Masteroppgave

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for energi- og prosessteknikk

Anja Meisler

Analyse av termisk energiforsyning ved Moholt 50|50

Masteroppgave i Energi- og miljø
Veileder: Jørn Stene
Januar 2020

NTNU
Kunnskap for en bedre verden

Anja Meisler

Analyse av termisk energiforsyning ved Moholt 50|50

Masteroppgave i Energi- og miljø
Veileder: Jørn Stene
Januar 2020

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for energi- og prosessteknikk

NTNU
Kunnskap for en bedre verden

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Norges Teknisk-Naturvitenskaplige Universitet og er mitt avsluttende arbeid i sivilingeniørutdanningen i Energi- og Miljø, retning energiforsyning og klimatisering av bygninger.

Veilder har vært Jørn Stene, og jeg vil særlig takke for ditt enorme engasjement og for all kunnskap og erfaring du har delt. Alltid tilgjengelig på mail, kveld som helg, og takk for mange faglige og ikke-faglige samtaler gjennom dette semesteret.

Jeg vil også gjerne takke alle som har hjulpet meg med informasjon og innspill. Særlig, Thore Larsen i Sit Bolig/ Tempero AS for ditt engasjement og for svar på alle spørsmål, tilgang til informasjonsamtaler, diskusjoner og befaringer ved Moholt 50|50. Videre vil jeg takke Kristoffer Laskemoen i AF Gruppen for god hjelp i å forstå det termiske energisystemet og tilgang til informasjon.

Sammendrag

Energibruken i den norske bygningsmassen skal reduseres med 10 TWh fram mot 2030. Innovative og effektive termiske og elektriske energisystemer i boligbygninger vil bidra til en reduksjon i energibruken slik at energimålene kan nås. Denne Masteroppgaven er en videreføring av en prosjektoppgave utarbeidet våren 2019 som analyserte hovedkomponentene og delsystemene i det termiske energisystemet ved studentbyen Moholt 50|50 (Meisler, 2019). Utgangspunktet for målinger og analyser i oppgaven har opprinnelse i interessante funn i prosjektoppgaven.

Moholt 50|50 er en fortetting av Moholt studentby i Trondheim. Utvidelsen av studentbyen består av 5 boligtårn, en barnehage og en biblioteksbygning og har et totalt oppvarmet bruksareal på ca. 25 000 m^2. Det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 er et nærvarmeanlegg som består av 3 varmepumpeaggregater med fjell som varmekilde. Varmepumpeanlegget dekker nesten hele varmebehovet til varmtvannsberedning, oppvarming av ventilasjonsluft og snøsmelting. Varme til forvarming av tappevann til deler av den eksisterende studentbyen leveres ved kapasitet. Varmebehovet til romoppvarming er lavt og dekkes av elektriske panelovner i boligtårnene, samt varmekabler i barnehagen og biblioteksbygningen.

Varme til varmtvannsberedning kan leveres ved en temperatur på omtrent 50 °C grunnet et legionellasikringssystem. Brønnparken for det termiske energisystemet er et termisk lager. Spesielt for det termiske energisystemet for Moholt 50|50 er at det tilbakeføres varme i distribusjonsnettet til brønnparken fra tre ulike kilder. Varme tilbakeføres fra varmegjenvinning fra avløpsvann, varmegjenvinning fra ventilasjonsluft og varme fra solfangeranlegget.

Analyser er gjort tilgjengelig ved målinger fra to ulike SD-anlegg. Disse viser at det termiske energisystemet har et godt prosjektert varmebehov til varmtvannsberedning og fordelen ved bruk av måledata til prosjekteringsformål. I tillegg er avviket mellom prosjektert varmebehov og total varmeleveranse til studentbyen minimal, til tross for et større avvik i varmeleveransen til oppvarming av ventilasjonsluft og snøsmelting. Varmepumpeanlegget har en svært høy energidekningsgrad, men en relativt lav SCOP-verdi (Seasonal Coefficient of Perormance). I måleperioden for energidekningsgraden og SCOP-verdien hadde varmepumpeanlegget to kompressorhavareri og bytte av alle kompressorer. Brønnparken er innovativ med tilbakeføring av varme fra tre ulike varmekilder, som fører reduserer antall energibrønner. Brønnparken har en utstrakt borehullkonfigurasjon med en relativ stabil temperaturutvikling.

Abstract

Energy use in Norwegian buildings is to be reduced by 10 TWh by 2030. Innovative and efficient thermal and electrical energy systems in buildings will contribute to an energy reduction to be able to reach the energy goals. This Master thesis is a continuation of a project thesis developed during spring 2019, which analyzes the main components and subsystems in the thermal energy system at the student town Moholt 50|50. This Master thesis measures and analyses interesting themes found in the project thesis.

Moholt 50|50 is the densification of Moholt student town in Trondheim. The expansion of the student town consist of 5 building towers, a kindergarten, and a library building with a total heated area of 25 000 m^2.

The thermal energy system of Moholt 50|50 includes of 3 heat pumps with bedrock boreholes as a heat source. The heat pump installation covers almost the entire heat demand for heating of domestic hot water, ventilation air, and melting of snow. Preheating of domestic hot water to the existing student town is delivered at capacity. The low heat demand for space heating is covered by electric panel heaters, as well as heating cables in the kindergarten and library building.

Domestic hot water distributed to the buildings has a temperature of 50 °C, due to a legionella prevention system. Spescial for this system is that heat is delivered to the bedrock boreholes, which functions as a borehole thermal energy storage (BTES) from three different sources. The heat is delivered from a wastewater heat exchanger, heat recovery from ventilation air, and heat from solar panels.

A large part of the analysis constitutes of measurements from two different industrial control systems and show, that the thermal energy system has a well-projected heat demand for heating of domestic hot water, and the advantage of using measured data for projecting purposes. The deviation between heat demand and total heat delivery to the student town is minimal, despite a more significant deviation in heat delivery to the heating of ventilation air and snow melting. The heat pump installation has extensive thermal energy coverage, but a relatively low Seasonal Coefficient of Performance (SCOP). During the measuring period of the SCOP, the heat pump had two breakdowns, and all six compressors were changed. The bedrock boreholes are innovative with the return of heat from three different heat sources, which reduces the number of boreholes. The bedrock boreholes have an outstretched borehole configuration with a relatively stable temperature development.

Innhold

Forord **2**

Sammendrag **i**

Abstract **ii**

Innhold **v**

Tabeller **viii**

Figurer **xiv**

1 Introduksjon **1**
1.1 Prosjektbeskrivelse og målsetting 1
1.2 Avgrensning 2
1.3 Struktur og innhold 2

2 Beskrivelse av Moholt 50|50 **4**
2.1 Varmebehov ved Moholt 50|50 6
2.1.1 Prosjektert varmebehov og varmeleveranse til brønnparken . . . 6
2.1.2 Prosjektert forbruk av elektrisitet 10
2.2 Beskrivelse av det termiske energisystemet 11
2.2.1 Brønnpark 13
2.2.2 Varmesentral 14
2.2.3 Varmepumpeanlegg 15
2.2.4 Elektrokjel 16
2.2.5 Undersentralene i boligtårn A-E, barnehagen og bibliotekbygningen 16
2.2.6 Varmegjenvinning fra avløpsvann 18
2.2.7 Solstasjon og solfangeranlegg 19
2.2.8 Snøsmelteanlegg 20

3 Målesystemer, instrumentering og regulering **21**
3.1 Måle- og overvåkningssystemer 21
3.1.1 SD-anlegg for varmesentral og varmtvannsberedning i undersentral 22
3.1.2 SD-anlegg for undersentralene 24
3.2 Instrumentering og målepunkter 26
3.2.1 Måleenheter i varmepumpeaggregatene 28

4 Prosessbeskrivelse og kvalitetssikring **29**
4.1 Prosessbeskrivelse 29
4.1.1 Generell fremgangsmåte ved databehandling 30
4.2 Kvalitetssikring av SD-anlegget 30

5 Målinger og analyse **32**
5.1 Varmebehov og kjøleleveranse 32
5.1.1 Årlig varme- og kjøleleveranse 33
5.1.2 Normalårskorrigering av varmebehov 35
5.1.3 Varme til varmtvannsberedning i boligtårnene og barnehagen . . . 37
5.1.4 Varme til oppvarming av ventilasjonsluft 42
5.1.5 Varme til aerotemperen og snøsmelting 45
5.1.6 Forvarming av varmt tappevann til eksisterende studentboliger, HK21 48
5.1.7 Forbruk av elektrisitet til romoppvarming 50
5.1.8 Kjøleleveranse 53
5.2 Analyse av varmesentral 56
5.2.1 Varmeleveranse fra varmesentralen 56
5.2.2 Energidekningsgrad for varmepumpeanlegget 57
5.2.3 SCOP og energisparing 57
5.2.4 Varmepumpeaggregatenes integrerte kontrollsystem 63
5.3 Analyse av akkumuleringstankene i varmedistribusjonssystemet 64
5.4 Analyse av brønnparken (termisk energilager) 75
5.4.1 Borehullkonfigurasjon 75
5.4.2 Frostvæske 78
5.4.3 Væskestrømning i energibrønnene 78
5.4.4 Tilbakeføring av varme til brønnparken 79
5.4.5 Temperaturanalyse 88
5.4.6 Temperaturutvikling i brønnparken 90
5.4.7 Simuleringer i Earth Energy Designer (EED) 93

6 Konklusjon **107**

7 Videre arbeid **109**

Bibliografi **110**

Vedlegg **116**
A Studentbyens areal og antall personer i hver bygning 116

B Systemskisser av det termiske energisystemet 118
C Komponentspesifikasjoner 129
C.1 Brønnpark 129
C.2 Varmepumpeanlegget 129
C.3 Elektrokjel 131
C.4 Undersentral 131
C.5 Systemskisser luftaggregat 132
C.6 Varmegjenvinning fra avløpsvann 133
C.7 Solfangeranlegg 134
C.8 Pumper 135
D Måleinstrumentering i det termiske energisystemet (Wilo, 2019) 136
E Måleusikkerhet i måleutstyr 139
F Måleenheter i det interne kontrollsystemet til varmepumeaggregatene . . 140
F.1 Avleste verdier i det interne kontrollsystemet 142
G Beregning av graddagstall 144
H Målt varmeleveranse til studentbyen 146
H.1 Varmeleveranse til varmtvannsberedning 146
H.2 Varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft 146
H.3 Varmeleveranse til snøsmelting 148
H.4 Varmeleveranse til forvarming av varmt tappevann 149
H.5 Varmeleveranse til varmesentral 149
H.6 Varmeleveranse til varmedistribusjonsnettet til brønnparken . . . 150
I Målt, simulert og estimert kjøleleveranse 151
J Energidekningsgrad og varmetap i rørnett 152
K Gjennomsnittstemperatur i brønnpark 153
L Spesifikasjoner, termisk energilager i Emmaboda og Geotermos i Drammen 155
M Pågang SiT treningssenter i boligtårn B 157
N SCOP beregninger 158
O Beregninger av energibruk til belysning og teknisk utstyr fra SN/TS3031:2016 159
P Bilder fra SD-anleggene 166
Q Målte luftmengder i boligtårnene, næringsarealene, barnehagen og biblioteket 170
R Earth Energy Designer (EED) 174
S Dimensjoner varmeopptaks- og kjølenett og koordinater 179

Tabeller

2.1 Kartlegging av varmebehov og kjøleleveranse ved Moholt 50|50 6
2.2 Prosjektert varmebehov for Moholt 50|50 (Tempero AS, 2015) 7
2.3 Prosjektert kjøleleveranse for Moholt 50|50 (AF Gruppen, 2015b) 8
2.4 Prosjektert kjølebehov for Moholt 50|50 (AF Gruppen, 2015b) 8
2.5 Prosjektert forbruk av elektrisitet for Moholt 50|50 (Tempero AS, 2015) . 10
2.6 Spesifikasjoner for snøsmelting ved barnehagen og nedkjøringen til parkeringskjelleren (IWMAC AS, 2019a). 20

3.1 Måleenheter i det termsike energisystemet ved Moholt 50|50 26
3.2 Relevante måleenheter i det interne kontrollsystemet til varmepumpeaggregatene (Carrier, 2012) 28

5.1 Målt varme- og kjøleleveranse for Moholt 50|50 33
5.2 Normalårskorrigering av varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft og varme til snøsmelting ved Moholt 50|50 35
5.3 Varmeleveranse til varmtvannsberedning per student for de ulike byggene ved Moholt 50|50 38
5.4 Målt kjøleleveranse for tårn E og total kjøleleveranse for boligtårnene . . 53
5.5 Målt energidekningsgrad for varmepumpeanlegget i 2019 57
5.6 Definisjoner av ulike SCOP-verdier (Zottl et al., 2011) 58
5.7 Målt gjennomsnittlig SCOP for november 2018 til oktober 2019 for varmepumpeaggregatene/ kjølemaskinene 58
5.8 Avlesning av varmepumpeaggregatenes integrerte kontrollsystem, 12. oktober 2019 kl 14.00 63
5.9 Gjennomsnittlig start i timen per aggregat og kompressor 64

1 Antall studenter per boligtårn og antall barn i barnehagen 50|50 116
2 Areal for de ulike bygningene ved Moholt 50|50 117
3 Spesifikasjoner for brønnparken 129
4 Spesifikasjoner for varmepumpeanlegget (Carrier, 2013). 129

