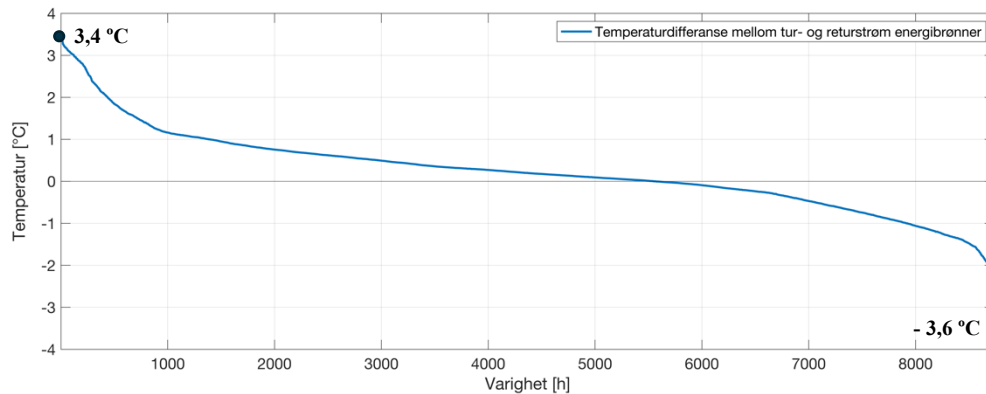
Tabell 26 presenterer gjennomsnittstemperaturen på kollektorvæsken i energibrønnene for driftsåret august – juli, fra 2015 til 2019. Basert på verdiene presentert i tabellen og Figur 57 er det ingen tydelig trend for at temperaturene i brønnene øker eller synker. Temperaturen i energibrønnene burde derimot overvåkes slik at eventuelle fremtidige trender oppdages fortløpende.

Tabell 26. Gjennomsnittstemperatur på kollektorvæsken i samlestock EB01, EB02 og EB03 for driftsperioden august til juli, fra 2015 til 2019.

Driftsperiode:	EB01 [°C]	EB02 [°C]	EB03 [°C]
1.08.2018 – 31.07.2019	9,24	9,17	10,59
1.08.2017 – 31.07.2018	9,62	9,84	9,64
1.08.2016 – 31.07.2017	9,94	9,84	11,15
1.08.2015 – 31.07.2016	9,86	9,79	11,21

#### 4.2.9 Volumstrøm i energibrønnene

Figur 58 presenterer en varighetskurve for temperaturdifferansen mellom tur- og returstrømmen til samlestock EB01, EB02 og EB03, som er målt av temperaturfølere 350.03-RT41 og 350.03 - RT51 (se Figur 56). Positiv temperaturdifferanse forekommer når det hentes energi fra brønnene, og negativ temperaturdifferanse forekommer når det tilbakeføres energi til brønnene. Det er dimensjonert en temperaturdifferanse mellom tur- og returstrømmen til energibrønner på 4 °C, men den reelle temperaturdifferansen er maksimalt 3,6 °C.



Figur 58. Varighetskurve for temperaturdifferanse mellom tur- og returstrømmen til energibrønnene for periode 01.08.2018 til 31.07.2019.

Berggrunnen og energibrønnpotensialet ble analysert av Asplan Viak i 2012 ved gjennomføring av en termisk responstest (TRT). Testen avdekket en effektiv ledningsevne på 3,7 W/mK, som er noe høyere sammenlignet med vanlige norske bergarter. Det avdekket også en termisk borehullsmotstand på 0,075 mK/W (Asplan Viak AS, 2012c). I energibrønnene benyttes det enkel U-turbokollektor som øker turbulensgraden for kollektorvæsken og gir bedre varmeovergangstall og lavere trykktap sammenlignet med glattrørkollektor (Stene, 2018b). Det benyttes propylenglykol med 30% glykol som kollektorvæske i energibrønnene. Med en konsentrasjon på 30% er frysepunktet til kollektorvæsken -13 °C (Asplan Viak AS, 2012b). Propylenglykol er en organisk frostvæske som hverken er giftig eller brennbar (Fine et al., 2018), derimot har frostvæsken høy viskositet ved lavere temperaturer, noe som påvirker pumpedrift og strømmingen til væsken (Solar365, 2019). Høy viskositet fører til et lavere Reynolds tall og mer laminær strømming. Reynolds tall er en dimensjonsløs faktor som uttrykker graden av turbulens i en strømming (Norsk Vann BA, 2013). I energibrønner ønsker man at kollektorvæskens strømming skal være i overgangen mellom laminær og turbulent for å oppnå optimal varmeoverføring og trykktap, og det anbefales en væskestrømming på 0,5 – 0,65 l/s (Ramstad, 2017).

Væskestrømmingen per brønn er undersøkt og presentert i Tabell 27, i tillegg er graden av turbulens per brønn beregnet. Formel for utregning av Reynolds tall og egenskaper til kollektorvæsken er presentert i Vedlegg J. Dimensjonerende volumstrøm er 0,51 l/s per brønn. Dersom ventiler 350.03-SC40/50 er åpne brukes EB03 sammen med EB01 og EB02, dersom ventilene er lukket brukes EB03 til prosesskjøling. For begge tilfeller er likevel

beregnet Reynoldstall for gjennomsnittlig volumstrøm større enn 2300, som indikerer at strømmingen er i overgangen mellom laminær og turbulent (Melinder, 2007).

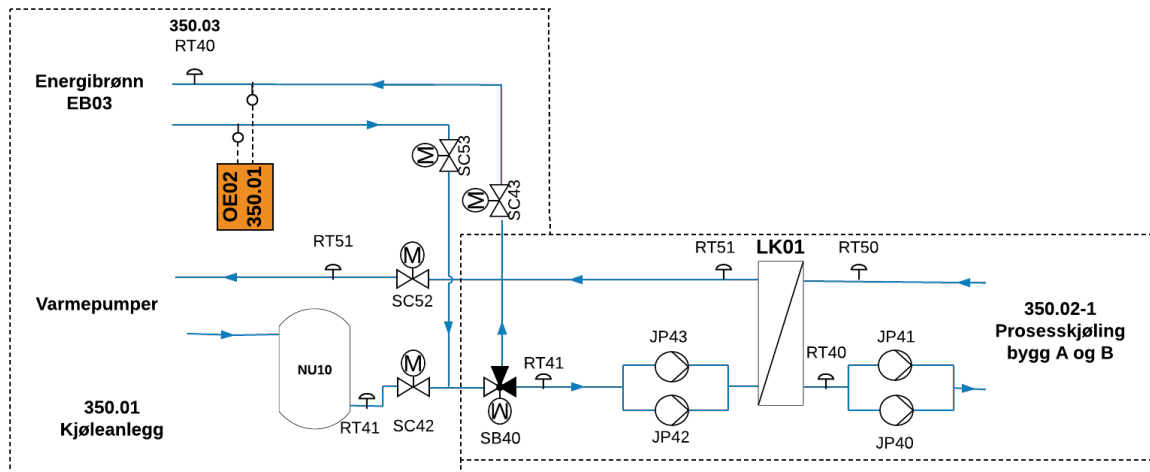
Tabell 27. Væskestømming i energibrønnene.

Ventiler SC40/50	Lengde per brønn	Antall brønner	Gjennomsnittlig volumstrøm per brønn	Reynolds tall
Åpne	200 m	33	0,45 l/s	2412
Lukket	200 m	27	0,63 l/s	3378

#### 4.2.10 Reguleringsstrategi for bruk av samlestock EB03 til prosesskjøling

Figur 59 presenterer delsystemet for prosesskjøling 350.02, samt deler av delsystemet 350.01 kjøleanlegg for ventilasjonskjøling. Energibrønnene er som tidligere nevnt fordelt på tre ulike samlestocker; EB01 (16 borehull), EB02 (12 borehull) og EB03 (6 borehull). EB03 benyttes enten direkte til prosesskjøling eller i kombinasjon med EB01 og EB02 som energikilde til varmpumpene og til frikjøling i bygg B og C. Vanligvis benyttes isvannet fra varmpumpenes fordampertløp til prosesskjøling. Dersom temperaturen på isvannet er høyere enn 9 °C stenges ventiler 350.01 – SC42/52 og ventiler 350.01 – SC43/53 åpnes (se Figur 59). Da brukes kollektorvæske fra samlestock EB03 til prosesskjøling.

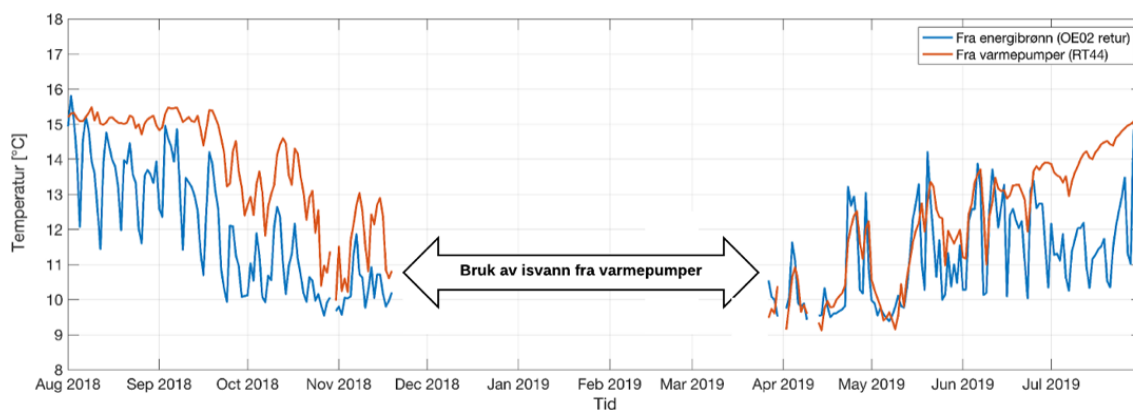
Samlestock EB03 er brukt sammen med EB01 og EB02 ca. 4500 timer i løpet av driftsårets 8760 timer. Kollektorvæsken brukes sjeldent til prosesskjøling på vinterstid, ettersom varmebehovet er størst i disse månedene driftes varmpumpene ofte på høy intensitet og temperaturen på utgående isvann er tilstrekkelig lav. På sommerstid når varmpumpene driftes med lavere intensitet er brønn EB03 prioritert prosesskjøling.



Figur 59. Prinsippskisse av delsystem for prosesskjøling 350.02.

Temperaturen på turvannet til prosesskjøling målt av 350.02-RT40 (se Figur 59) er spesielt høy for perioden det brukes kollektorvæske fra EB03. For perioden er det målt en gjennomsnittstemperatur på turvannet til prosesskjøling på 17,9 °C. Økt temperatur på turvannet til prosesskjøling fører til et større temperaturløft for kjølemaskinene og for hver Kelvin økning i kondenseringstemperaturen eller senkning i fordampningstemperaturen avtar COP med 2 - 3% (SINTEF Byggforsk, 2009).

Figur 60 presenterer glidende gjennomsnitt for temperaturen på isvannet fra varmpumpene og temperaturen på kollektorvæsken fra samlestokk EB03, i perioden kollektorvæsken fra EB03 brukes til prosesskjøling. Det vises at det er ofte isvannet har en høyere temperatur enn temperatursettpunktet på 9 °C, men at isvannets temperatur fortsatt er lavere enn temperaturen til kollektorvæsken fra EB03. En reguleringsstrategi som sikrer at væsken med lavest temperatur brukes til prosesskjøling, som for eksempel ved regulering etter temperaturredifferanse mellom kollektorvæsken og isvannet, vil føre til lavest mulig temperaturløft for kjølemaskinene. Det vil gi en forbedret COP og reduksjon i energikostnader.



Figur 60. Temperatur tur prosesskjøling (350.02-RT40), isvann fra VP (350.01-RT44) og kollektorvæske fra energibrønner (350.01-OE02 retur).

Uavhengig av om det er kollektorvæske eller isvann som benyttes til prosesskjøling måler temperaturføler 350.02-RT41 konsekvent høyere temperatur enn 350.02-RT51, når det forventes å være motsatt (se Figur 59). Ved sammenligning med omkringliggende temperaturfølere er det tydelig at 350.02-RT41 måler feil. Temperaturføleren er forriglet mot sikkerhetssystem for frostsikring av varmeveksler LK01. Tabell 28 gir en oppsummering av måleinstrumentene som det er avdekket via arbeidet med masteroppgaven at har målefeil og burde utbedres for en sikrere drift og mer pålitelig overvåkning av energisystemet.

Tabell 28. Måleinstrumenter med målefeil.

ID i SD-anlegg	Beskrivelse
350.02 – RT41	Turtemperatur varmeveksler prosesskjøling primærside. Temperaturfølere en forriglet mot frostsikring av varmeveksler 350.02 – LK01.
320.01 – JP42	Pumpepådrag til pumpe plassert på tur romoppvarmingskrets i bygg A
320.01 – JP48	Pumpepådrag til pumpe plassert på tur romoppvarmingskrets bygg B
320.01 – PT43 320.01 – PT53	Måler vanntrykk i tur- og returrør til romoppvarming i bygg B.

Det har tidligere vært gjort flere justeringer på styrings- og reguleringsstrategier i energisystemet uten at dette er tilstrekkelig dokumentert. Mye erfaringsdata fra tidligere driftsår har dermed gått tapt. Flere settpunkt og mye av informasjonen man finner i funksjonsbeskrivelsene er derfor ikke gjeldene. Det har skapt utfordring ved gjennomføring av en dybdeanalyse av et såpass komplisert og intrikat energisystem. Å dokumentere endringer i styrings- og reguleringsstrategier som gjøres fremover vil være til stor fordel for den videre driften av energisystemet.





## 5 Konklusjon

Med utgangspunkt i resultatene fra gjennomføring av delmål 1, 2 og 3 foreslås følgende tiltak for forbedring av den tekniske driften:

- **Endring av hovedvarmens utekompenseringskurve**

For en mer sikker drift av energisystemet anbefales det å endre hovedvarmens utekompenseringskurve til kurven foreslått i Tabell 23. Det vil sikre at det tilføres vann med høy nok temperatur til rom- og ventilasjonsoppvarming i alle bygg.

- **Installering av tilbakeslagsventil i bypass i bygg A og B**

Det anbefales å installere tilbakeslagsventil i bypass i bygg A og B, slik at turvann ikke har mulighet til å blandes med returvann via bypassen, selv med lavt energibehov til ventilasjonsoppvarming. Med utgangspunkt i en forenklet modell av varmpumpene er det estimert en nedgang i COP på 10,7 %, grunnet høy returtemperatur til underkjølingsvarmevekslerne. Uten blanding ville effektforbruket til kompressorarbeid i perioden 01.08.2018 til 31.09.2019 vært redusert med  $29 \cdot 10^3$  kWh. Inntjeningstiden for en slik installasjon ansees derfor som neglisjerbar. Uten blanding via bypass vil også energisystemet kunne mengdereguleres som tiltenkt.

- **Utbedring av måleinstrumenter med målefeil**

Det anbefales å utbedre måleinstrumentene som er listet opp i Tabell 28 for en mer sikker drift og pålitelig overvåking av energisystemet. Spesielt viktig er det at temperaturføler 350.02 – RT51 som er forriglet mot frostsikring av varmeveksler 350.02-LK02 utbedres.

- **Endring av reguleringsstrategi for veksling mellom bruk av isvann fra varmpumper og kollektorvæske fra energibrønn EB03 til prosesskjøling**

Dersom vekslingen reguleres basert på temperaturdifferansen mellom kollektorvæsken og isvannet, fremfor en fast settpunkttemperatur på isvannet, vil væsken med lavest temperatur brukes til prosesskjøling. Det vil sikre minst mulig temperaturløft for kjølemaskinene, og for per grad K reduksjon i temperaturløft økes kjølemaskinenes effektfaktor med 2 - 3%.



## 6 Forslag til videre arbeid

For videre arbeid foreslås å undersøke hva som forårsaker de observerte effekttoppene i Figur 51 og Figur 52 for romoppvarming i bygg A, og om nattsinking til 21 °C i bygg A og B resulterer i temperaturøkning for rom med basis settpunkt lik 20 °C. Det foreslås også å undersøke hva som forårsaker energiforbruket til romoppvarming på 18719 kWh i juli, og om temperatursettpunkt i energisentralen og på romnivå burde endres på sommerstid når skolen står tom for å redusere energiforbruket.

Det foreslås å gjøre en grundig analyse av vakumsolfangerne, da solfangernes lave energiproduksjon fører til økt forbruk av varme fra varmpumpene til forvarming av tappevann og solvarmens planlagte bidrag til opplading av energibrønnene må dekkes av andre varmekilder.

Det foreslås at det undersøkes ytterligere hva som kan være årsaken til at temperaturredifferanse mellom tur- og returstrømmen til energibrønner er lavere enn forventet, og hvorfor volumstrømmen i energibrønnene er lavere enn anbefalte verdier når EB03 brukes sammen med EB01 og EB02.



## Referanseliste

Asplan Viak AS 2012a. Arbeidsnotat energibrønner - Energilager versus kun varmeuttak.

*Nye Bryne videregående skole.*

Asplan Viak AS 2012b. Beskrivelse K202 Energibrønner og rør - Generell del. *Nye Bryne videregående skole.*

Asplan Viak AS 2012c. Resultater fra termisk responstest. *Nye Bryne videregående skole.*

Aune, B. 1993. *Temperaturnormaler, normalperiode 1961-1990. - DNMI-rapport 02/93.* Det norske meteorologiske institutt. Tilgjengelig fra:

[https://cms.met.no/site/2/klimaservicesenteret/Klimanormaler/\\_attachment/10911?\\_ts=159b2cddfb3](https://cms.met.no/site/2/klimaservicesenteret/Klimanormaler/_attachment/10911?_ts=159b2cddfb3) (Hentet: 2019).

Bryne Videregående Skole. 2017. Tilgjengelig fra:

<http://www.bryne.vgs.no/Aktuelt/Velkommen-til-nytt-skuleaar-paa-Bryne-vgs>  
(Hentet: 2019).

Dokka, T. H. & Grini, C. 2013. *Etterprøving av bygningers energibruk.* Oslo: SINTEF

akademisk forlag. Tilgjengelig fra: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/2365084?locale-attribute=no> (Hentet: 2019).

Enova SF, NoBio, NRL, Norsk Varmeteknisk Forening, Norsk Varmepumpeforening, Norsk Energi- og Miljøteknisk Forening, Norsk Fjernvarme & Norsk Solenergiforening.

2011. *Kompetansekompedium for varmeanlegg.* Tilgjengelig fra:

[https://www.enova.no/upload\\_images/15620DD1392D4A9A94C1A77A589C2941.pdf](https://www.enova.no/upload_images/15620DD1392D4A9A94C1A77A589C2941.pdf)  
(Hentet: 2019).