5 Spesifikasjoner for komponentene i Carrier varmepumpeaggregatet (Carrier, 2013). 130
6 Driftsdata for et varmepumpeaggregat i varmemodus ved dimensjonerende forhold (Carrier, 2013). 130
7 Spesifikasjoner for elektrokjel (Varmeteknikk, 2018). 131
8 Spesifikasjoner for akkumuleringstankene i boligtårnene, barnehagen og biblioteksbygningen (Varmeteknikk, 2018). 131
9 Spesifikasjoner for varmeveksler for avløpsvann (Rabtherm Energy Systems, 2019b) 133
10 Spesifikasjoner for solfangerne i solfangeranlegget (SGP, 2019) 134
11 Spesifikasjoner for solstasjonen i solfangeranlegget (PAW GmbH & Co. KG, 2016) 135
12 Spesifikasjoner for installerte pumper i det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 135
13 Oversikt over termiske energimålere og temperaturfølere ved Moholt 50|50 136
14 Fortsettelse: oversikt over temperaturfølere ved Moholt 50|50 137
15 Fortsettelse: oversikt over trykkfølere ved Moholt 50|50 138
16 Målenøyaktighet for installert instrumentering ved Moholt 50|50 (Axis Industries, 2019), (Badger Meter Europe, 2019), (Kamstrup, 2014), (Kampstrup, 2019), (Siemens Building Technologies, 2013), (Siemens, 2018), (S+S Regeltechnik, 2019), (S+S Regeltechnik, 2018). 139
17 Måleenheter i det interne kontrollsystemet til varmepumpeaggregatene (Carrier, 2012) 140
18 Fortsettelse: måleenheter i det interne kontrollsystemet til varmepumpeaggregatene (Carrier, 2012) 141
19 Avlesning av varmepumpeaggregatenes elektroniske kontrollsystem, 12. oktober 2019 kl 14.00 142
20 Avlesning av varmepumpeaggregatenes elektroniske kontrollsystem, 12. oktober 2019 kl 14.00 143
21 Graddagstall per måned for Trondheim 144
22 Korrigeringsfaktor for graddagstall per måned for Trondheim 145
23 Målt energibehov til varmtvannsberedning i de fem boligtårnene og barnehagen ved studentbyen Moholt 50|50 146
24 Målt varmebehov til oppvarming av ventilasjonsluft for boligtårnene, barnehagen og biblioteksbygningen ved studentbyen Moholt 50|50 146
25 Varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft per kvadrat for de ulike byggene ved Moholt 50|50 147
26 Målt varmeleveranse til snøsmelteanleggene ved nedkjørselen til parkeringskjelleren, barnehagen og aerotemperen i parkeringskjelleren 148
27 Målt spesifikk varmeleveranse til snøsmelting ved nedkjørselen til parkeringskjelleren og barnehagens gangsti og uteområde 148
28 Målt varmeleveranse til forvarming av varmt tappevann til HK21 149
29 Målt varmeleveranse fra varmepumpeaggregater og elektrokjel 149
30 Varme tilbakeført brønnparken fra solfangeranlegget og varmegjenvinning av avløpsvann og ventilasjonsluft i 2019 150

31 Målt, simulert og estimert kjøleleveranse for boligtårnene, barnehagen og biblioteksbygningen ved studentbyen Moholt 50|50 151
32 Målt energidekningsgrad for varmepumpeaggreater og tap i rørnett . . . 152
33 Målt gjennomsnittstemperatur for frostvæsken fra brønnparken og frostvæsken til brønnparken 153
34 Målt gjennomsnittstemperatur for frostvæsken fra varmedistribusjonsnettet til brønnparken; varmegjenvinning fra avløpsvann, ventilasjon og varme fra solfangerene 154
35 Spesifikasjoner for det termiske energilageret i Emmaboda og det termiske energilageret Geotermos i Drammen (Andersson et al., 2009) (Ramstad, 2017) (Rydell, 2019) 155
36 Beregning av energibruk til belysning 160
37 Beregning av energibruk til tenkisk utstyr 161
38 Beregnet elektrisk forbruk til belysning i barnehagen og biblioteksbygningen 164
39 Beregnet elektrisk forbruk til belysning i hybel- og næringsarealene i boligtårnene 164
40 Rørdimensjoner for varmedistribusjonsnettet 179

Figurer

2.1 Oversiktsbilde (redigert) over studentbyen Moholt 50| 50 (MDH Arkitekter, 2019) 5
2.2 Effekt-varighetskurve for varmebehovet og kjøleleveransen ved Moholt 50|50 9
2.3 Forenklet systemskisse av varmsentral, varmeopptaksnett, varmedistribusjonsnettet til brønnparken og varmedistribusjon til undersentralene ved Moholt 50|50 12
2.4 Termisk energiflyt i det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 13
2.5 Skisse av brønnplasseringer, samlekummer og tilhørende rørnett tilkoblet det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 (redigert) (AF Gruppen, 2015a) 14
2.6 Varmesentralen som er plassert på allmenningen ved Moholt 50|50 (Trondheim Kommune, 2017) 15
2.7 Ett av varmepumpeaggregatene installert i varmesentralen ved Moholt 50|50 16
2.8 Luftaggregat for oppvarming og kjøling av ventilasjonsluft, samt varmegjenvinning av overskuddsvarme fra byggene. 18
2.9 Kobling mellom rørvarmevekslerene og avløpsrørene for varmegjenvinning av avløpsvann ved Moholt 50|50 (Arnevik et al., 2018) 19
2.10 Konsentrisk rørvarmevekslere fra Rabtherm Energy Systems (Rabtherm Energy Systems, 2019b). 19

3.1 Bilde av varmesentralen i SD-anlegget levert av Schneider Electric med blant annet varmpepumpeaggregater, elektrokjel, pumper og rørsystem . . 23
3.2 Bilde av undersentralen i Tårn C i SD-anlegget levert av Schneider Electric 23
3.3 Bilde av varmeanlegget i undersentralen i SD-anlegget levert av IWMAC AS, med blant annet varmevekslere for oppvarming og kjøling av ventilasjonsluft samt kobling til varme- og kjølebatteri 25

3.4 Bilde av ventilasjonsanlegget til boligdelen i undersentralen i SD-anlegget levert av IWMAC AS, med blant annet roterente varmeveksler og varme- og kjølebatteri. 25
3.5 Systemskisse med instrumentering for termisk energi, trykk, temperatur og volumstrøm i det termiske energisystemet med ved Moholt 50|50 . . . 27

5.1 Målt varme- og kjøleleveranse ved Moholt 50|50 34
5.2 Sammenligning av graddagskorrigerte målinger av energiforbruk og simulert energiforbruk 36
5.3 Målt energibehov til varmtvannsberedning i de fem boligtårnene og barnehagen ved studentbyen Moholt 50|50 fra 2016 til 2019 37
5.4 Prosjektert termisk energibehov til varmtvannsberedning sammenlignet med målt energibehov til varmtvannsberedning for 2017, 2018 og 2019 39
5.5 Målt effektbehov til oppvarming av varmt tappevann onsdag 20. november 2019 for boligtårn A, B og E 40
5.6 Målt effektbehov til oppvarming av varmt tappevann onsdag 20. november 2019 for boligtårn C, D og barnehagen 40
5.7 Målt effektbehov til oppvarming av varmt tappevann lørdag 23. november 2019 for boligtårn C, D og barnehagen 41
5.8 Målt effektbehov til oppvarming av varmt tappevann lørdag 23. november 2019 for boligtårn C, D og barnehagen 41
5.9 Målt varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft for boliger fra 2016 til 2019 42
5.10 Målt varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft til næringsdelen i de fem tårnene fra 2016 til 2019 43
5.11 Målt varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft til barnehagen og biblioteksbygningen fra 2016 til 2019 44
5.12 Prosjektert varmebehov for oppvarming av ventilasjonsluft sammenlignet med det målte varmebehovet 45
5.13 Målt varmeleveranse til snøsmelteanleggene og aerotemperen fra 2016 til 2019 46
5.14 Målt spesifikk varmeleveranse til snøsmelteanleggene fra 2016 til 2019 . 47
5.15 Prosjektert varmebehov for snøsmelteanleggene og aerotemperen sammenlignet med det målte varmebehovet 48
5.16 Målt varmeleveranse til forvarming av varmt tappevann til HK21 49
5.17 Sammenligning av målt varmeleveranse til forvarming av varmt tappevann for Moholt 50|50 50
5.18 Målt el.forbruk til panelovner og varmekabler ved Moholt barnehage . . . 51
5.19 Målt el. forbruk til romoppvarming for biblioteksbygget ved Moholt 50|50 51
5.20 Beregnet el. forbruk til oppvarming i Tårn A-E ved Moholt 50|50 52
5.21 Målt månedlig oversikt over kjøleleveranse fra boligdelen i tårnene ved Moholt 50|50 53
5.22 Estimert, simulert og målt varmegjenvinning fra ventilasjonsluft til brønnparken ved studentbyen Moholt 50|50 54
5.23 Prosjektert kjøleleveranse fra varmegjenvinningen fra ventilasjonsluft til brønnpark sammenlignet med målt, simulert og estimert kjøleleveranse . 55

5.24 Målt varmeleveranse fra varmesentralen for Moholt 50|50 i 2019 56
5.25 Beregnet SCOP-verdi for varmepumpeaggregatene ved Moholt 50|50 . . 59
5.26 Beregnede SCOP-verdier for varmepumpeaggregatene ved Moholt 50|50. 59
5.27 Beregnede SCOP-verdier for varmepumpeaggregatene ved Moholt 50|50 med estimerte verdier for varmegjenvinning fra ventilasjonsluft. 60
5.28 Målt inn- og utløpstemperatur til fordamperen, utløpstemperatur til kondensatoren, samt temperaturløftet for varmepumpeaggregat VP1 61
5.29 Målt inn- og utløpstemperatur til fordamperen, utløpstemperatur til kondensatoren, samt temperaturløftet for varmepumpeaggregat VP2 61
5.30 Målt inn- og utløpstemperatur til fordamperen, utløpstemperatur til kondensatoren, samt temperaturløftet for varmepumpeaggregat VP3 62
5.31 Systemskisse av akkumuleringstankene i Tårn A, B, C og E 65
5.32 Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank i Tårn A 65
5.33 Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank i Tårn B 66
5.34 Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank i Tårn B 67
5.35 Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank i Tårn C 67
5.36 Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank i Tårn E 68
5.37 Systemskisse av akkumuleringstankene for varmt tappevann til bolig- og næringsdelen i Tårn D 69
5.38 Systemskisse av akkumuleringstankene for varmt tappevann til vaskeriet i Tårn D 69
5.39 Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank for varmt tappevann til boligene og første tank til vaskeriet i Tårn D 70
5.40 Systemskisse av akkumuleringstankene til barnehagen og biblioteket . . 71
5.41 Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank i barnehagen 71
5.42 Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank i barnehagen 72
5.43 Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank i bibliotek 73
5.44 Målt forbruk av elektrisitet til elkolbene i varmtvannsberedere ved Moholt 50|50 74
5.45 Borehullskonfigurasjonen til brønnparken i det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 (redigert) (AF Gruppen, 2015a) 76
5.46 Borehullkonfigurasjonen til a) det termiske energilageret i Emmaboda i Sverige (redigert) (Nordell et al., 2015) og b) det termiske energilageret Geotermos i prosjektet Fjell 2020 i Drammen (redigert) (Ramstad, 2017) 77
5.47 Termofysikalske data ved 0 °C og 10 °C for ulike frostvæsker (Stene, 2019) 78
5.48 Målt gjennomsnittlig væskemengde for pumpe P5 per dag 79
5.49 Målt tilbakeføring av varme fra solfangere, varmegjenvinning fra avløpsvann og varmegjenvinning fra ventilasjonsluft 80
5.50 Målt tilbakeføring av varme fra solfangere, varmegjenvinning fra avløpsvann og varmegjenvinning fra ventilasjonsluft 81
5.51 Prosjektert varmegjenvinning fra avløpsvann og varme fra solfangeranlegget sammenlignet med målt varmeleveranse 82
5.52 Målt gjennomsnittlig temperatur inn og ut av varmeveksleren for varmegjenvinning fra avløpsvann 83

5.53 Målt effekt vekslet i varmeveksleren for varmegjenvinning fra avløpsvann 83
5.54 Målt gjennomsnittlig strømningsmengde per dag gjennom pumpe P6 for varmegjenvinning fra avløpsvann 84
5.55 Målt gjennomsnittlig utetemperatur per dag ved Moholt 50|50 med temperaturgrenser for varmegjenvinning fra ventilasjonsluft 85
5.56 Temperatur varighetskurve for utelufttemperaturen for 2018 med grenser for varmegjenvinning fra ventilasjonsluft. 85
5.57 Målt gjennomsnittlig temperatur per dag inn og ut av varmeveksleren for overføring av varme fra solfangerne 87
5.58 Målt avgitt varmeeffekt vekslet i varmeveksleren for solfangeranlegget . . 87
5.59 Temperatur-varighetskurve for tur- og returtemperaturen i brønnparken i 2018 88
5.60 Temperatur-varighetskurve for tur- og returtemperaturen til brønnparken i 2019 89
5.61 Målt ukentlig temperaturgjennomsnitt for frostvæsken levert til brønnparken, for frostvæsken fra brønnparken og for frostvæsken levert fra distribusjonsnettet til brønnparken (varmegjenvinning) 90
5.62 Minste målte temperatur per uke for frostvæsken levert til brønnparken, for frostvæsken fra brønnparken og for frostvæsken levert fra distribusjonsnettet til brønnparken (varmegjenvinning) 91
5.63 Målt maksimal temperatur per uke for frostvæsken til brønnparken, frostvæsken fra brønnparken og frostvæsken fra distribusjonsnettet til brønnparken (varmegjenvinning) 92
5.64 Temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 4 år. I simuleringen er det brukt målte inndata for kjøleleveransen. 94
5.65 Temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 25 år. I simuleringen er det brukt målte inndata for kjøleleveransen. 94
5.66 Gjennomsnittlig temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 25 år. I simuleringen er det brukt målte inndata for tilbakeføring av varme. 95
5.67 Temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 25 år uten tilbakeføring av varme til brønnparken 96
5.68 Temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 4 år. I simuleringen er det brukt estimerte inndata for tilbakeføring av varme. 97
5.69 Temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 25 år. I simuleringen er det brukt estimerte inndata for tilbakeføring av varme. 98
5.70 Gjennomsnittlig temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 25 år. I simuleringen er det brukt estimerte inndata for tilbakeføring av varme. . . 98
5.71 Temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 25 år. I simuleringen er det brukt målte inndata for tilbakeføring av varme og stipulert varmeleveranse til HK21 99
5.72 Gjennomsnittlig temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 25 år. I simuleringen er det brukt målte inndata for tilbakeføring av varme og stipulert varmeleveranse til HK21. 100