Fine, J. P., Nguyen, H. V., Friedman, J., Leong, W. H. & Dworkin, S. B. 2018. A simplified ground thermal response model for analyzing solar-assisted ground source heat pump systems. *Energy conversion and management* 165.

- Johnson Controls. 2008. *Differential pressure transmitter DPT-3wire eight range model*. Datablad. Tilgjengelig fra: <https://fdvu.net> (Hentet: 2019).
- Johnson Controls. 2013. *TS-63000. Temperature seonsors and transducers*. Datablad. Tilgjengelig fra: <https://fdvu.net> (Hentet: 2019).
- Kamstrup. 2012a. *Multical ® 602*. Datablad. Tilgjengelig fra: <https://fdvu.net> (Hentet: 2019).
- Kamstrup. 2012b. *Ultraflow 54 ® DN15-125*. Datablad. Tilgjengelig fra: <https://fdvu.net> (Hentet: 2019).
- Melinder, Å. 2007. *Thermophysical properties of aqueous solutions used as secondary fluids*. KTH Royal institute of technology. Tilgjengelig fra: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:12169/FULLTEXT01.pdf> (Hentet: 2019).
- Micro Matic Norge AS. *FDV-dokumentasjon for Micro Matic Norge AS. PT1000 Temperaturføler Standard*. Tilgjengelig fra: <https://fdvu.net> (Hentet: 2019).
- Multiconsult Norge AS 2016. Nye Bryne VGS, Bygg C. Evaluering av bygningens energiytelse. Dokumentkode: 217771-RIBfy-RAP-002-01.
- Norsk Vann BA. 2013. *VA-ordbok: Reynolds tall*. Tilgjengelig fra: <https://kurs.norskvann.no/mod/glossary/showentry.php?eid=1402&displayformat=dictionary> (Hentet: 2019).
- Ramstad, R. K. 2017. *Energibrønner som varmekilde for varmepumper. Har kuldebransjen noe å lære her?* Tilgjengelig fra: [https://energi.tekna.no/wp-content/uploads/2017/10/Energibrønner\\_Norsk\\_Kjøleteknisk\\_Forening\\_26.10.20171.pdf](https://energi.tekna.no/wp-content/uploads/2017/10/Energibrønner_Norsk_Kjøleteknisk_Forening_26.10.20171.pdf) (Hentet: 2019).
- Sigurd Sørum AS. *Apator Propeller water meters - MWN "Nubis"*. Datablad. . Tilgjengelig fra: <https://fdvu.net> (Hentet: 2019).

- SINTEF. 2018. *Store forskjeller i energibruk til varmtvann*. Tilgjengelig fra:  
<https://www.sintef.no/siste-nytt/store-forskjeller-i-energibruk-til-varmtvann/> (Hentet: 2019).
- SINTEF Byggforsk. 2009. *Varmepumper i bygninger. Funksjonsbeskrivelse*. Tilgjengelig fra:  
[https://www.byggforsk.no/dokument/541/varmepumper\\_i\\_bygninger\\_funksjonsbeskrivelse](https://www.byggforsk.no/dokument/541/varmepumper_i_bygninger_funksjonsbeskrivelse) (Hentet: 2018).
- Solar365. 2019. *Using propylene glycol in solar thermal systems*. Tilgjengelig fra:  
<http://www.solar365.com/solar/thermal/glycol-in-solar-thermal-systems> (Hentet: 2019).
- Standard Norge. 2014. *NS 3031:2014 - Beregning av bygningers energiytelse - Metode og data*. Tilgjengelig fra:  
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=702386> (Hentet: 2019).
- Standard Norge. 2016. *SN/TS 3031: Bygningers energiytelse - Beregning av energibehov og energiforsyning*. Tilgjengelig fra:  
<https://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=ns3031> (Hentet: 2019).
- Standard Norge. 2019. *SN/TR 3069:2019 Formålsdelt etterprøving av bygningers energibruk*. Tilgjengelig fra:  
<https://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=formålsdelt> (Hentet: 2019).
- Stene, J. 2018a. *Termodynamikk for varmepumpeprosessen*. NTNU. Tilgjengelig fra:  
<https://ntnu.blackboard.com> (Hentet: 2018).
- Stene, J. 2018b. *Varmekilder for varmepumper*. NTNU. Tilgjengelig fra:  
<https://ntnu.blackboard.com> (Hentet: 2018).

Sweco Norge AS 2015. Energimerking av Nye Bryne VGS, bygg A og B. Rapport nr. 01.

Oppdrag nr.: 97431008.

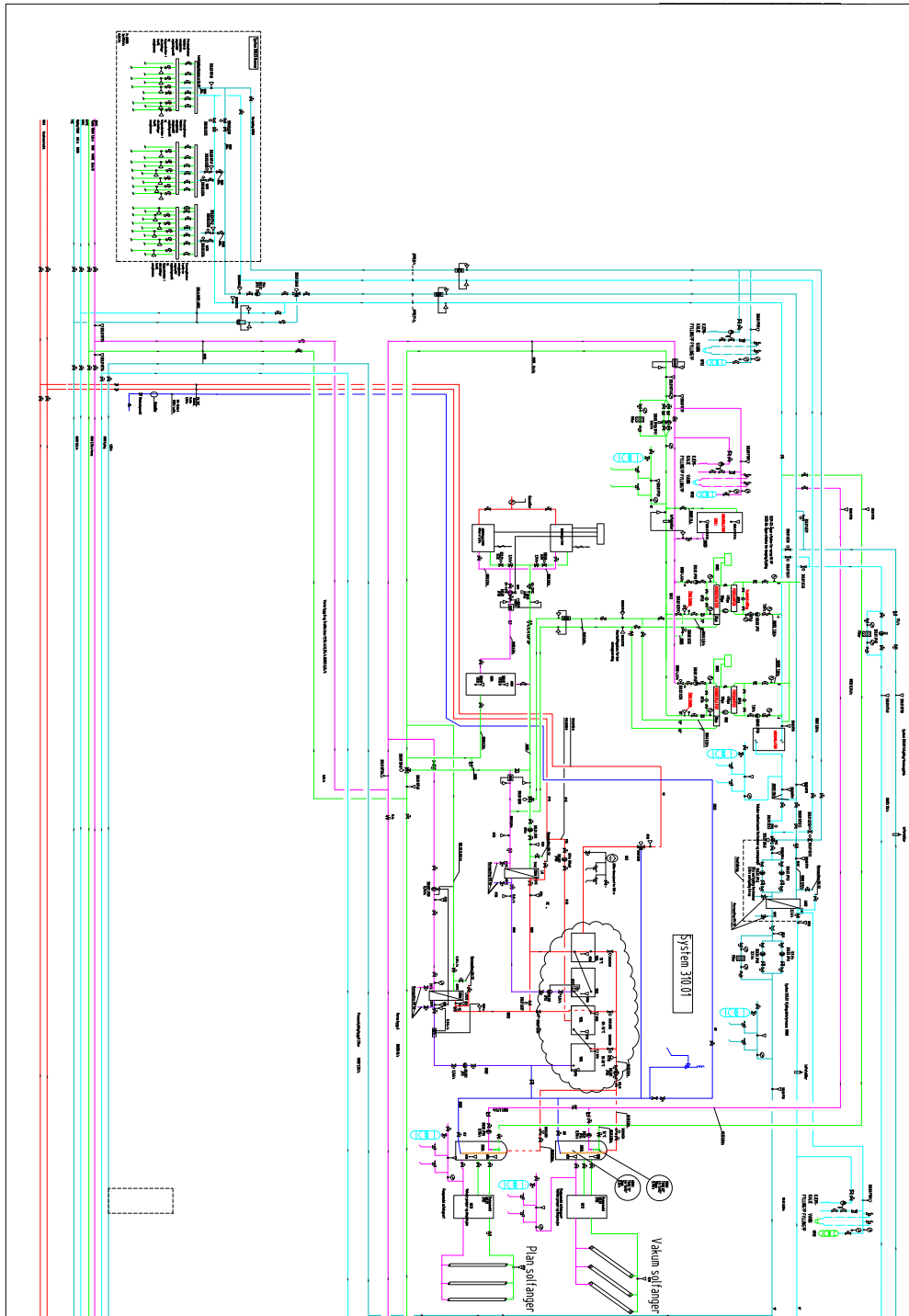
Tjøtta, L. M. 2019. *Kartlegging av energisystemet ved Bryne videregående skole.*



# 7 Vedlegg

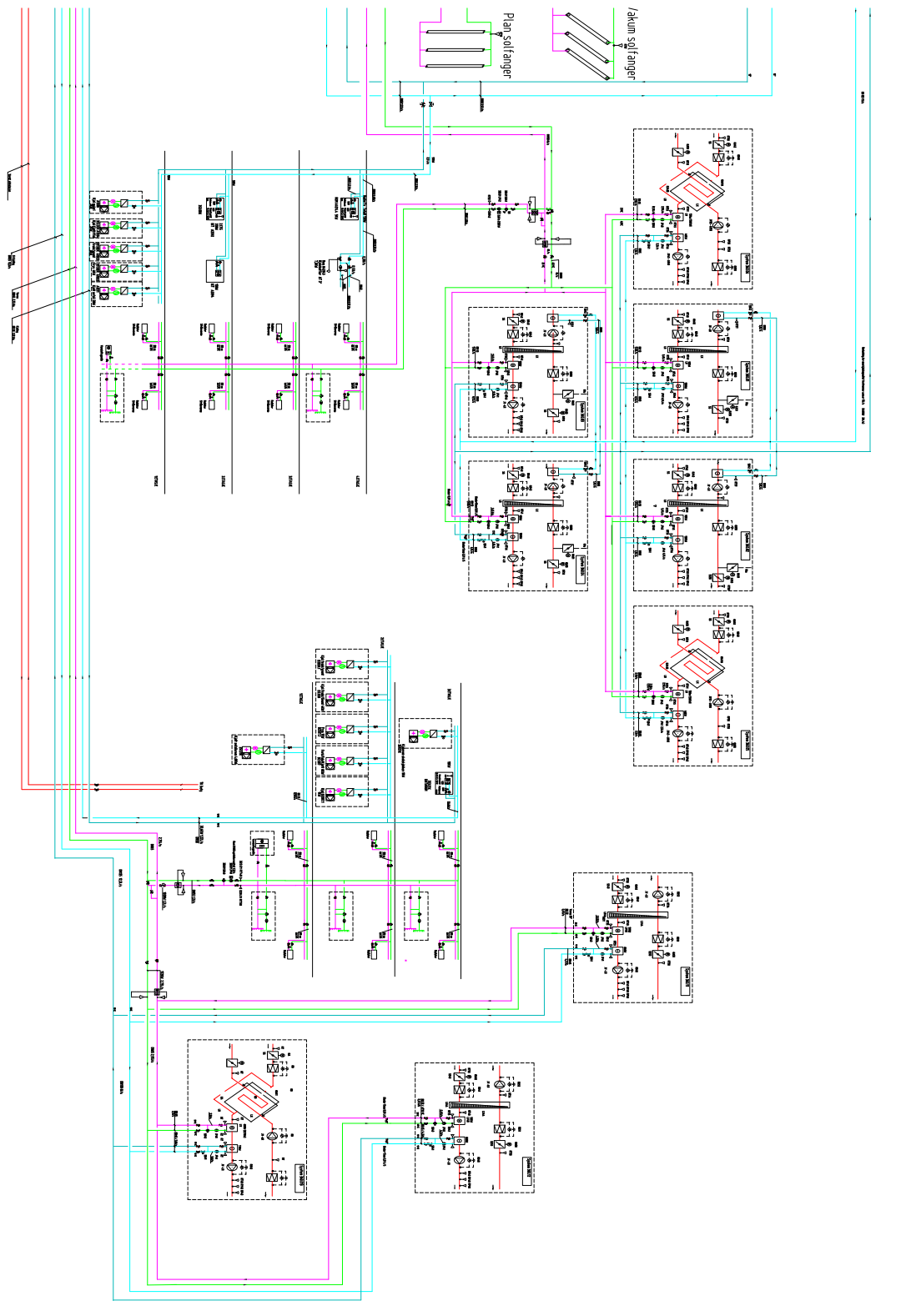
## 7.1 Vedlegg A

### Flytskjema Bryne vgs. bygg A og B del 1



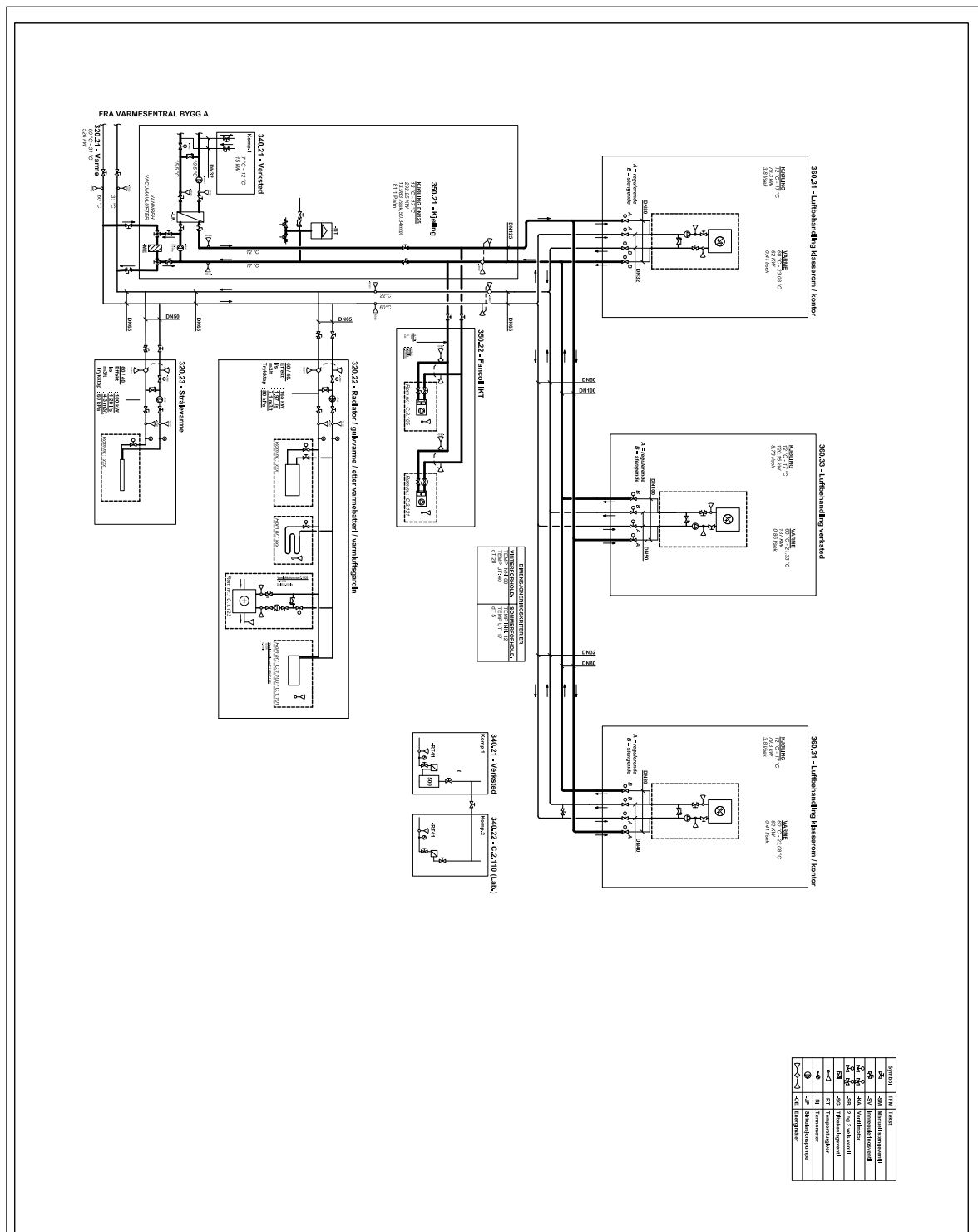
Figur 61. Flytskjema av energisystemet eksklusiv krets for ventilasjonskjøling og rom- og ventilasjonsoppvarming.

## Flytskjema Bryne vgs. bygg A og B del 2



Figur 62. Flytskjema av system for ventilasjonskjøling og rom- og ventilasjonsoppvarming i bygg A og B.

# Flytskjema Bryne vgs. bygg C



Figur 63. Flytskjema av system for ventilasjonkjøling og rom- og ventilasjonsoppvarming i bygg C.

## 7.2 Vedlegg B

### Script for beregning av energiforbruk bygg C

```
D = datetime(OE0Xeffekt{: ,1}, 'InputFormat', 'yyyy-MM-dd HH:mm:ss');
T0=datetime('2018-01-01 00:00:00', 'InputFormat', 'yyyy-MM-dd HH:mm:ss');

%velger et nullpunkt
DT=D-T0;
T_s = seconds(DT);
T_d = days(DT);

Q= sum(diff(T_s(1:end)).*OE0Xeffekt{1:end-1,2})/3600 %kWh %sum(Dt*P)
==> Dt*P = (t_(i+1)-t_(i))*P_i
```