5.73 Temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 4 år. I simuleringen er det brukt estimerte inndata for tilbakeføring av varme og stipulert varmeleveranse til HK21. 101
5.74 Gjennomsnittlig temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 25 år. I simuleringen er det brukt målte inndata for tilbakeføring av varme og stipulert varmeleveranse til HK21. 101
5.75 Temperaturutvikling i løpet av 25 år for en kompakt brønnpark med målt tilbakeføring av varme 103
5.76 Temperaturutvikling i løpet av 25 år for en kompakt brønnpark med estimert tilbakeføring av varme. 103
5.77 Temperaturutvikling i løpet av 25 år for en kompakt brønnpark med mer tilbakeføring av varme. 104
5.78 Gjennomsnittlig temperaturutvikling i løpet av 25 år for en kompakt brønnpark med mer tilbakeføring av varme. 105
5.79 Temperaturutvikling i løpet av 25 år for en kompakt brønnpark med 24 borehull og mer tilbakeføring av varme. 106

1 Systemskisse boligtårn D inkludert måleinstrumentering 118
2 Systemskisse boligtårn A, B, C og E inkludert måleinstrumentering . . . 119
3 Systemskisse Moholt barnehage inkludert måleinstrumentering 120
4 Systemskisse biblioteksbygningen inkludert måleinstrumentering 121
5 Systemskisse undersentral for forvarming av tappevann til HK21 inkludert måleinstrumentering 122
6 Systemskisse for nærkjøling og ventilasjonsoppvarming av boligtårn A inkludert måleinstrumentering 123
7 Systemskisse for nærkjøling og ventilasjonsoppvarming av boligtårn D inkludert måleinstrumentering 124
8 Systemskisse for nærkjøling og ventilasjonsoppvarming av Moholt barnehage inkludert måleinstrumentering 125
9 Systemskisse for nærkjøling og ventilasjonsoppvarming av biblioteksbygningen inkludert måleinstrumentering 126
10 Systemskisse for oppvarming av ventilasjonsluft og nærkjølesystemet i varmemodus i boligtårn A 127
11 Systemskisse for oppvarming av ventilasjonsluft og nærkjølesystemet i modus for kjøledrift i boligtårn A 128
12 Systemskise luftaggregat i næringsarealene og nordre del av barnehage . . 132
13 Systemskise luftaggregat i bibliotekbygningens kjøkken 132
14 Kobling av de konsentriske rørvarmevekslere fra Rabtherm Energy Systems (redigert) (Arnevik et al., 2018) 133
15 Bilde av displayet til varmepumpeaggregatets integrerte kontrollsystem (Carrier, 2012). 140
16 Besøksstatistikk for treningssenteret i boligtårn B, onsdag i uke 2 2020 (Sit, 2019) 157
17 Besøksstatistikk for treningssenteret i boligtårn B, lørdag uke 2 2020 (Sit, 2019) 157
18 SCOP beregninger i excel 158

19 Målt elektrisk forbruk til belysning for barnehagen 162
20 Målt spesifikt elektrisk forbruk til belysning for barnehagen 162
21 Målt elektrisk forbruk til belysning for biblioteket, kafeen og aktivitetsarealene i 2. etasje 163
22 Målt spesifikt elektrisk forbruk til belysning for biblioteket, kafeen og aktivitetsarealene i 2. etasje 163
23 Bilde av undersentralen i Tårn C i SD-anlegget levert av Sneider 166
24 Bilde av varmesentralen i SD-anlegget levert av Sneider 167
25 Bilde av undersentalen i SD-anlegget levert av IWMAC 168
26 Bilde av undersentalen i SD-anlegget levert av IWMAC 169
27 Utklipp fra undersentralens SD-anlegg som viser luftmengder for hybelarealene i boligtårn A, C, D og E 170
28 Utklipp fra undersentralens SD-anlegg som viser luftmengder for hybelarealene i boligtårn B og næringsarealene i boligtårn A, B, C, D og E . . . 171
29 Utklipp fra undersentralens SD-anlegg som viser luftmengder for barnehagens søndre og nordre del 172
30 Utklipp fra undersentralens SD-anlegg som viser luftmengder for bibliotekbygningens plan 1, plan 2 og kjøkken 173
31 Utklipp fra NGU som viser bergartene i området rundt brønnparken ved Moholt 50|50 174
32 Utklipp fra NGU som beskriver bergartene i området rundt brønnparken ved Moholt 50|50 175
33 Utklipp fra NGU som beskriver hovedbergarten i brønnparken ved Moholt 50|50 175
34 Utklipp fra NGU som viser en forenkelt oversikt over brønnparken ved Moholt 50|50 176
35 Borehullskonfihurasjon i EED 177
36 Inndata til brønnparken for simuleringer i EED 178
37 Brønnparkens koordinater 180

Kapittel 1

Introduksjon

Denne Masteroppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven ”Analyse av termisk energiforsyning ved Moholt 50|50” (Meisler, 2019). Prosjektoppgaven ble skrevet ved NTNU og omfatter en introduksjon og beskrivelse av det termiske energisystemet ved studentbyen Moholt 50|50. En innledende analyse av komponenter og utvalgte systemer ble også gjennomført.

Aktuelle områder og tema for videre dybdeanalyse ble avdekket i prosjektoppgaven. Dette ble grunnlaget for målene satt i denne Masteroppgaven.

1.1 Prosjektbeskrivelse og målsetting

Den norske bygningsmassen har en energibruk på omtrent 80 TWh i et normalår, som utgjør totalt 40 % av norsk innenlands sluttbruk av energi. Regjeringen har vedtatt at energibruken i bygg skal reduseres med 10 TWh fram mot 2030 (Regjeringen, 2018). Energibruk i boligbygninger, som studentbyen ved Moholt 50|50, utgjør over 50 % av total energibruk i den norske bygningsmassen. Installasjon av innovative og effektive termiske og elektriske energisystemer i boligbygninger vil bidra til en vesentlig reduksjon av energibruken og bidra at energimålene for 2030 kan nås.

Målsettingen med oppgaven er å utføre en dybdeanalyse av det termiske energisystemet installert ved studentbyen Moholt 50|50. Metodikken er basert på innhenting av måledata og databehandling, for å kunne analysere det termiske energisystemet ut fra prosjekterende verdier og ytelse av ulike delsystemer og komponenter. Videre mål vil være at resultatet fra oppgaven skal kunne brukes for læring om tekniske løsninger og potensielle forbedringer som kan gjøres ved fremtidige anlegg av samme type.

Det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 består av tre varmepumpeaggregater som bruker energibrønner fjell som varmekilde. Ved bruk av et legionellesikringssystem leveres varme på ca. 50 °C i et distribusjonsnett til varmtvannsberedning, oppvarming av ventilasjonsluft, forvarming av varmt tappevann, samt snøsmelting. Oppgaven er utarbeidet etter følgende punkter:

- **Analyse av varmebehov og kjøleleveranse**
  Sammenligning av målte data opp mot prosjekterte verdier for å avdekke i hvilken grad dimensjoneringsgrunnlaget for varmepumpeanlegget stemmer.

- **Varmepumpeaggregatenes ytelser**
  Varmepumpeaggregatenes effektfaktor (COP), årsvarmefaktor (SCOP) og energidekningsgrad vil beregnes og analyseres. Årlig energisparing vil kunne estimeres ved bruk av disse verdiene.

- **Vurdering av brønnparken og energibrønnene**
  Temperaturnivået i energibrønnene vil kunne gi en indikasjon på om dimensjoneringen av brønnparken er korrekt. Brønnparken skal fungere som et termisk energilager og det vil være spesielt interessant å simulere temperaturnivået i energibrønnene for å se temperaturutviklingen i det termiske energilageret.

- **Vurdering av systemutforming og forslag til forbedringer**
  Vurdere det termiske energisystemet og de ulike delsystemene og foreslå forbedringer av eventuell systemløsning eller komponentvalg

1.2 Avgrensning

Hovedfokuset ved denne Masteroppgaven er å analysere det termiske energisystemet ved Moholt 50|50. Analyser av varmeleveranser til studentbyen, varmepumpeaggregater og brønnpark er prioritert i denne oppgaven.

1.3 Struktur og innhold

Kapittel 1 - Introduksjon
Presenterer prosjektbeskrivelse og målsetting, struktur og innhold for masteroppgaven.

Kapittel 2 - Beskrivelse av Moholt 50|50
Presenterer studentbyen Moholt 50|50 og det termiske energisystemet. Prosjektert varmebehov og varmeleveranse tilbake til brønnparken er presentert for å gi et sammenligningsgrunnlag til målte verdier.

Kapittel 3 - Målesystemer, instrumentering og regulering
Presenterer måle- og reguleringssystemer som har vært benyttet for logging og datainnhenting.

Kapittel 4 - Prosessbeskrivelse og kvalitetssikring
Presenterer metodikken ved datainnsamling og -behandling. Videre er kvalitetssikring av måleutstyr og logger forklart. Databehandlingsprosessen har vært tidkrevende.

Kapittel 5 - Målinger og analyse
Kapittelet utgjør hoveddelen av Masteroppgaven, og består av målinger og analyser som er gjennomført for kartlegging av det termiske energisystemet. Analysen består av følgende underkapittel:

- Varmebehov og kjøleleveranse
- Analyse av varmesentral
- Analyse av varmepumpeaggregater
- Analyse av undersentraler og varmedistribusjon
- Analyse av brønnparken

Kapittel 6 - Konklusjon
De viktigste resultatene og funnene fra analysen av det termiske energisystemet i kapittel 5 er presentert i dette kapittelet.

Kapittel 7 - Videre arbeid
Presenterer forslag til videre arbeid.

Kapittel 2

Beskrivelse av Moholt 50|50

Moholt 50|50 er en fortetting og videre utvikling av Moholt studentby i Trondheim. Prosjektet med 5 boligtårn og studentbarnehage ble ferdigstilt i 2016, mens bibliotekbygningen med bibliotek, kafé, aktivitetshus og parkeringskjeller sto ferdig i desember 2018. Studentbyen har total 632 hybelenheter fordelt på de 5 boligtårnene, med parleiligheter, enmannshybler og 15-mannskollektiv. Hver av de fem boligtårnene har næringslokaler i første etasje.

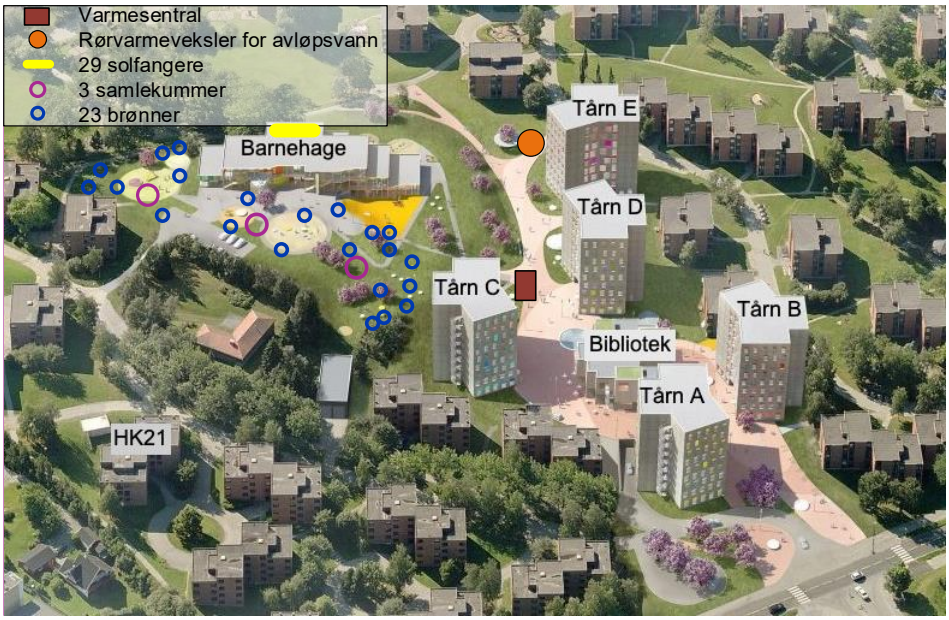
Barnehagen åpnet for drift 15. august 2016. Tre boligtårn, A, B og C, var innflytningsklare i august 2016, mens studenter kunne flytte inn i boligtårn D og E i desember 2016. Bibliotekbygningen åpnet 3. desember 2018.

Studentbyens termiske energisystem er et nærvarmeanlegg bestående av 3 varmepumpeaggregater, tilkoblet en brønnpark, som fungerer som et termisk energilager. Det distribueres varmt vann i isolerte rør til varmtvannsberedning, oppvarming av ventilasjonsluft til boligtårn, barnehage og biblioteksbygget samt forvarming av tappevann til eksisterende studentby og snøsmelting. Et legionellasikringssystem fra Apurgo gjør at varme for varmtvannsberedning kan leveres til studentbyen ved en temperatur på 50 °C. Det som er spesielt for det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 er at det tilbakeføres varme fra tre ulike kilder for termisk lading av brønnparken. I en forlengelse av rørnettet tilbakeføres varme på retursiden fra en gråvannsvarmevekser, varmegjenvinning fra ventilasjonsluft og varme fra et solfangeranlegg. Varmeleveransen fra varmegjenvinning av ventilasjonsluft er primært varmeleveranse til brønnparken og sekundært kjøleleveranse til bygningene i studentbyen. Detaljerte beskrivelser og oppbygningen av det termiske energisystemet finnes i prosjektoppgaven (Meisler, 2019).

Utvidelse av varmeleveransen til eksisterende studentby i Herman Krags vei 21 (HK21) ble ikke vedtatt før Moholt 50|50 var ferdigstilt og i drift. Tilkobling av rørnett til HK21

ble gjort under arbeidet med legging av varmedistribusjonsnettet til undersentralene. Varmeleveranse til forvarming av varmt tappevann til HK21 startet i mars 2019.

Et oversiktsbilde av de ulike byggene i studentbyen, samt viktige komponenter i det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 er presentert i figur 2.1.



Figur 2.1: Oversiktsbilde (redigert) over studentbyen Moholt 50| 50 (MDH Arkitekter, 2019)

Studentskipnaden i Trondheim (Sit) har vært byggeherre for prosjektet, med Veidekke ASA som totalentreprenør for bygg og AF Gruppen som totalentreprenør for termisk energiforsyning. Grensesnittet for de to totalentreprenørene har vært fra varmevekslerene for oppvarming og kjøling av ventilasjonsluft.