## 7.3 Vedlegg C

### Script for beregning av tilført og hentet energiforbruk til energibrønnene

```
%Varmekapasitet til kollektorvæsken
c = (3.798*1000); %[J/kgK]      (for vann: c = (4.183*1000); %[J/kgK])

%Tetthet til kollektorvæsken
ro = 1036.3 %[kg/m3]          (for vann: ro = 997 %[kg/m3])

%Beregner volumstrøm ([m3/h] -> [kg/s])
Mengde= table(OE0XMengde.Tid, (OE0XMengde.Mengde*ro)/3600);

%Konverterer til timetable
TR1 = table2timetable(Mengde);
TR2 = table2timetable(OE0XRetur);
TR3 = table2timetable(OE0XTur);

%Synkroniserer tabeller
Tabell_1 = synchronize(TR1, TR2, TR3);

%Fyller tidspunkt hvor det mangler målinger med forrige målte verdi
Tabell_2 = fillmissing(Tabell_1, 'previous');

%Beregner temperaturdifferansen
Temperatur_diff = Tabell_2.Tur - Tabell_2.Retur;
Tabell_3 = timetable(Tabell_2.Var1, Tabell_2.Var2, Temperatur_diff);

%Beregner effekten ved bruk av formel P= volumstrøm *c*dT,
[kg/s]*[J/kgK]*[K] = W
Resultat = (Tabell_3.Var1)*c.*(Tabell_3.Var2); %[W]
Resultat_Effekt_1 = timetable(Tabell_3.Time, Resultat/1000); %[kW]
Resultat_Effekt_2 = timetable2table(Resultat_Effekt_1);

%Beregner størrelsen på tidsintervallene mellom hver måling
```

```
X = seconds(diff(Resultat_Effekt_2.(1)))
Y = Resultat_Effekt_2.(2);

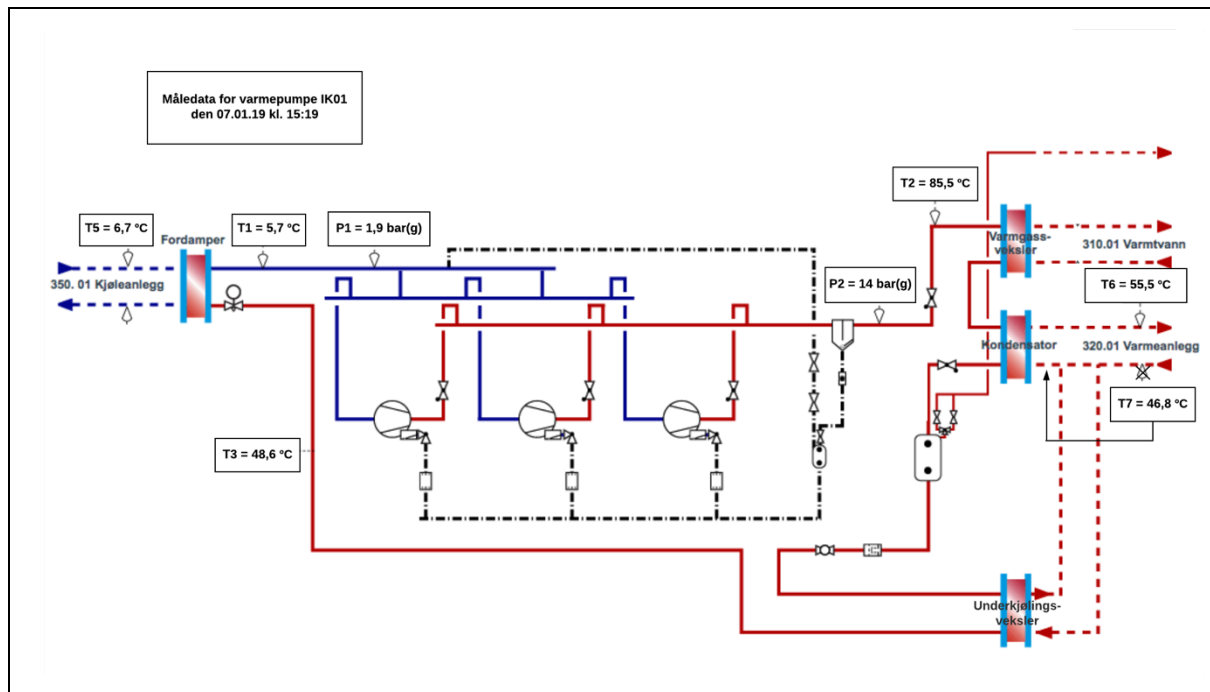
%Multipliserer målt effekt med tilhørende tidsintervall
Effekt = X.*Y(1:end-1); %[kW]

%Beregnet uttak (Effekt > 0) og tilbakelading (Effekt < 0)
Uttak= sum(Effekt(Effekt>0))/3600 %[kWh]
Tilbakelading = sum(Effekt(Effekt<0))/3600 %[kWh]

%Beregner summen av uttak og tilbakelading
Totalt = (Uttak)+ -(Tilbakelading) %[kWh]
```

## 7.4 Vedlegg D

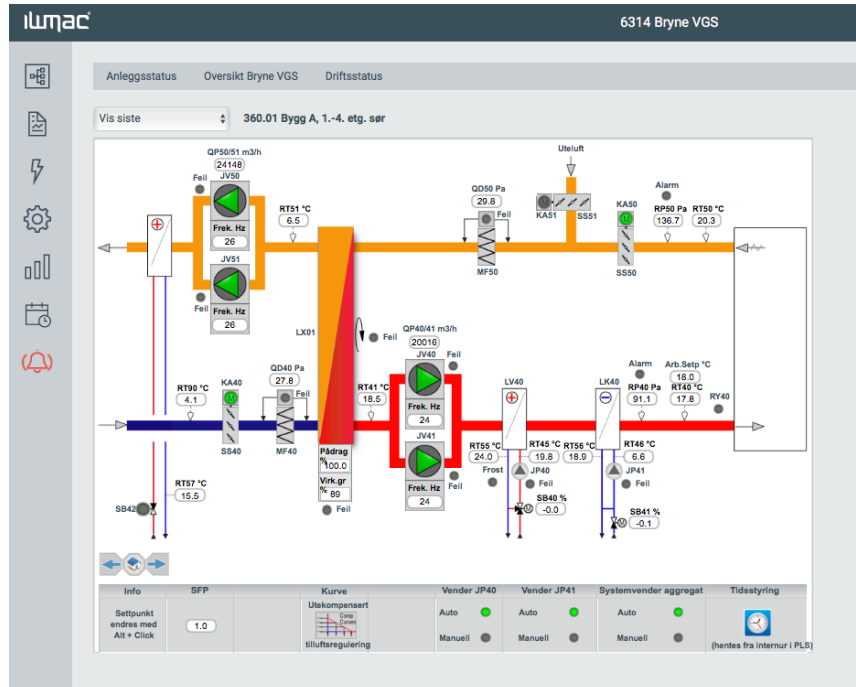
### Driftsbetingelser for IK01 brukt til fremstilling av prosessforløpet i trykk-entalpi diagram



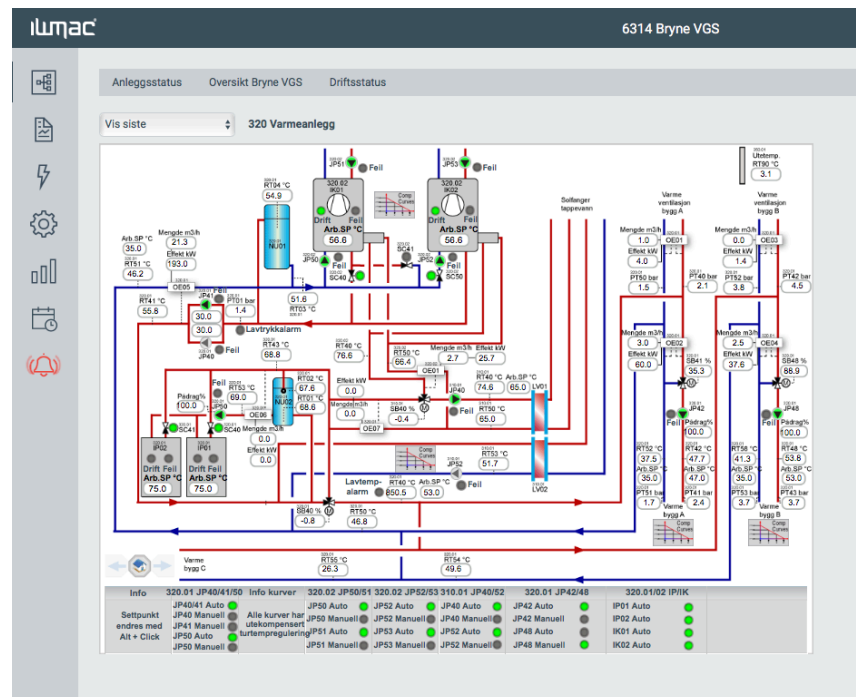
Figur 64. Driftsbetingelser for IK01 den 07.01.19 kl. 15:19, brukt til fremstilling av prosessforløp i ph-diagram.

## 7.5 Vedlegg E

### Bilder av SD-anlegget

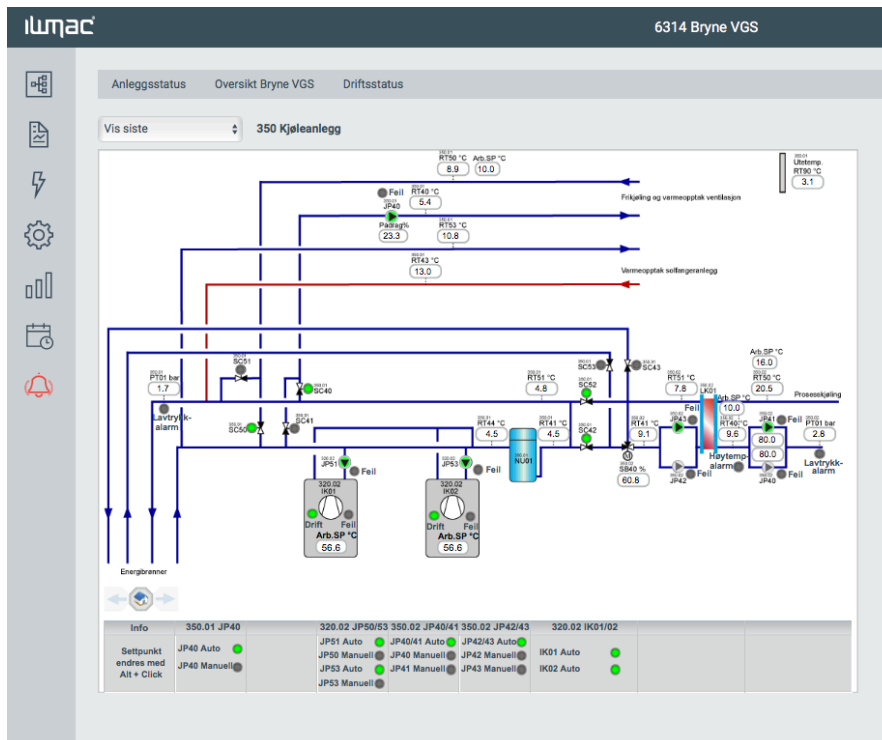


Figur 65. Ventilasjonsaggregat 360.01, som er identisk med 360.02-04.

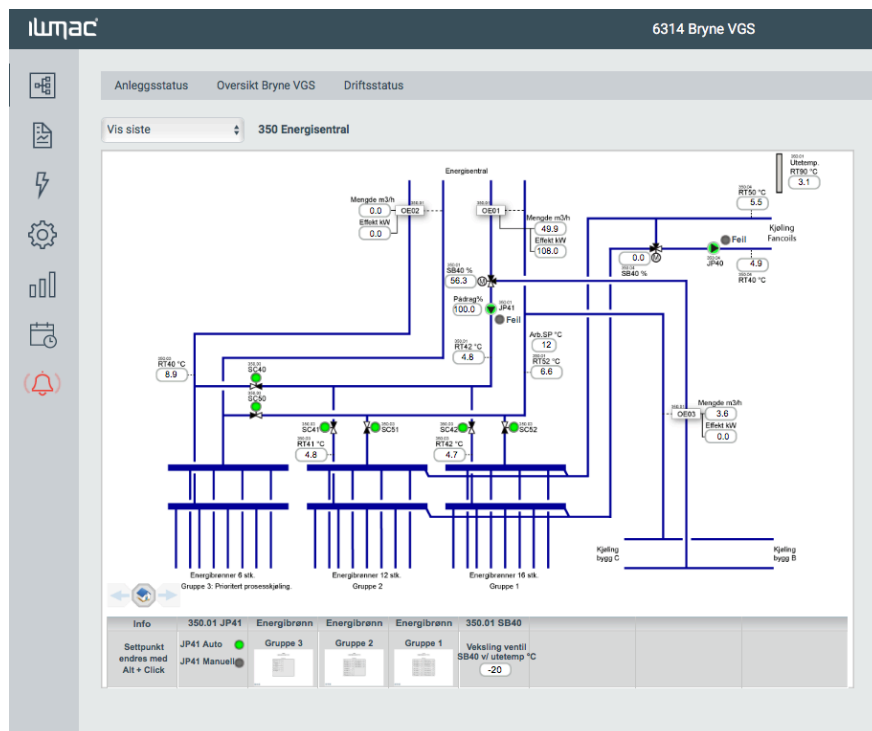


Figur 66. Varmeanlegg 320.01.

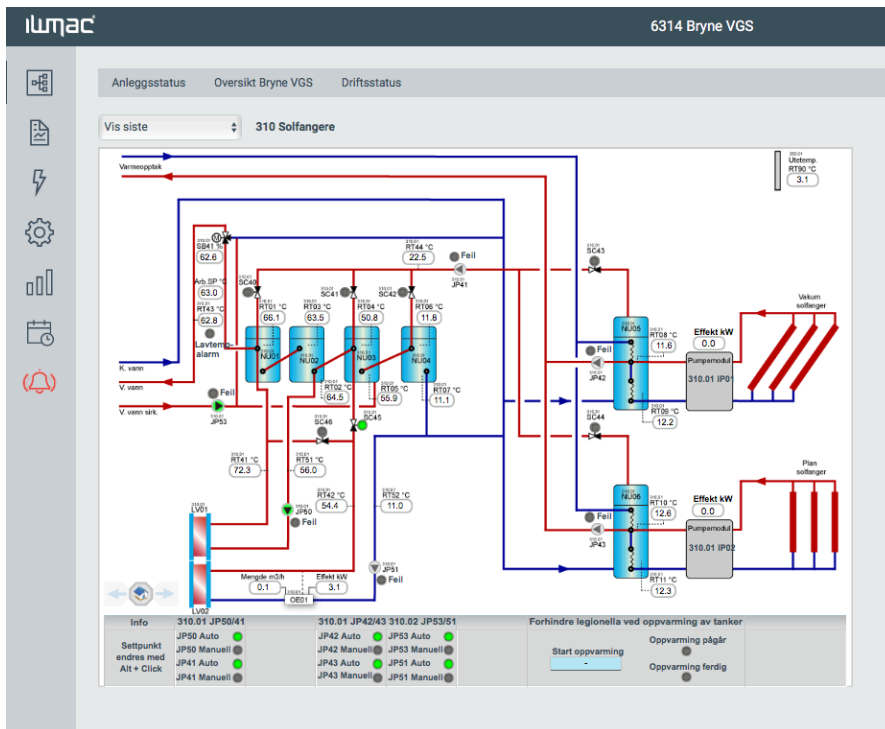




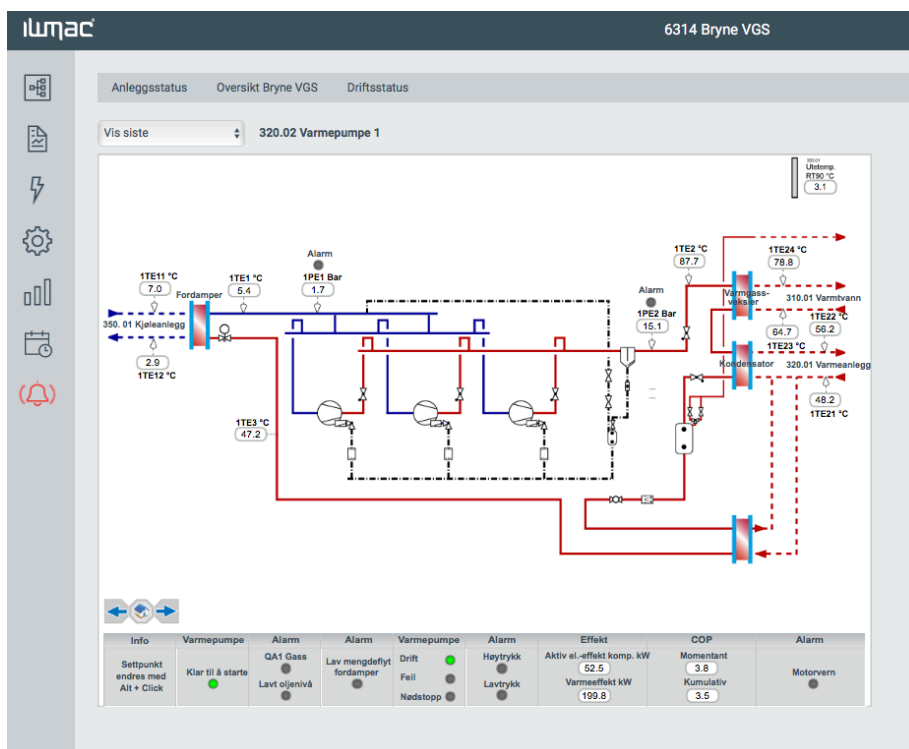
Figur 67. Deler av kjøleanlegg 350.01 og 350.02.



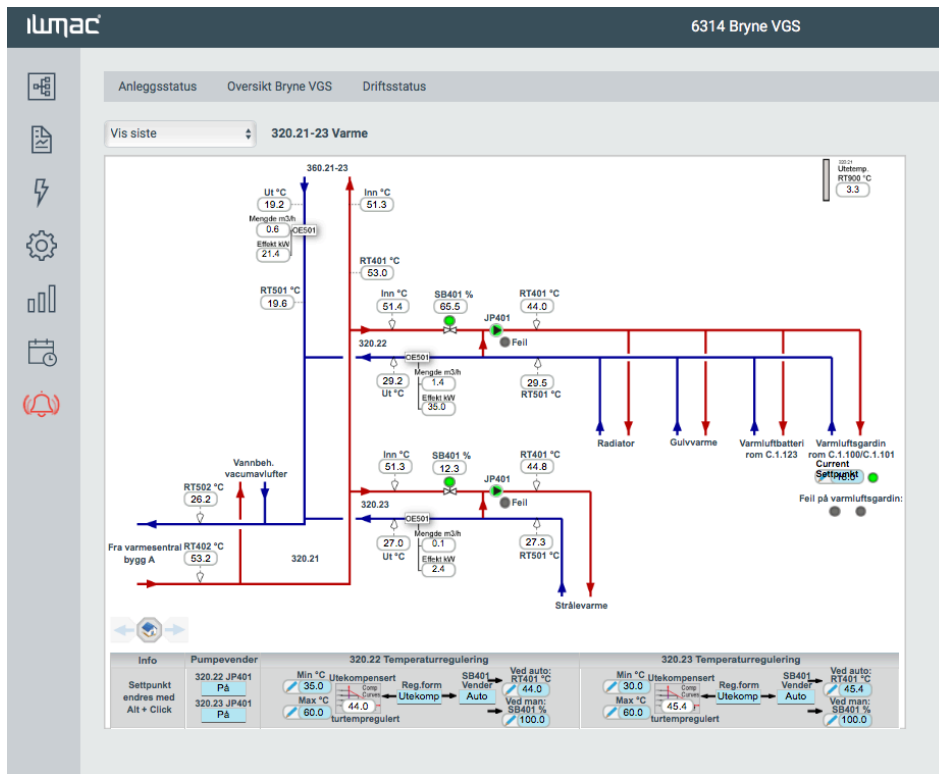
Figur 68. Grunnvarmeanlegg 350.03 og deler av kjøleanlegg 350.01.