Arealene til boligtårnene, barnehagen og bibliotekbygningener er presentert i Vedlegg A.

Energiskonsepet for studentbyen har ført til støtte fra Enova SF for områdetenking og helhetlige energiløsninger basert på teknologisk innovasjon. Tilbakeføring av varme til brønnparken fra tre varmekilder og oppvarming av tappevann ved moderat temperatur (ca. 50 °C) til eksisterende studentby har vært viktige faktorer for den økonomiske støtten (Enova, 2015). Varmepumpeprisen fra Norsk varmepumpeforening og Energisparepriseen fra Trondheim kommune ble tildelt studentbyen i 2017 for områdetenkning og innovative løsninger.

2.1 Varmebehov ved Moholt 50|50

I dette kapittelet er varmebehovet og kjøleleveransen for Moholt 50|50 presentert. Det prosjekterte varmebehovet og den prosjekterte kjøleleveransen vil sammenlignes med målte verdier i kapittel 5.

Varme fra varmesentralen distribueres til undersentralene i boligtårnene, barnehagen, bibliotekbygningen og HK21. I undersentralene dekkes varmebehovet til varmtvannsberedning, oppvarming av ventilasjonsluft og snøsmelting. Ved ledig effektkapasitet vil varmeleveransen til undersentralen i HK21 gå til forvarming av tappevann. Primærfunksjonen for varmeveksleren for ventilasjonsluft er å tilbakeføre varme for lading av brønnparken, sammen med varme fra gråvannsvarmeveksleren og varme fra solfangeranlegget, men samtidig avkjøles ventilasjonsluften til byggene. Kjøleleveransen til byggene er prosjektert etter ønsket tilbakeførsel av varme til brønnparken. Type varmebehovene og kjøleleveransen ved Moholt 50|50 er presentert i tabell 2.1.

Varmebehov og kjøleleveranse				
Varmebehov	Varmt tappevann	Ventilasjons-varme	Snøsmelting	Rom-oppvarming
Kjøleleveranse	Frikjøling av ventilasjonsluft			

Tabell 2.1: Kartlegging av varmebehov og kjøleleveranse ved Moholt 50|50

Det prosjekterte varmebehovet for romoppvarming i hybel- og næringsarealene i boligtårnene var lavt. I tillegg til små hybelarealer ville et vannbårent oppvarmingssystem blitt kostbart hvis hvert enkelt rom skulle ha en radiator. Elektriske panelovner ble derfor installert i boligtårnene. Prosjektert varmebehov til romoppvarming i barnehagen og bibliotekbygningen er også lavt. Og elektriske panelovner og varmekabler ble derfor installert for å dekke varmebehovet til romoppvarming i disse byggene.

2.1.1 Prosjektert varmebehov og varmeleveranse til brønnparken

Boligtårnene, barnehagen og bibliotekbygningen samt varmeleveransen til brønnparken ved Moholt 50|50 er dimensjonert etter effektbehov. Det termiske energiforbruket av varmt tappevann er dimensjonert til å være 1000 kWh/år per student. Tallet er basert på varmebehovet til varmtvannsberedning i Lerkendal studentby og Teknobyen, som er to andre studentbyer Sit drifter i Trondheim.

Det er utført SIMIEN-simuleringer for hybel- og næringsarealene i boligtårnene (Torp, 2016). Årssimuleringen benytter lokal klimadata for Trondheim og beregner forventet årlig energibehov og forventet forbruk av elektrisitet til teknisk utstyr og romoppvarming. Dimensjonerende effekter og årlig energibehov for studentbyen er presentert i tabell 2.2.

Varmebehov				
	Ventilasjonsvarme		**Varmt tappevann**	
Beskrivelse	**Dim. effekt [kW]**	**Energi-behov [kWh/år]**	**Dim. effekt [kW]**	**Energi-behov [kWh/år]**
Tårn A-E	121	125 000	164	515 000
Tårn A, legesenter	18	2 500	2	6 600
Tårn B, treningssenter	25	6 000	10	6 658
Tårn C, næring, hybler	3	2 600	10	6 658
Tårn D, vaskeri, frisør	5	4 333	13	80 000
Tårn E, næring, hybler	3	2 600	10	6 658
Barnehage	40	97 845	10	28 000
Bibliotek, aktivitetshus	18	14 604	-	-
Kjeller tårn	-	-	-	-
Aerotemper, parkeringskjeller	20	19 800	-	-
Snøsmelteanlegg barnehage	37	37 260	-	-
Snøsmelteanlegg p-kjeller	17	16 560	-	-
Snøsmelteanlegg trapp tårn B	-	-	-	-
Totalt varmebehov	**307**	**329 102**	**219**	**649 574**
Totalt varmebehov er ca. 980 000 kWh/år				
Varmebehov hybler SIMIEN			170	640 000
Varmebehov hybler Lerkendal			164	529 412

Tabell 2.2: Prosjektert varmebehov for Moholt 50|50 (Tempero AS, 2015)

Totalt varmebehov til varmtvannsberedning, oppvarming av ventilasjonsluft og snøsmelting er prosjektert til å være ca. 980 MWh/år. Varmeleveransen til forvarming av varmt tappevann til HK21 er stipulert til 230 MWh/år, men er ikke inkludert i prosjekteringen av varmebehovet. Utvidelsen av varmeleveranse til HK21 ble bestemt etter studentbyen var ferdigstilt. Varmeleveranse til HK21 er derfor ikke inkludert i tabell 2.2.

Varmeleveranse til brønnpark fra varmegjenvinning av ventilasjonsluft og samtidig kjøleleveranse til bygningene er dimensjonert etter ønsket varmeleveranse til brønnparken. Prinsipp for varmegjenvinning av ventilasjonsluft er presentert i prosjektoppgaven (Meisler, 2019). De opprinnelige prosjekterte effektene var høye, og ble halvert for å unngå risiko for å få for høy temperatur i brønnparken.

Prosjektert varmeleveranse til brønnparken fra ventilasjonsluft er presentert i tabell 2.3. Årlig energibehov er beregnet med antall timer med full effekt for varmevekslerene, som er beregnet til å være 1430 timer per år.

Varmegjenvinning fra avløpsvann (gråvann) er dimensjonert med hensyn til vannmengde og temperatur. Prosjektert varmeleveranse tilbake til brønnparken er presentert i tabell 2.4.

Varmeleveranse til brønnpark fra ventilasjonsluft / kjøleleveranse				
	Opprinnelig effekt [kW]	**Redusert effekt [kW]**	**Vannmengde dT 10 m^3**	**Årlig energibehov [kWh/år]**
Tårn A	48	24	2,06	34 327
Tårn B	81	41	3,47	57 927
Tårn C	49	25	2,10	35 042
Tårn D	49	25	2,10	35 042
Tårn E	50	25	2,14	35 758
Barnehage	87	43	3,71	61 861
Bibliotek	56	28	2,40	40 048
Totalt effekt	**420 kW**	**210 kW**		**ca. 300 000 kWh/år**

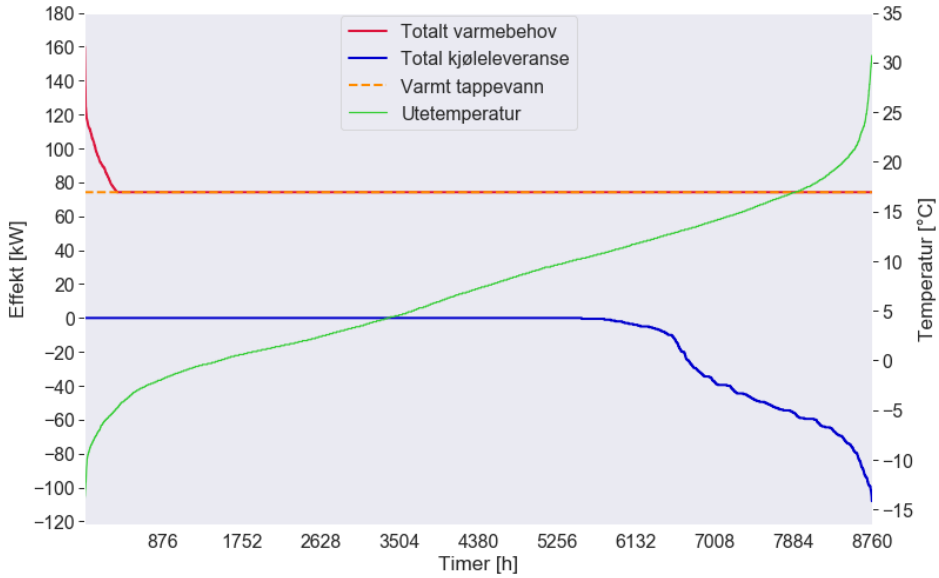
Tabell 2.3: Prosjektert kjøleleveranse for Moholt 50|50 (AF Gruppen, 2015b)

Prosjektert varme for tilbakeføring	
	Energiopptak [kWh/år]
Varmegjenvinning fra ventilasjon	ca 300 000
Varmegjenvinning fra avløpsvann	ca 100 000
Varme fra solfangere	ca 100 000
Totalt	**ca. 500 MWh/år**

Tabell 2.4: Prosjektert kjølebehov for Moholt 50|50 (AF Gruppen, 2015b)

Det er prosjektert med en total varmeleveranse fra avløpsvann, varmegjenvinnin fra ventilasjonsluft og varme fra solfangere tilbake til brønnparken på ca. 500 000 kWh/år. Årlig energileveranse fra varmepumpeanlegget var dimensjonert til 1,3 GWh/år. Det er prosjektert med en vektet gjennomsnittlig effektfaktor (COP) på 3, hvor ca. 870 MWh/år skal hentes fra brønnparken.

Effekt-varighetskurven for årlig varmebehov og kjøleleveranse er presentert i figur 2.2. Kurven er laget med basis i målte verdier for varmebehov til oppvarming av ventilasjonsluft og kjøleleveranse for 2018, samt prosjekterte verdier for varmtvannsberedning.



Figur 2.2: Effekt-varighetskurve for varmebehovet og kjøleleveransen ved Moholt 50|50

2.1.2 Prosjektert forbruk av elektrisitet

Prosjektert forbruk av elektrisitet til teknisk utstyr og romoppvarming i boligtårnene, barnehagen, bibliotekbygningen samt parkeringskjelleren er presentert i tabell 2.5.

Prosjektert forbruk av elektrisitet			
	El. teknisk [kWh]	**El. oppvarming [kWh]**	**Totalt [kWh]**
Tårn A-E	727 045	500 000	1 227 045
Tårn A, legesenter	28 000	5 800	33 800
Tårn B, treningssenter	69 000	4 800	73 800
Tårn C, næring, hybler	36 000	2 300	59 000
Tårn D, vaskeri, frisør	117 000	2 000	119 000
Tårn E, næring, hybler	36 000	2 300	59 000
Barnehage	80 000	19 000	99 000
Bibliotek, aktivitetshus	24 644	11 773	36 417
Kjeller tårn	19 815	-	19 815
Parkeringskjeller tårn	19 240	-	19 240
Snøsmelteanlegg barnehage	1 000	-	1 000
Snøsmelteanlegg p-kjeller	1 000	-	1 000
Snøsmelteanlegg trapp tårn B	100	-	100
Totalt	**1 158 744**	**547 973**	**1 706 817**
Totalt spesifikk verdi	**45,6 kWh/m^2**	**24,4 kWh/m^2**	**67,3 kWh/m^2**
SIMIEN hybler 2-9.etg			1 227 045
Lerkedal hybler 2-9.etg			1 394 412

Tabell 2.5: Prosjektert forbruk av elektrisitet for Moholt 50|50 (Tempero AS, 2015)

Det totale energibehovet til romoppvarming er prosjektert til ca. 24 kWh/(m^2 år) for studentbyen. Boligtårnene har et forventet energibehov til romoppvarming på ca. 20 kWh/(m^2 år). Prosjektert energibehov for barnehagen og biblioteket er henholdsvis ca. 9 og 12 kWh/(m^2 år).

Prosjektert forbruk av elektrisitet til teknisk utstyr i tabell 2.5 inkluderer ikke komponenter i varmesentralen.

2.2 Beskrivelse av det termiske energisystemet

I dette kapittelet er det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 beskrevet. Spesifikasjoner for de ulike komponentene i det termiske energisystemet er presentert i Vedlegg C og en detaljert beskrivelse ble presentert i prosjektoppgaven (Meisler, 2019).