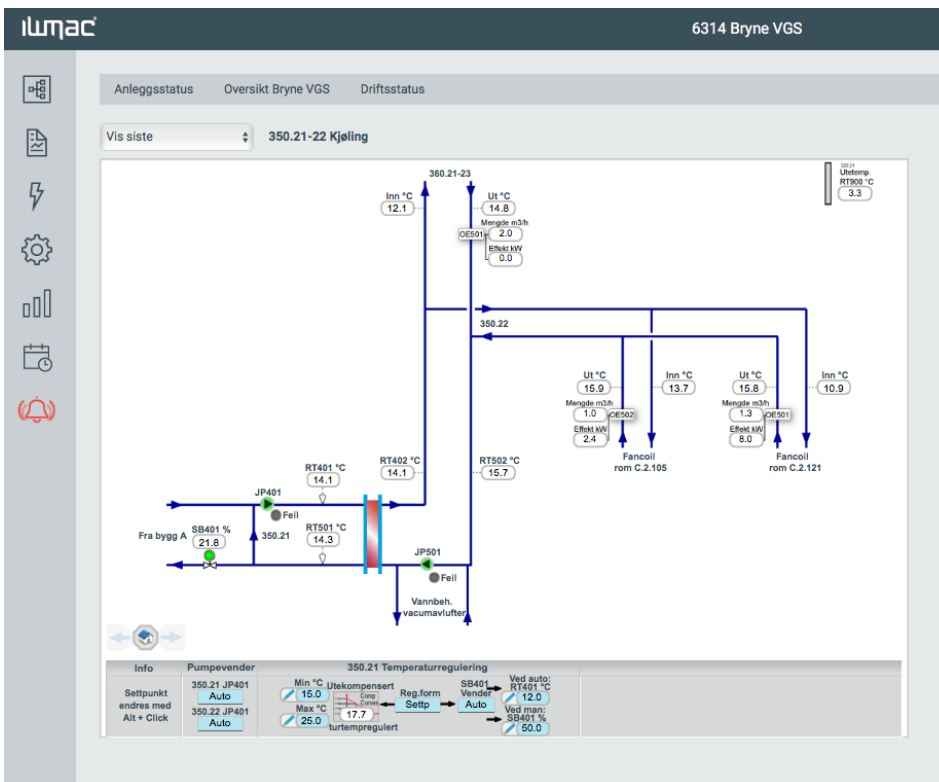
Figur 69. Solfangeranlegg og anlegg for akkumulering av tappevann.



Figur 70. Varmepumpeenhet IK01, som er identisk med IK02.



Figur 71. Rom- og ventilasjonsoppvarmingskrets i bygg C.



Figur 72. Ventilasjonkjølingskrets i bygg C.

## 7.6 Vedlegg F

### Målenøyaktigheten til sentrale feltkomponenter i energisystemet

Tabell 29. Spesifikasjoner for måleutstyret (Kamstrup, 2012b, Kamstrup, 2012a, Sigurd Sørum AS, Micro Matic Norge AS, Johnson Controls, 2013, Johnson Controls, 2008)

Måleutstyr	ID	Type	Målenøyaktighet
<b>Energimålere</b>			
Energimålere: regneverk	OE	Kamstrup Multical ® 602	Kalkulering $E_c$ : $E_c \pm (0,15 + 2/(\Delta\theta)\%)$  Sensor $E_T$ : $E_T \pm (0,4 + 4/(\Delta\theta)\%)$
Volumstrømsmåler	OE <sub>V1</sub>	Kamstrup Ultraflow ® 54	Ikke funnet
Volumstrømsmåler (Glykolmålere):	OE <sub>V2</sub>	Apator MWN Nubis	± 2% for kaldt vann ± 3% for varmt vann
Temperaturføler	OE <sub>T2/T1</sub>	Micro matic MB02PT PT1000	EN6751 Klasse A: (± 0,15 + 000,2   T)
<b>Øvrig instrumentering</b>			
Temperaturføler	RT	Micro matic MB02PT PT1000	EN6751 Klasse A: (± 0,15 + 000,2   T)
Temperatursensor 2 (bunn akk. tank og ute)	RT2	Johnson TS6360S-000	EN6751 Klasse A: (± 0,15 + 000,2   T  )
Trykkgivere	PT	Johnson P499	± 1,5 %

## 7.7 Vedlegg G

### Prosjektert netto energibehov bygg A og B, og bygg C

SIMIEN	
Resultater årssimulering	
Simuleringsnavn: Årssimulering	
Tid/dato simulering: 12:48 31/5-2019	
Programversjon: 6.012	
Simuleringsansvarlig: UMH/KHT	
Firma: Undervisningslisens	
Inndatafil: C:\...Bryne VGS Energibudsjett (1).smi	
Prosjekt: Bryne VGS	
Sone: Alle soner	

Energipost	Energibudsjett	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming		203506 kWh	11,4 kWh/m <sup>2</sup>
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)		40406 kWh	2,3 kWh/m <sup>2</sup>
2 Varmtvann (tappevann)		179435 kWh	10,1 kWh/m <sup>2</sup>
3a Vifter		161785 kWh	9,1 kWh/m <sup>2</sup>
3b Pumper		18108 kWh	1,0 kWh/m <sup>2</sup>
4 Belysning		344998 kWh	19,4 kWh/m <sup>2</sup>
5 Teknisk utstyr		346297 kWh	19,4 kWh/m <sup>2</sup>
6a Romkjøling		0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)		27091 kWh	1,6 kWh/m <sup>2</sup>
<b>Totalt netto energibehov, sum 1-6</b>		<b>1321927 kWh</b>	<b>74,2 kWh/m<sup>2</sup></b>

Energivare	Levert energi til bygningen (beregnet)	
	Levert energi	Spesifikk levert energi
1a Direkte el.	862180 kWh	48,4 kWh/m <sup>2</sup>
1b El. til varmepumpesystem	169746 kWh	9,5 kWh/m <sup>2</sup>
1c El. til solfangersystem	1694 kWh	0,1 kWh/m <sup>2</sup>
2 Olje	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
3 Gass	101002 kWh	5,7 kWh/m <sup>2</sup>
4 Fjernvarme	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
5 Biobrensel	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
6. Annen energikilde	9 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
7. Solstrøm til egenbruk	-0 kWh	-0,0 kWh/m <sup>2</sup>
<b>Totalt levert energi, sum 1-7</b>	<b>1134931 kWh</b>	<b>63,7 kWh/m<sup>2</sup></b>
Solstrøm til eksport	-0 kWh	-0,0 kWh/m <sup>2</sup>
<b>Netto levert energi</b>	<b>1134931 kWh</b>	<b>63,7 kWh/m<sup>2</sup></b>

Figur 73. Prosjektert netto energibehov og levert energi bygg A og B, beregnet av DNF AS.

SIMIEN	
Resultater årssimulering	
Simuleringsnavn: Årssimulering A	
Tid/dato simulering: 14:30 4/9-2019	
Programversjon: 6.012	
Simuleringsansvarlig: UMH/KHT	
Firma: Undervisningslisens	
Inndatafil: \homer.uit.no\lj001\My Documents\Bryne VGS Energibudsjett.smi	
Prosjekt: Bryne VGS	
Sone: Bygg A	

Energipost	Energibudsjett	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming		134327 kWh	10,8 kWh/m <sup>2</sup>
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)		29033 kWh	2,3 kWh/m <sup>2</sup>
2 Varmtvann (tappevann)		125463 kWh	10,1 kWh/m <sup>2</sup>
3a Vifter		114779 kWh	9,2 kWh/m <sup>2</sup>
3b Pumper		12663 kWh	1,0 kWh/m <sup>2</sup>
4 Belysning		241023 kWh	19,4 kWh/m <sup>2</sup>
5 Teknisk utstyr		242145 kWh	19,4 kWh/m <sup>2</sup>
6a Romkjøling		0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)		19683 kWh	1,6 kWh/m <sup>2</sup>
<b>Totalt netto energibehov, sum 1-6</b>		<b>919117 kWh</b>	<b>73,8 kWh/m<sup>2</sup></b>

Figur 74. Prosjektert netto energibehov bygg A, beregnet av DNF AS.

Simuleringsnavn: Årssimulering A  
 Tid/dato simulering: 14:30 4/9-2019  
 Programversjon: 6.012  
 Simuleringsansvarlig: UMH/KHT  
 Firma: Undervisningslisens  
 Inndatafil: \\homer.uit.no\lj\001\My Documents\Bryne VGS Energibudsjett.smi  
 Prosjekt: Bryne VGS  
 Sone: Bygg A

Energibudsjett		
Energipost	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	134327 kWh	10,8 kWh/m <sup>2</sup>
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	29033 kWh	2,3 kWh/m <sup>2</sup>
2 Varmtvann (tappevann)	125463 kWh	10,1 kWh/m <sup>2</sup>
3a Vifter	114779 kWh	9,2 kWh/m <sup>2</sup>
3b Pumper	12663 kWh	1,0 kWh/m <sup>2</sup>
4 Belysning	241023 kWh	19,4 kWh/m <sup>2</sup>
5 Teknisk utstyr	242145 kWh	19,4 kWh/m <sup>2</sup>
6a Romkjøling	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	19683 kWh	1,6 kWh/m <sup>2</sup>
<b>Totalt netto energibehov, sum 1-6</b>	<b>919117 kWh</b>	<b>73,8 kWh/m<sup>2</sup></b>

Figur 75. Prosjektert netto energibehov bygg B, beregnet av DNF AS.