Det termiske energisystemet ved studentbyen Moholt 50|50 består av:

A Termisk energiproduksjon

1 Varmepumpeanlegg

2 Brønnpark som er et termisk lager

3 Elektrokjel

B Distribusjonssystemer

1 Varmedistribusjonsnett mellom varmepumpeanlegg og undersentraler

2 Distribusjonsnett mellom brønnpark og varmegjenvinningskilder (D)

3 Varmeopptaksnett ellom varmepumpeanlegg og brønnpark

C Forbruksanlegg og undersentraler

1 Varmtvannsberedning

2 Oppvarming av ventilasjonsluft

3 Forvarming av tappevann til eksisterende studentby, HK21

4 Snøsmelting

D Tilbakeføring av varme til brønnparken

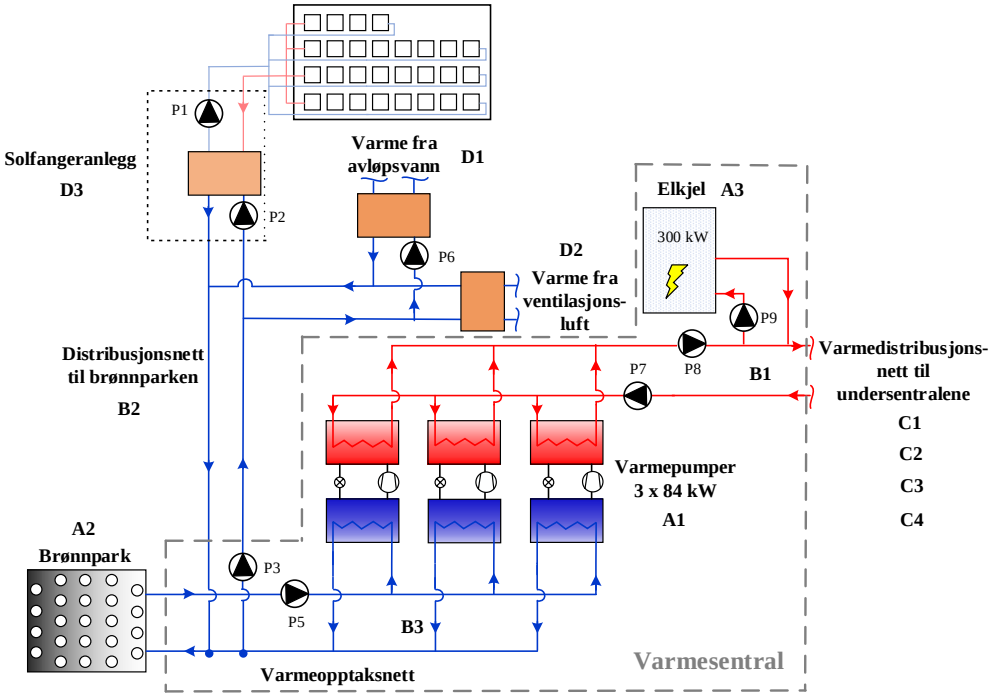
1 Varme fra gråvannsvarmeveksler

2 Varme fra ventilasjonsluft

3 Varme fra solfangeranlegg

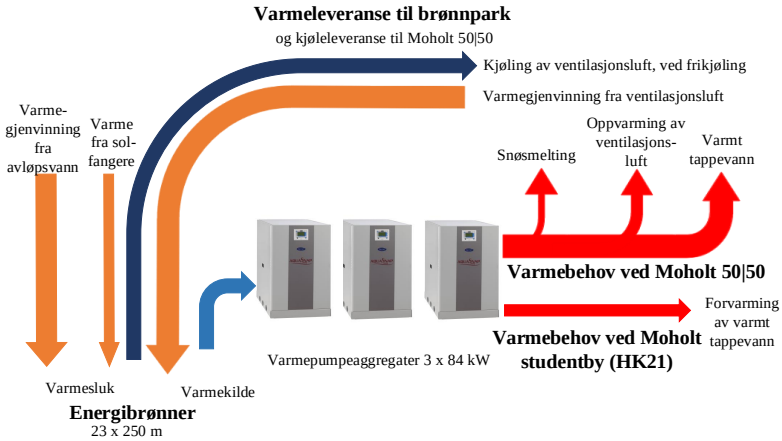
Detaljerte systemskisser med tilhørende måle- og føleutstyr for distribusjonsnettet til brønnparken, undersentralene i boligtårnene, barnehagen og biblioteksbygget, samt systemskisser for nærkjøling og oppvarming av ventilasjonsluft for de ulike bygningene er presentert i Vedlegg B.

En prinsipiell systemskisse av det termiske energisystemet er presentert i figur 2.3. Brønnparken fungerer som et termisk energilager, hvor varme fra gråvannsvarmeveksleren, varme fra ventilasjonsluft og varme fra solfangeranlegget føres tilbake og lader brønnparken. 3 varmepumpeaggregater i varmesentralen lever varme til undersentralene ved en temperatur på ca. 50 °C ved bruk av et legionellesikingssystem fra Apurgo. Elkjelen er dimensjonert som spisslastkilde og som reserveløsning.



Figur 2.3: Forenklet systemskisse av varmsentral, varmeopptaksnett, varmedistribusjonsnettet til brønnparken og varmedistribusjon til undersentralene ved Moholt 50|50

Den termiske energiflyten for Moholt 50|50 er presentert i figur 2.4.



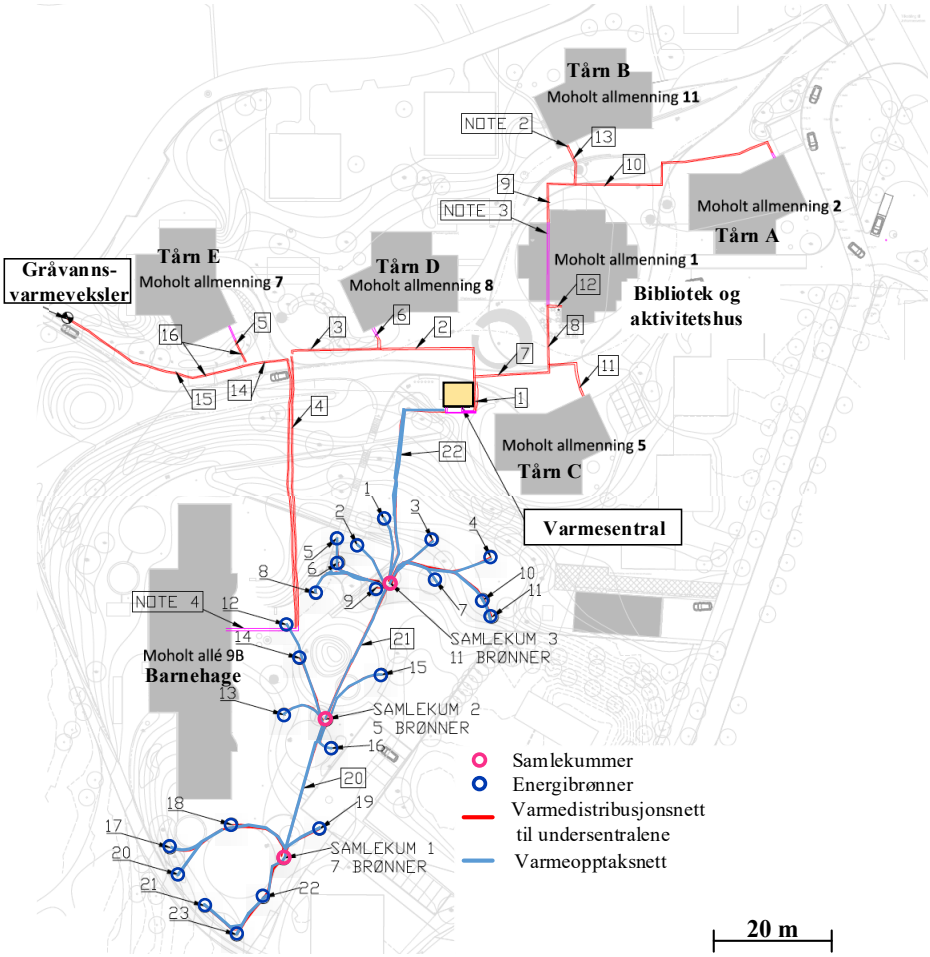
Figur 2.4: Termisk energiflyt i det termiske energisystemet ved Moholt 50|50

2.2.1 Brønnpark

Det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 bruker energibrønner i fjell som varmekilde for varmepumpeanlegget. Brønnparken, som består av 23 energibrønner med en gjennomsnittsdybde dybde på ca. 250 meter, er et termisk energilager som lades ved tilbakeføring av varme fra en gråvannsvarmeveksler, varmegjenvinning fra ventilasjonsluft og varme fra et solfangeranlegg. Brønnparken ble prosjektert til å være et termisk lager med tilbakeføring av varme for å redusere antall energibrønner. Uten tilbakeføring av varme måtte brønnparken hatt flere energibrønner for å kunne levere nok varme til studentbyen.

Ugunstige grunnforhold har ført til variasjon i boreretning og i borehullavstanden til energibrønnene. Kollektorvæsken i energibrønnene og i varmedistribusjonsnettet til brønnparken er denaturert etanol (HX i-24). Spesifikasjoner for brønnparken er presentert i i Vedlegg C.1.

Brønnkonfigurasjonen er presentert i figur 2.5, og viser plassering av energibrønnene, samlekummene, rørstrekkene for varmeopptaksnettet samt varmedistribusjonsnettet til undersentralene. Dimensjoner for varmeopptaksnettet, varmedistribusjonsnettet til undersentralene, samt energibrønnenes koordinater er presentert i Vedlegg S.



Figur 2.5: Skisse av brønnplasseringer, samlekummer og tilhørende rørnett tilkoblet det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 (redigert) (AF Gruppen, 2015a)

2.2.2 Varmesentral

Varmesentralen er prefabrikkert på ramme og ble levert i to deler av ENSO (Litauen). Den er plassert på studentbyens allmenning, med glassvegger på tre sider, samt en informasjonsskjerm med dagens energileveranse. Denne løsningen gir forbipasserende innblikk i det termiske energisystemet ved studentbyen og er samtidig egnet til undervisningsopplegg.

Varmesentralen består av blant annet tre varmepumpeaggregater, en elektrokjel, aerotemper- og avtrekksvifte, samt pumper og rørnett. Varmesentralen er vist i figur 2.6.

Figur 2.6: Varmesentralen som er plassert på allmenningen ved Moholt 50|50 (Trondheim Kommune, 2017)

2.2.3 Varmepumpeanlegg

Varmepumpeanlegget består av tre like væske- vann aggregater, som er parallellkoblet på både fordamper- og kondensatorsiden. Arbeidsmediet er R410A, som er det mest brukte arbeidsmediet for varmepumpeaggregater i dag (NOVAP, 2018). Hvert aggregat har to kompressorer med på/av-regulering, som gir totalt 6 reguleringstrinn for anlegget. Varmepumpeaggregatene er levert av Carrier (Carrier, 2013). Spesifikasjoner for varmepumpeaggregatene er presentert i Vedlegg C.

Figur 2.7: Ett av varmepumpeaggregatene installert i varmesentralen ved Moholt 50|50

2.2.4 Elektrokjel

Elektrokjelen er levert av Varmeteknikk AS (Varmeteknikk, 2018). Kjelen er koblet i serie med varmepumpeaggregatene og har en dimensjonerende effekt på 300 kW. SD-anlegget effektbegrenser elektrokjel til 100 kW, for å minimere kjelens effektforbruk.

Elektrokjelen er dimensjonert for å ta spisslasten i perioder med høyt effektbehov. Elektrokjelen vil også være en reserveløsning (back-up) ved feil på varmepumpeaggregatene. Spesifikasjoner for elektrokjelen er presentert i Vedlegg C.3.

2.2.5 Undersentralene i boligtårn A-E, barnehagen og bibliotekbygningen

Hvert boligtårn, barnehagen og bibliotekbygningen har et teknisk rom hvor undersentralen er plassert. Varme fra varmesentralen leveres til de ulike undersentralene, hvor varmen fordeles til varmeveksleren for oppvarming av ventilasjonsluft og varmeveksleren for oppvarming av varmt tappevann. Systemskisser av undersentralene som viser tilkoblingen for tappevann, nærkjøling og ventilasjonsluftoppvarming er presentert i Vedlegg A. Grensesnittet mellom AF Gruppen og Veidekke er etter varmeveksleren for ventilasjonsluft.

Spesielt for det termiske energisystemet er at på grann av legionallesikring fra Apurgosystemet treninger ikke distribusjonstemperaturen være høyere enn 50 °C for å kunne varme varmt tappevann.

Varmt tappevann

Boligtårn A, B, C og E har fire akkumuleringstanker for varmt tappevann. Barnehagen og bibliotekbygningen har lavere varmtvannsbehov og har installert to akkumuleringstanker. Elkolber er installert i akkumuleringstank 3 og 4 i boligtårnene, og i tank 2 i barnehagen og bibliotekbygningen, for å opprettholde en temperatur på ca. 50 °C i tankene.

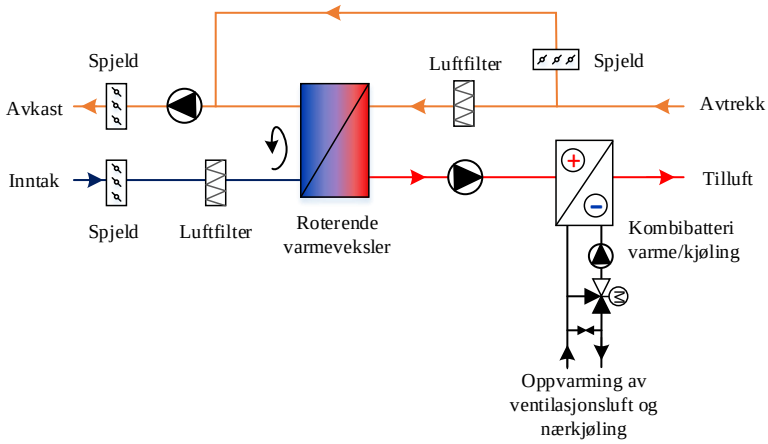
I boligtårn D er deler av næringsarealet brukt til vaskeri for studentbyen. Undersentralen til boligtårn D består har derfor tre ekstra akkumuleringstanker som forsyner vaskeriet med varmt tappevann. Ved behov for varme til både akkumuleringstankene til vaskeriet og hybel- og næringsarealene, vil akkumuleringstankene til hybel- og næringsarealene ha prioritet. Spesifikasjoner for akkumuleringstankene og legionellasikringssystemet er presentert i Vedlegg C.4.

Ventilasjonsoppvarming og nærkjøling

I hver undersentral i boligtårnene er det installert individuelle luftaggregater for hybelarealene og næringsdelen. Barnehagen er delt inn i nordre og søndre del, som har hvert sitt luftaggregat som leverer varme og kjøling til ventilasjonsluften. Biblioteket, aktivitetsarealene og kjøkkenet har ett luftaggregat hver. Ventilasjonsystemet i hybelarealene i boligtårnene har konstante luftmengder (CAV). Barnehagen, bibliotekbygningen og næringsarealene i boligtårnene har variable luftmengder (VAV).

Luftaggregatene installert i hybelarealene og næringsdelen i boligtårnene er av merket GOLD-40 RX-Passi. Hybel- og næringsarealene har aggregater med luftmengde på henholdsvis 12 650 m^3/h og 1500 m^3/h. Luftaggregatene har en temperaturvirkningsgrad på 84 % og energimerke A (Swegon, 2015).

Systemskissen av luftaggregatet for oppvarming og kjøling av ventilasjonsluft til hybelarealene i boligtårn A-E og barnehagens sørside er presentert i figur 2.8. Vedlegg C.5 viser systemskissen for luftaggregatene til barnehagens sørside, boligtårnenes næringsarealer og bibliotekbygningens kjøkken.



Figur 2.8: Luftaggregat for oppvarming og kjøling av ventilasjonsluft, samt varmegjenvinning av overskuddsvarme fra byggene.

Den roterende varmeveksleren overførervarme fra varm avtrekksluft fra byggene til kaldere inntaksluft. Kombibatteriets varmemodus kobles inn når inntaksluften fra varmeveksleren er lavere enn settpunkt. En motorstyrt ventil regulerer varmemengden i kombibatteriet etter temperaturen fra den roterende varmeveksleren og settpunttemperaturen.

Kombibatteriet kan enten være i varmemodus eller kjølemodus, og kan derfor ikke levere varme og kjøling samtidig. Ventilasjonsaggregatet var prosjektert til å kunne levere kjøling ved en utetemperatur ned til 7 °C. Aggregatet som ble installert hadde en forhåndsinnstilt temperaturgrense på 12 °C som det ikke gikk an å overstyre. Dette fører til at ved utetemperaturer lavere en 12 °C, vil det ikke kunne tilbakeføres varme til brønnparken.

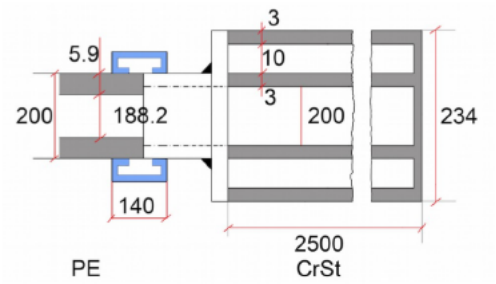
Konseptet med den lave temperaturgrensen på 7 °C var å tilbakeføre mest mulig varme til brønnparken ved å utnytte den roterende varmeveksleren maksimalt. Ved å veksle maksimal mengde varme fra avtrekksluften til inntaksluften i varmeveksleren, og deretter kjøle inntaksluften ned til settpunkt ville kjølebatteriet kunne levert varme tilbake til brønnparken i potensielt store deler av året.

2.2.6 Varmegjenvinning fra avløpsvann

Avløpsvann fra studentbyen Moholt 50|50 gjenvinnes i en gråvannsvarmeveksler plassert i den nedre delen av avløpsrøret til studentbyen, ved boligtårn E. Varmen som gjenvinnes i varmeveksleren veksles med HXi-24 i distribusjonsnettet til brønnparken, og varmen tilbakeføres til brønnparken sammen med varme fra ventilasjonsluft og varme fra solfangeranlegget.

Den konsentriske rørvarmeveksleren består av 5 seriekoblede rørvarmevekslere koblet i serie.Koblingen mellom avløpsrørene og rørvarmeveksleren, samt dimensjoner på de ulike rørene er vist i figur 2.9. Ytre diameter på avløpsrørene og rørvarmeveksleren er henholdsvis 200 mm og 234 mm. Spesifikasjoner og beskrivelse av gråvannsvarmeveksleren er presentert i Vedlegg C.6.

Investeringskostnadene for gråvannsvarmeveksleren ekskludert graving av grøft er ca. 1,5 MNOK.



Figur 2.9: Kobling mellom rørvarmevekslerene og avløpsrørene for varmegjenvinning av avløpsvann ved Moholt 50|50 (Arnevik et al., 2018)

Figur 2.10 viser lignende rørvarmevekslerene levert fra Rabtherm Energy Solutions.

Figur 2.10: Konsentrisk rørvarmevekslere fra Rabtherm Energy Systems (Rabtherm Energy Systems, 2019b).

2.2.7 Solstasjon og solfangeranlegg

Solfangeranlegget er koblet til brønnparkens distribusjonsnett hvor varme tilbakeføres til brønnparken. 29 solfangere med et totalt areal på ca. 73 m^2 leverer varme tilbake til

brønnparken for lading.

En solstasjon regulerer anlegget lokalt og består av en integrert varmeveksler som overfører varme fra propylenglykol i solfangerkretsen til HX i-24 i brønnparkens varmedistribusjonsnett. Settpunkt for varmeveksling er 20 °C. Solfangerene levert av SGP Varmeteknikk AS er montert i fire rader på barnehagens tak, med en vertikal vinkel på 45 °mot sør. Radene har en avstand på 5 meter for å unngå å skygge for hverandre. Spesifikasjoner for solfangeranlegget er presentert i Vedlegg C.7 (AF Gruppen, 2016).

Investeringskostnadene for solfangeranlegget er ca. 1 MNOK, ekskludert innfesting av solfangerene.

2.2.8 Snøsmelteanlegg

Snøsmelteanlegget er koblet til varmedistribusjonsnettet etter varmeveksleren for oppvarming av ventilasjonsluft. Boligtårn A har et snøsmelteanlegg i nedkjøringen til parkeringskjelleren. Barnehagen har et snøsmelteanlegg med ito soner, i gangstien opp til barnehagen og barnehagens inngangsparti. I parkeringskjelleren er det installert en aerotemper som holder temperaturen i parkeringskjeller over settpunkt.

Spesifikasjoner for snøsmelteanlegget er presentert i tabell 2.6.

Parameter	Areal	Effekt	Driftsområde
Tårn A			
Nedkjøring parkeringskjeller	ca. 72 m^2	17 kW	-6 °C til 3 °C
Barnehage			
Gangsti opp til barnehagen Barnehagens uteområde	ca. 162 m^2	37 kW	-7 °C til 5 °C
bibliotekbygningen			
Parkeringskjeller			Settpunkt: 5 °C

Tabell 2.6: Spesifikasjoner for snøsmelting ved barnehagen og nedkjøringen til parkeringskjelleren (IWMAC AS, 2019a).

Det er installert snøfølere integrert i gangveien opp til barnehagen og øverst i nedkjøringen til parkeringskjelleren. Snøføleren detekterer snø eller is og vil ved behov starte driften av snøsmelteanlegget.

Kapittel 3

Målesystemer, instrumentering og regulering

I dette kapittelet presenteres de ulike måle- og oppfølgingssytemene ved Moholt 50|50. Videre er instrumenteringen og reguleringen av det termiske energisystemet beskrevet.

3.1 Måle- og overvåkningssystemer

For å styre, regulere og gjøre målinger i det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 brukes to separate Sentrale driftsovervåkningsanlegg (SD-anlegg):

- SD-anlegg levert av Schneider Electric overvåker og regulerer varmesentralen og undersentralene fram til varmeveksleren for ventilasjonsluft
- SD-anlegg levert av IWMAC med integrert energioppfølgingssystem (EOS) overvåker og regulerer undersentralene for varmevekslere for ventilasjonsluft

Et SD-anlegg er et system som styrer, regulerer og overvåker alle bygningers tekniske anlegg. De tekniske anleggene styres automatisk ved hjelp av forhåndsdefinerte reguleringsstrategier, men kan styres manuelt ved behov. SD-anlegget kartlegger måledata og viser energibruken til det termiske energisystemet i drift. Dette er et svært viktig hjelpeverktøy for driftsavdelingen for å sikre god drift, men også for å kunne oppdage feil og identifisere mulige årsaker.

Energioppfølgingssystemer (EOS) brukes for å registrere og kontrollere energi- og effektforbruket til et termisk energisystem. Ved bruk av EOS kartlegges energiforbruket, og

energistyringen i bygningene effektiviseres for å forhindre unødvendig energibruk.

3.1.1 SD-anlegg for varmesentral og varmtvannsberedning i undersentral

SD-anlegget, Building Operation Work Station 1.9, levert av Schneider Electric, logger måleverdier fra varmesentralen og undersentralene frem til grensesnittet ved varmevekslerene for ventilasjonsluft. Måledata fra de ulike komponentene logges hvert 15. minutt eller hver gang verdien endres. For de fleste komponentene endres verdiene opp til flere ganger per minutt.

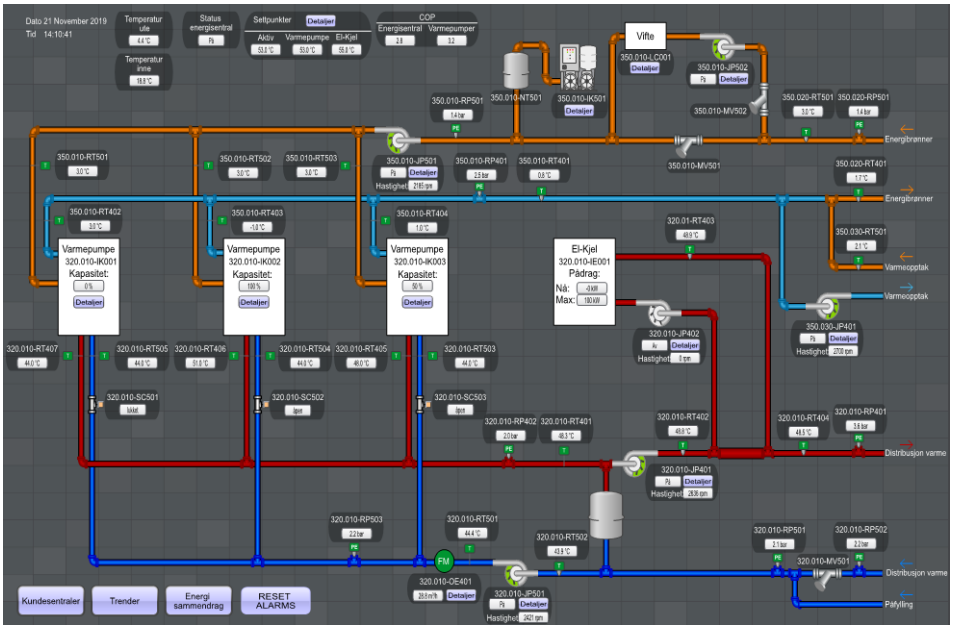
Systemets hovedside viser varmesentralen og dens komponenter, samt tidseksakte måleverdier for de ulike følerene og målerene. Videre kan undersentralene, systemet som viser varmegjenvinningen fra avløpsvann, varme fra solfangeranlegget og systemet som viser forvarming av tappevann til HK21, fås opp med komponenter og verdier.

Systemet har et energisammendrag, hvor relevante måledata fra varmesentralen og undersentralene er summert per dag, uke og måned. Energisammendraget er lagret i systemet i ett år. Feil og ukorrekte verdier ble oppdaget i energisammendraget og systemet ble endret og omstartet fra 1. januar 2019. Energisammendraget for månedene før 1. januar 2019 er tilgjengelige, men ikke pålitelige, og er derfor ikke brukt i denne analysen.

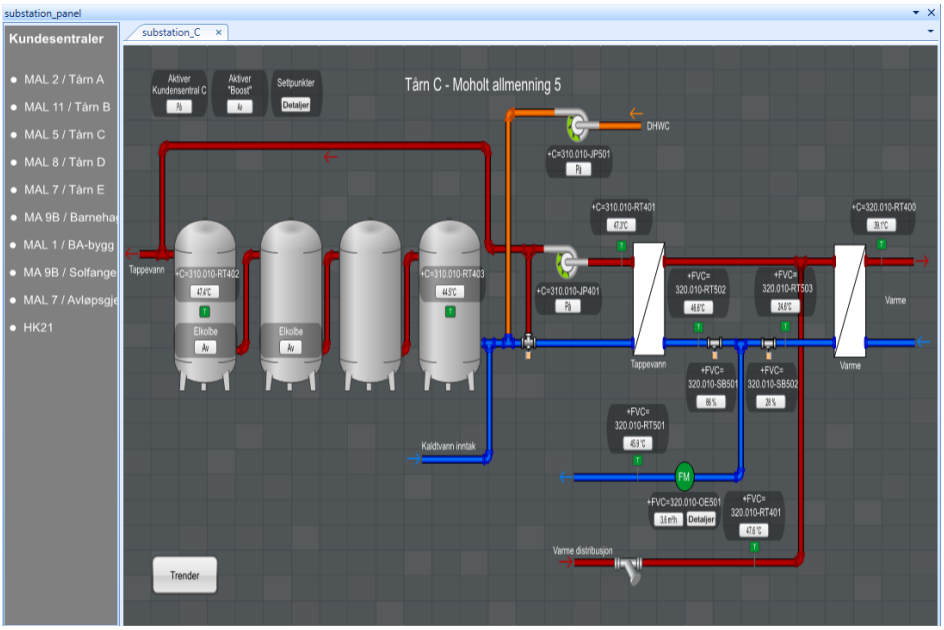
Måleverdier for hver komponent kan fås ved grafisk fremstilling eller i listefunksjon. I listefunksjonen kan makismal, minimal eller gjennomsnittsverdier velges per minutt, time, dag, uke eller år. Måledata kan eksporteres til Excel eller i csv-format, for videre analyser. SD-anlegget lagrer opp til omtrent 100 000 datapunkt per målekomponent. Et nytt datapunkt genereres hvis verdien endrer seg på desimalnivå. Avhengig av antall endringer en komponent generer, vil totalt antall måneder med målinger lagret i datasystemet være ulikt for de ulike målekomponentene.

SD-anlegget ble i løpet av de første driftsårene hacket, hvor det termsike energisystemet ble stoppet med krav om penger for å gi tilbake kontrollen over anlegget. Dyktige medarbeidere ved NTNU fikk kontroll over SD-anlegget og sikkerhetstiltak ble igangsatt for at lignende episoder ikke skal kunne skje i fremtiden.

SD-anleggets varmesentral og undersentralen i Tårn C er vist i henholdsvis figur 3.1 og 3.2. Flere relevante bilder i større oppløsning er vist i Vedlegg P.