Simuleringsnavn: Årssimulering  
 Tid/dato simulering: 12:40 31/5-2019  
 Programversjon: 6.012  
 Simuleringsansvarlig: Multiconsult/ Noora Khezri  
 Firma: Undervisningslisens  
 Inndatafil: C:\...1217771- Nye Bryne VGS- Bygg C (1).smi  
 Prosjekt: Bryne VGS  
 Sone: Alle soner

Energibudsjett		
Energipost	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	94518 kWh	10,8 kWh/m <sup>2</sup>
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	59071 kWh	6,9 kWh/m <sup>2</sup>
2 Varmtvann (tappevann)	87846 kWh	10,1 kWh/m <sup>2</sup>
3a Vifter	141982 kWh	16,3 kWh/m <sup>2</sup>
3b Pumper	4003 kWh	0,5 kWh/m <sup>2</sup>
4 Belysning	192649 kWh	22,1 kWh/m <sup>2</sup>
5 Teknisk utstyr	115579 kWh	13,2 kWh/m <sup>2</sup>
6a Romkjøling	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
<b>Totalt netto energibehov, sum 1-6</b>	<b>696549 kWh</b>	<b>79,8 kWh/m<sup>2</sup></b>

Levert energi til bygningen (beregnet)		
Energivare	Levert energi	Spesifikk levert energi
1a Direkte el.	390081 kWh	44,2 kWh/m <sup>2</sup>
1b El. til varmpumpesystem	64718 kWh	7,4 kWh/m <sup>2</sup>
1c El. til solfangersystem	2892 kWh	0,3 kWh/m <sup>2</sup>
2 Olje	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
3 Gass	44686 kWh	5,1 kWh/m <sup>2</sup>
4 Fjernvarme	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
5 Biobrensel	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
6. Annen energikilde	0 kWh	0,0 kWh/m <sup>2</sup>
7. Solstrøm til egenbruk	-0 kWh	-0,0 kWh/m <sup>2</sup>
<b>Totalt levert energi, sum 1-7</b>	<b>498378 kWh</b>	<b>57,1 kWh/m<sup>2</sup></b>
Solstrøm til eksport	-0 kWh	-0,0 kWh/m <sup>2</sup>
<b>Netto levert energi</b>	<b>498378 kWh</b>	<b>57,1 kWh/m<sup>2</sup></b>

Figur 76. Prosjektert netto energibehov og levert energi til bygg C, beregnet av Multiconsult Norge AS.

## 7.8 Vedlegg H

### Fra netto energibehov til brutto energibehov

I bygg måles vanligvis energiforbruket i energisentralen, og ikke varmeavgivelse til hvert rom/soner. Dette energiforbruket betegnes som brutto energiforbruk. Energiberegninger gjennomført i simuleringsprogrammet SIMIEN produserer energibudsjetter med oversikt over netto energibehov, og ikke brutto energibehov. Derfor, ved sammenligning av målt og beregnet energiforbruk må man utføre nødvendige korrigeringer for distribusjons- og avgivelsestap slik at man sammenligner korrekt tallmateriale. Veiledende årsgjennomsnittlig virkningsgrader for distribusjons- og avgivelsestap fra Standard Norge (2014) er presentert i Tabell 30.

Tabell 30. Virkningsgrader for å ta høyde for distribusjons- og avgivelsestap i energisystemet.

	Tabellnummer i NS 3031:2014	$\eta$
Varmt tappevann med sirkulasjonstap	B.10-8	0,6
Vannbåren varme i godt isolerte rør, middeltemperatur, $45\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta \leq 55\text{ }^{\circ}\text{C}$	B.10-5	0,97
Luftbåren varme i kanaler	B.10-3	0,94
Romvirkningsgrad for radiatorer, turtemp. $\leq 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ m/termostatventil	B.11-3	0,91

### Fremgangsmåte for å beregne netto energibehov til brutto energibehov

Tabell 31 presenterer formlene som ble benyttet for å regne om beregnet netto energibehov til brutto energibehov.

Tabell 31. Formler for å beregne netto energibehov til brutto energibehov.

Beregnet energiforbruk	Formel
Romoppvarming	$\frac{E_{\text{netto}}}{(0,97 \cdot 0,91)} = E_{\text{brutto}}$
Ventilasjonsoppvarming	$\frac{E_{\text{netto}}}{(0,97 \cdot 0,94)} = E_{\text{brutto}}$
Varmtvann	$\frac{E_{\text{netto}}}{(0,6)} = E_{\text{brutto}}$

## 7.9 Vedlegg I

### Månedstemperaturekorrigering

Månedstemperaturkorrigering er benyttet til å korrigere energiforbruket til oppvarming for klimavariasjoner for å ta høyde for perioder med høyt energiforbruk pga. lave utetemperaturer og omvendt. Basistemperaturen kan tolkes som utetemperaturen hvor man har oppvarmingsbehov dersom utetemperaturen er under basistemperaturen og over har man ikke. I SN/TR 3069:2019 finner anbefalt basistemperaturer for ulike bygningsstandarder. Følgende formel benyttes for å beregne korreksjonsfaktorer for månedstemperaturkorrigering:

$$f_T(i) = \begin{cases} \frac{T_{\text{basis}} - T_{\text{e, reell}}(i)}{T_{\text{basis}} - T_{\text{e, norm}}(i)} \\ 1, \text{ hvis } (T_{\text{basis}} - T_{\text{e, reell}}(i)) < 1 \text{ eller } (T_{\text{basis}} - T_{\text{e, norm}}(i)) < 1 \end{cases}$$

$f_T(i)$  Temperaturkorrigeringsfaktor for måned  $i$ .

$T_{\text{basis}}$  Basistemperaturen for bygget i °C.

$T_{\text{e, reell}}(i)$  Målt utetemperatur  $i$  måned i °C.

$T_{\text{e, norm}}(i)$  Normalisert utetemperatur  $i$  måned i °C.

- Dersom  $f_T(i) > 1$  indikerer det at klimaet for perioden har vært varmere enn sammenlignet normalperiode.
- Dersom  $f_T(i) < 1$  indikerer det at klimaet for perioden har vært kaldere enn sammenlignet normalperiode.

For å korrigere målt energiforbruk multipliserer korreksjonsfaktoren med målt forbruk:

$$E_{\text{temperaturkorrigert}, i} = f_{T, i} \times E_{\text{målt}, i}$$



**Korreksjonsfaktorer for månedstemperaturkorrigering av energiforbruket på Bryne vgs.**

Tabell 32 gir en oversikt over utregnet korreksjonsfaktorer for månedstemperaturkorrigering av energiforbruket på Bryne vgs. Som normalisert utetemperaturer er det benyttet månedsmiddeltemperaturer for normalperioden 1961 – 1990 hentet fra meteorologisk institutt (Aune, 1993). Målt utetemperatur for  $i$  måned er lokalt målt månedsmiddeltemperatur hentet fra SD-anlegget. Det er benyttet en basistemperatur på 13 grader som er anbefalt i standard SN/TR 3069:2019 for bygg med varmeteknisk nivå i henhold til TEK10 (Standard Norge, 2019).

Tabell 32. Utregnet korreksfaktor for månedstemperaturkorrigering.

År	Måned	$T_{\text{basis}} - T_{\text{e,norm}}(i)$	$T_{\text{basis}} - T_{\text{e,reell}}(i)$	$f_T(i) = \frac{T_{\text{basis}} - T_{\text{e,reell}}(i)}{T_{\text{basis}} - T_{\text{e,norm}}(i)}$
2018	August	-1,4 $\approx$ 1	-3 $\approx$ 1	1
2018	September	1,3	0,1 $\approx$ 1	1,30
2018	Oktober	4,3	3,8	1,13
2018	November	8,5	6,9	1,23
2018	Desember	11	8,8	1,25
2019	Januar	12,5	10,3	1,21
2019	Februar	12,7	7,9	1,61
2019	Mars	10,5	7,8	1,35
2019	April	7,5	3,4	2,21
2019	Mai	3	3,1	0,97
2019	Juni	0,1 $\approx$ 1	-2,5 $\approx$ 1	1
2019	Juli	-1,3 $\approx$ 1	-3,6 $\approx$ 1	1

## 7.10 Vedlegg J

### Formel for beregning av Reynoldstall og informasjon om kollektorvæsken

Hastigheten til kollektorvæsken er beregnet ved bruk av formel for volumstrøm:

$$v = \frac{4 \cdot q_v}{\pi \cdot d_i^2}$$

Volumstrøm  $q_v$  [m<sup>3</sup>/s]

Indre diameter  $d_i$  [m]

Reynoldstall er utregnet ved bruk av følgende formel:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_i}{\nu}$$

Tetthet  $\rho$  [kg / m<sup>3</sup>]

Hastighet  $v$  [m/s]

Indre diameter  $d_i$  [m]

Dynamisk viskositet  $\nu$  [Pa s]

```

Fluid           = Propylene Glycol
X [vol %]       = 30,00
T [°C]          = -3,00
Density [kg/m^3] = 1037,00
Specific heat [kJ/(kg K)] = 3,793
Conductivity [W/(m K)] = 0,419
Dynamic viscosity [10^-5 Pa·s] = 820,002
Kinematic viscosity [cSt] = 7,907
Freeze point [°C] = -13,10
*****
Fluid           = Propylene Glycol
X [vol %]       = 30,00
T [°C]          = -1,00
Density [kg/m^3] = 1036,30
Specific heat [kJ/(kg K)] = 3,798
Conductivity [W/(m K)] = 0,421
Dynamic viscosity [10^-5 Pa·s] = 742,669
Kinematic viscosity [cSt] = 7,167
Freeze point [°C] = -13,10

```

Med vennlig hilsen/Best regards

Rune Grytnes  
 Technical manager  
 Phone +47 974 07 661  
[rune@ecofrigo.no](mailto:rune@ecofrigo.no)



Ecofrigo AS  
 Vanemveien 19  
 Pb 763 Krapfoss  
 1509 Moss  
[www.ecofrigo.no](http://www.ecofrigo.no)

Figur 77. Informasjon om kollektorvæsken.

Indre diameter per brønn:  $d_i = 0,0352$  m