Figur 3.1: Bilde av varmesentralen i SD-anlegget levert av Schneider Electric med blant annet varmpepumpeaggregater, elektrokjel, pumper og rørsystem



Figur 3.2: Bilde av undersentralen i Tårn C i SD-anlegget levert av Schneider Electric

3.1.2 SD-anlegg for undersentralene

IWMAC AS har levert et web-basert SD-anlegg, eller toppsystem, med integrert overvåknings- og energippfølgingssystem (EOS), som kontrollerer ventilasjonsanleggene i undersentralene til boligtårnene, barnehagen og biblioteket. I tillegg kan måledata fra byggenes følere, målere og komponenter hentes ut. Blant annet viser SD-anlegget forbruk av varme til varmtvannsberedning og oppvarming av ventilasjonsluft samt forbruk av elektrisitet i de ulike bygningene. Måledata kan hentes fra to ulike funksjoner i SD-anlegget:

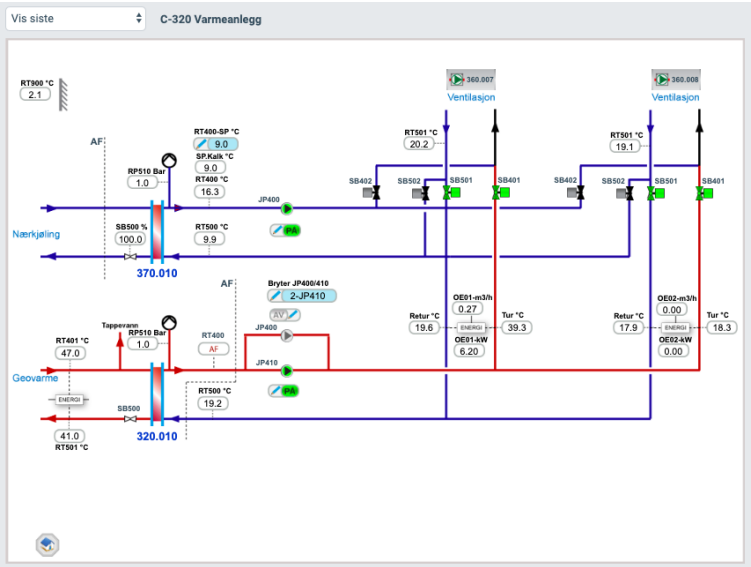
- EOS-delen av SD-anlegget hvor relevante forhåndsdefinerte data er spesifisert, og kan vises i ulike diagrammer og i en liste-funksjon. Måledata kan deretter eksporteres.
- SD-anleggets graf-funksjon der alle parametre kan hentes ut i graf-funksjon og deretter eksporteres

I EOS-delen av SD-anlegget kan gjennomsnittlig måledata hentes ut per time, dag, uke, kvartal eller måned. Relevant data kan fås per kvadrat eller per person. Måledata kan eksporteres til CSV- eller Excel-fil.

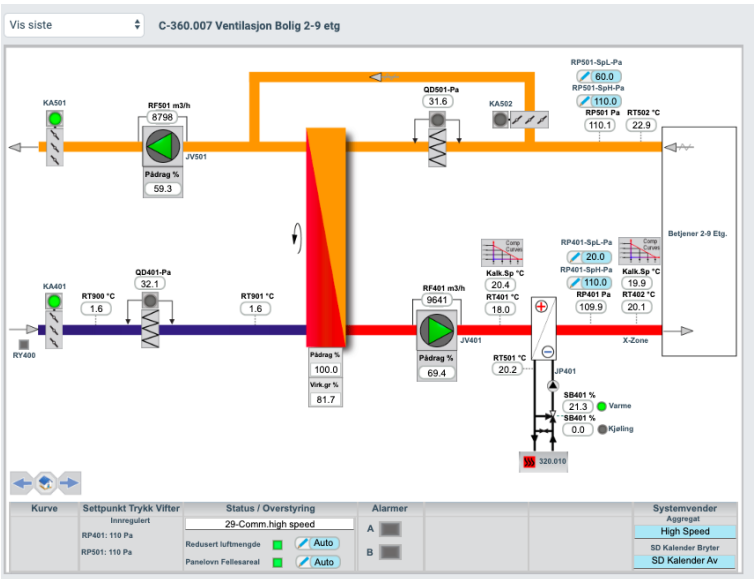
I SD-anleggets graf-funksjon kan ønsket parameter velges for en gitt tidsperiode. Valgt komponent vil fremstilles grafisk i et linjediagram. I denne datauthenting-funksjonen kan måledata hentes ut kontinuerlig. Måledata kan eksporteres som Excel eller CSV-fil.

SD-anlegget logger data kontinuerlig ved endring i verdiene for de ulike målekomponentene. Hvis verdien ikke ender seg logges et nytt datapunkt omtrent hver time. SD-anlegget lagrer data for anlegget i minst 5 år, mens energidata lagres i 10 år. Backup av datainformasjonen sendes til lokale serverer hver time og sikrer at data ikke går tapt (IWMAC AS, 2019b).

Figur 3.3 og figur 3.4 viser varmeanlegget for ventilasjon og ventilasjonsanlegget for boligdelen i Tårn C i SD-anlegget. Flere relevante bilder av SD-anlegget finnes i Vedlegg P.



Figur 3.3: Bilde av varmeanlegget i undersentralen i SD-anlegget levert av IWMAC AS, med blant annet varmevekslere for oppvarming og kjøling av ventilasjonsluft samt kobling til varme- og kjølebatteri



Figur 3.4: Bilde av ventilasjonsanlegget til boligdelen i undersentralen i SD-anlegget levert av IWMAC AS, med blant annet roterende varmeveksler og varme- og kjølebatteri.

3.2 Instrumentering og målepunkter

Instrumenteringen for overvåking og regulering av det termsike energisystemet ved Moholt 50|50 er grundig, men mange målere og følere både i varmesentralen og i undersentralene.

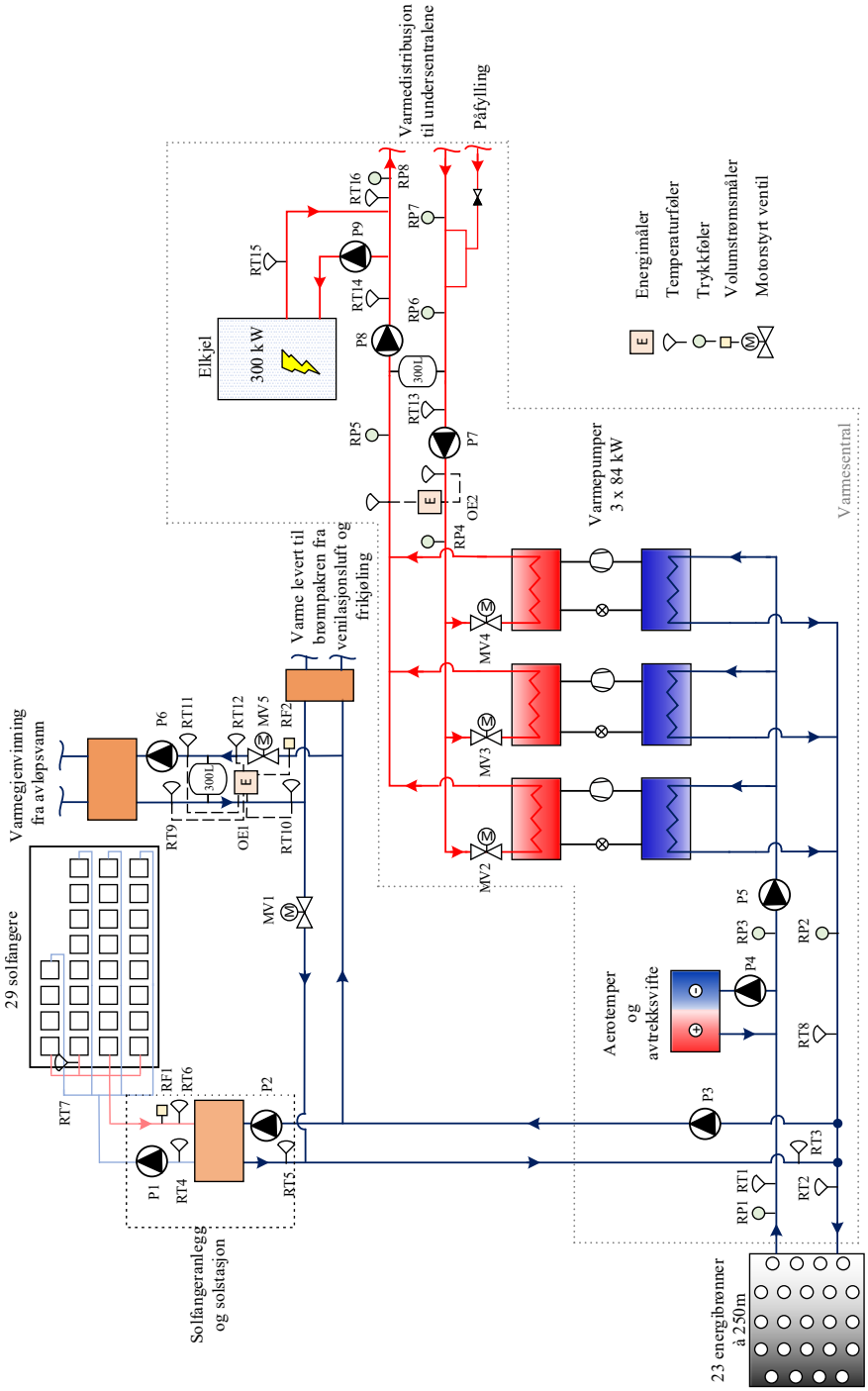
Måleinstrumentering med tilhørende måleenheter for regulering og overvåking av det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 er presentert i tabell 3.1. Målenheter for det interne styringssystemet i varmepumpeaggregatene er presentert i kapittel 3.2.1.

ID	Beskrivelse	Enhet
Energimålere		
OE	Energi	kW
q	Volumstrøm	m^3/h
Θ	Væsketemperatur	°C
Temperaturmålere		
RT	Tur- /returtemperatur	°C
Trykksensor		
RP	Trykk	kPa
Vannmengde		
RF	Volumstøm	m^3/h
Pumpe		
P	Effektforbruk	W
	Pumpehastighet	rpm
	Volumstrøm	m^3/h
Mekanisk stengeventil		
MV	Åpne-/ lukkeinnstilling	%

Tabell 3.1: Måleenheter i det termsike energisystemet ved Moholt 50|50

Plassering av målepunkter for regulering og overvåkning i varmesentralen, varmeopptaksnettet, distribusjonsnettet til brønnparken og varmedistribusjonsnettet til undersentralene er presentert i figur 2.3. Det termiske energisystemet har en rekke delsystemer og undersentraler, og det er valgt å presentere disse i Systemskisser for undersentralene er vist i Vedlegg B. Bekskrivelse av de ulike komponentene i systemskissene og deres funksjon er presentert i Vedlegg D.

Nøyaktighet i måleutstyr er viktig for å kunne beregne måleavvik ved datainnhenting. Målenøyaktighet i installert instrumentering ved det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 er presentert i Vedlegg E. Spesifikasjoner for installerte pumper er presentert i Vedlegg C.8.



Figur 3.5: Systemskisse med instrumentering for termisk energi, trykk, temperatur og volumstrøm i det termiske energisystemet med ved Moholt 50|50

3.2.1 Måleenheter i varmepumpeaggregatene

Varmepumpeaggregatene har et integrert kontrollsystem, Pro-Dialog+ som blant annet måler trykk, temperatur, driftstid og antall start per time. Ved feil eller problemer vil det komme opp en feilmelding i kontrollsystemet. Tilgjengelige måleenheter i varmepumpeaggregatene er presentert i Vedlegg F

Parameterene presentert i Vedlegg F er tilgjengelige ved å lese av displayet på varmepumpeaggregatene. Det er ikke mulig å lese av parameterene i loggsystemet direkte i SD-anlegget.

Tabell 3.2 viser relevante parametere for videre analyse av varmepumpeaggregatene i kapittel 5.

Display	Beskrivelse	Enhet
Krets A		
term_ewt	Inngående vanntemperatur	°C
term_Iwt	Utgående vanntemperatur	°C
CAP_T	Total kapasitet	%
EWT	Inngående vanntemperatur	°C
DGT_A	Trykkgasstemperatur A	°C
Kondensator		
COND_EWT	Turtemperatur	°C
COND_LWT	Returtemperatur	°C
Driftstid		
hr_mach	Driftstid enhet	time
chr_ach	Driftstid i kjølemodus, enhet	timer
hhr_mach	Driftstid i varmemodus, enhet	timer
st_mach	Antall start, enhet	-
hr_cp_a1	Timer kompressor A1	time
st_cp_a1	Antall start kompressor A1	-
hr_cp_a2	Timer kompressor A2	time
st_cp_a2	Antall start kompressor A2	-

Tabell 3.2: Relevante måleenheter i det interne kontrollsystemet til varmepumpeaggregatene (Carrier, 2012)

Kapittel 4

Prosessbeskrivelse og kvalitetssikring

I dette kapittelet er prosessbeskrivelse og metode benyttet for uthenting av måledata fra det termiske energisystemet beskrevet. Analysen av det termiske energisystemet bygger i stor grad på måledata hentet fra SD-anleggene, og er viktig for å kunne gjøre gode analyser. Utfordringer tilknyttet datauthenting og databehandling er diskutert og listet opp. Gjennom denne prosessen er data verifisert og anlegget kvalitetssikret.

4.1 Prosessbeskrivelse

Analysen er basert på eksportert data fra de to SD-anleggene. Bygningene og undersentralens SD-anlegg (IWMAC) har data fra driftstart og kan eksporteres blant annet i timer, dager, måneder og år. Varmesentralens SD-anlegg (Schneider Electric) lagrer kun et visst antall datapunker for hver måler. Avhengig av antall målepunker som er gjort varierer tidsperioden det er mulig å hente ut data.

Det ble gitt lesertilgang til byggenes og undersentralenes SD-anlegg. Tilgang til varmesentralens SD-anlegg kunne først kun fås ved å sitte på Sit Boligs lokaler i Trondheim. Etter mailkorrespondans med underleverandør til SD-anlegget ble det gitt tilgang til varmesentralens SD-anlegg, som har vært avgjørende for kvaliteten til analysen. Tilgang ble opprettet 1. oktober 2019.

4.1.1 Generell fremgangsmåte ved databehandling

Måledata er hentet ut ubehandlet fra SD-anlegget, for lettere å detektere feilmålinger og avvik. SD-anleggene leverer måledata i Excel- og CSV-filer. Ved eksportering av Excel-filer har antall datapunkter eksportert av gangen vært betraktelig mindre enn ved eksportering av CSV-filer. Datauthenting har blitt gjort til CSV-filer for deretter å importeres i Excel. Flere av datasettene er godt over 100 000 datapunkt, og kan regnes som store i Excelmålestokk. Enkle beregninger og grafisk framstilling ville tatt betraktelig lengre tid og potensielt bydd på flere problemer sammenlignet til andre databehandlingsverktøy.

Pandas, et programvarebibliotek skrevet for programmeringsspråket Python, er beregnet for bruk ved databehandling og analyse. Pandas kan behandle store mengder data raskt samtidig som det kan utføre mer kompliserte beregninger. En webapplikasjon for datavisualisering- og behandling, Jupyter Notebook, ble brukt for beregninger og plotting av grafer.

Data er hovedsaklig hentet ut ubehandlet fra SD-anleggene, for deretter å finne blant annet månedlige gjennomsnitt eller utføre enkle beregninger og summeringer i pandas.

Det har vært en tidkrevende prosess å hente ut data og lære Python og Pandas for databehandling og datavisualiseringen, men det har gitt gode resultater og gjort det enkelt å analysere måledata. Ved funn av avvik har Excel vært brukt til å finne feilmålingene og enten endre dem direkte eller endre datasettene ved bruk av Pandas.

4.2 Kvalitetssikring av SD-anlegget

Feil i datalogger og måleutstyr er først møtt i arbeidet med databehandling av eksporterte datafiler fra SD-anleggene.

I SD-anlegget for varmesentralen og varmdistrubusjonsnettene har hver datalogg plass til omtrent 100 000 datapunkt per målekomponent. Byggene og undersentralenes SD-anlegg logger et nytt datapunkt per time Følsomheten for nye datapunkt for målekomponentene bestemmes etter forventet variasjon i verdien som logges. Følsomheten bør verken være for stor eller for lav, da verdifull datainformasjon kan gå tapt.

Utfordringer knyttet til arbeidet med datauthenting og -behandling er listet opp punktvis under.

- **Følsomhet for logging av nye datapunkt**
  I SD-anlegget for varmsentralen og distribusjonsnettene er følsomheten for logging av nye datapunkt for høy for en rekke målekomponenter. Dette fører til en stor mengde data av omtrent samme verdier og tap av historiske data. I noen tilfeller er det kun et par måneder som er tilgjengelige i SD-anlegget.

- **Energisammendrag**

Energisammendraget i SD-anlegget for varmesentralen og distribusjonsnettene hadde flere feil i målinger, blant annet av varme fra gråvannsvarmeveksleren og varme fra solfangeranlegget. Dette førte til at verdiene for 2018 ikke var pålitelige og kunne brukes. Anlegget ble restartet 1. januar 2019.

- **Negative verdier**
  I begge SD-anleggene logger enkelte målekomponenter flere negative verdier. Varmeveksleren til solfangeranlegget målte blant annet en rekke negative effekter. I tillegg har flere perioder i byggene og undersentralens SD-anlegg negative verdier.

Kapittel 5

Målinger og analyse

5.1 Varmebehov og kjøleleveranse

Dimensjoneringen og utformingen av det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 er basert på varmebehovet og ønsket kjøleleveranse til byggene ved studentbyen. Den målte varme- og kjøleleveransen til studentbyen er sammenlignet med det prosjekterte varmebehovet og kjøleleveransen, for å undersøke om dimensjoneringen av energisystemet er korrekt. Ytelse av varmepumpeanlegget vil beregnes og brønnparken vil bli analysert.

For å sammenligne reelt og beregnet effekt- og energibehov for det termiske energisystemet, er følgende analysemetoder benyttet:

1. Innsamling av måledata for varmebehovet og kjøleleveransen for 2017, 2018 og 2019

2. Normalårskorrigering av målt energibehov for oppvarming av ventilasjonsluft og snøsmelting, sammenlignet med simulert energibruk fra SIMIEN

3. Analyse av målt og beregnet energibruk til romoppvarming ved bruk av elektrisitet

4. Sammenligning av prosjektert kjøleleveranse med målt, simulert og estimert kjøleleveranse

Varme- og kjøleleveransen til varmtvannsberedning, oppvarming av ventilasjonsluft og snøsmelting er målt fra byggene og undersentralenes SD-anlegg. Dette avviker med omtrent 8 % fra varmeleveransen fra varmesentralen og vil bli omtalt i kapittel 5.2.2. Varmeleveranse til forvarming av varmt tappevann til HK21 og varmeleveranse tilbake til brønnparken er målt fra varmesentralens SD-anlegg.

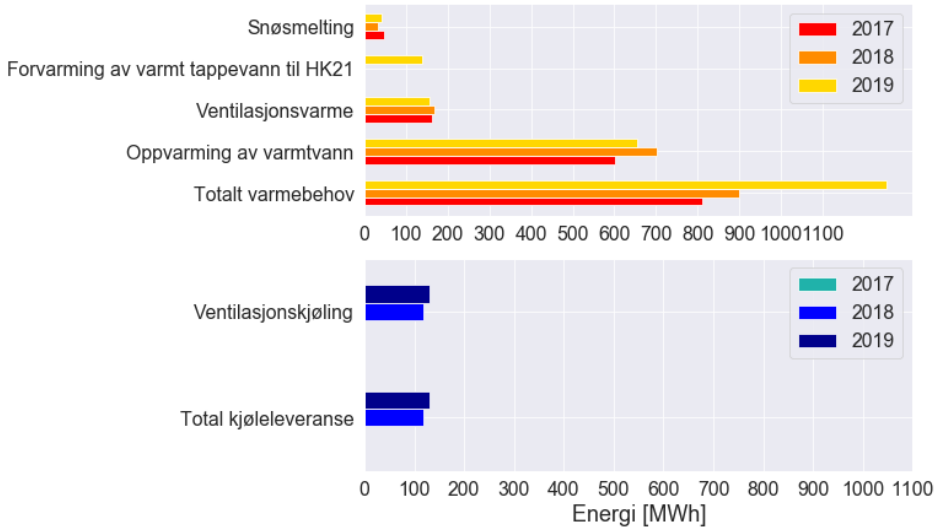
5.1.1 Årlig varme- og kjøleleveranse

Energileveransen til Moholt 50|50 er avlest for 2017, 2018 og 2019. Verdiene for de tre årene indikerer hva energiforbruket til studentbyen kan være i løpet av et år. Moholt bibliotek ble først åpnet i november 2018 og forvarming av tappevann til eksisterende bygg, HK21, startet i mars 2019, som resulterer i en høyere varme- og kjøleleveranse for 2018 og 2019. Registrering av måledata for kjøleleveransen til ventilasjonsluft startet 1. januar 2018.

Varme- og kjøleleveranse for 2017, 2018 og 2019 er presentert i tabell 5.1 og figur 5.1.I denne presentasjonen er ikke varmebehovet normalårskorrigert, og det er bare varme- og kjøleleveransen fra det termiske energisystemet som er tatt med. Forbruk av elektrisitet til romoppvarming og til oppvarming av varmt tappevann i akkumuleringstankene i undersentralene er presentert og analysert i senere kapitler.

Måler	**Beskrivelse**	**Energi [kWh/år]**		
		2017	**2018**	**2019**
OE4-OE7	Oppvarming varmtvann	600 842	701 298	655 934
OE10-OE13 OE-15-OE19	Ventilasjonsvarme	162 809	167 184	157 097
OE9, OE14	Snøsmelting	47 592	31 721	41 282
OE8	Forvarming varmtvann, HK21	-	-	139 298
	Total varmeleveranse	811 243	900 203	993 611
OE	Ventilasjonskjøling	-	119 195	130 118
	Total kjøleleveranse	-	119 195	130 118
		Spesifikk energi [kWh/m^{2}år]		
		2017	**2018**	**2019**
OE	Oppvarming varmtvann	26,8	31,3	29,2
OE	Ventilasjonsvarme	7,3	7,5	7,0
OE	Snøsmelting	-	-	-
OE	Forvarming varmtvann, HK21	-	-	-
	Total varmeleveranse	39,8	38,8	36,2
OE	Ventilasjonskjøling	-	5,3	5,8
	Total kjøleleveranse		5,3	5,8

Tabell 5.1: Målt varme- og kjøleleveranse for Moholt 50|50



Figur 5.1: Målt varme- og kjøleleveranse ved Moholt 50|50

Den totale varmeleveransen for 2017 og 2018 er i gjennomsnitt 13 % lavere enn det prosjekterte varmebehovet for stundtenbyen. I mars 2019 ble forvarming av varmt tappevann til HK21 koblet til det termiske energisystemet. Totalt prosjektert varmebehov inkluderer ikke varmeleveransen til forvarming av tappevann, men er inkludert i total varmeleveranse og sammenlignet i dette kapittelet fordi det sier noe om hvor mye varme som hentes fra brønnparken og hvor mye varme som leveres av det termiske energisystemet. Total varmeleveranse for 2019 økte til ca. 1 000 MWh/år, 2 % høyere enn prosjektert varmebehov for studentbyen. Dette er et svært lite avvik og viser fordelen ved å bruke måleverdier ved prosjektering av anlegg.

Avvik for total varmeleveranse til studentbyen er liten, men varmeleveransen til oppvarming av ventilasjonsluft og snøsmelting er i gjennomsnitt henholdsvis ca. 50 % og 45 % lavere enn det prosjekterte varmebehovet.

Varmeleveransen til HK21 er stipulert til å være 230 MWh/år, omtrent 40 % høyere enn varmeleveransen til HK21 i 2019. Det er derfor sannsynlig at avviket mellom målt varmeleveranse og prosjektert varmebehov vil øke i årene som kommer. Den prosjekterte varmeleveransen til disribusjonsnettet til brønnparken eller kjøleleveransen til byggene er betydelig høyere enn målt kjøleleveranse. Dette vil diskuteres i kapittel 5.1.8.

5.1.2 Normalårskorrigering av varmebehov

I kapittel 5.1.1 ble det avdekket at varmeleveransen til oppvarming av ventilasjonsluft og varmeleveranse til snøsmelting er betydelig lavere enn prosjekterte verdier. Både varmeleveranse til ventilasjonsluft og varmeleveranse til snøsmelting er verdier som er avhengige av utetemperatur, og kan variere fra år til år.

For å kunne sammenligne varme til oppvarming av ventilasjonslift og varme til snøsmelteanlegg med prosjekterte verdier er disse blitt normalårskorrigert. Detaljer for beregning av graddagstallet er presentert i Vedlegg G. Tabell 5.2 viser normalårskorrigert varmeleveranse til ventilasjonsluft og varme til snøsmelting.

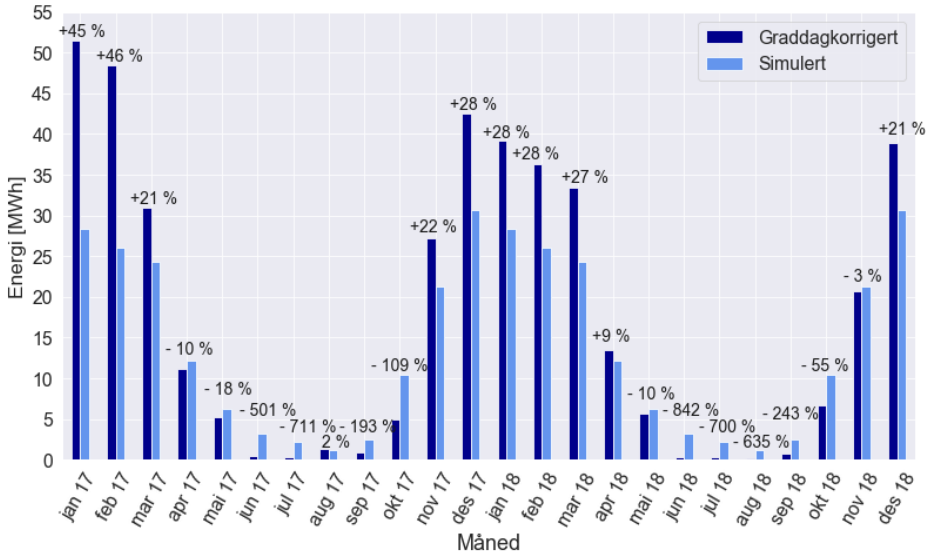
År	**Måned**	**Korr. faktor** [-]	**Målt varmelev** [kWh]	**Korrigert varmelev** [kWh]	**Simulert varmelev** [kWh]	**Avvik** [kWh]	[%]
2017	Jan	1,16	44 339	51 478	28 375	23 103	+45
	Feb	1,06	45 577	48 448	26 099	22 349	+46
	Mars	1,06	29 198	30 979	24 379	6 599	+21
	April	0,97	11 491	11 112	12 178	-1 066	-10
	Mai	1,02	5 179	5 282	6 227	-945	-18
	Juni	1,21	435	525	3 155	2630	-501
	Juli	1,08	246	263	2 132	-1 869	-711
	Aug	1,07	1 177	1 265	1 235	30	+2
	Sept	1,58	538	851	2 491	-1 640	-193,
	Okt	1,19	4 176	4 978	10 381	-5 403	-109
	Nov	0,97	27 996	27 240	21 257	5 983	+22
	Des	1,06	40 053	42 536	30 692	11 844	+28
Sum			210 402	224 956	168 601	7 528	**+25**
2018	Jan	0,97	40 396	39 184	28 375	10 809	+28
	Feb	0,92	39 416	36 363	26 099	10 164	+28
	Mars	0,84	39 843	33 468	24 379	9 089	+27
	April	1,08	12 410	13 428	12 178	1 250	+9
	Mai	1,77	3 189	5 644	6 227	-583	-10
	Juni	1,01	331	335	3 155	-2 820	-842
	Juli	2,50	107	267	2 132	-1 865	-700
	Aug	1,07	157	168	1 235	-1 067	-634
	Sept	1,31	555	727	2 491	-1 765	-243
	Okt	0,90	7 407	6 681	71 933	-3 700	-55
	Nov	1,12	18 449	20 737	21 257	-521	-3
	Des	1,06	36 647	38 846	30 692	8 154	+21
Sum			198 905	195 746	168 601	103 778	**+14**

Tabell 5.2: Normalårskorrigering av varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft og varme til snøsmelting ved Moholt 50|50

Simulert termisk energiforbruk avviker fra det målte, graddagkorrigerte energiforbruket med 25 % i 2017 og 14 % i 2019. Det simulerte termiske energiforbruket inkluderer ikke termisk varme levert til biblioteket og gatevarme. Målt forbruket av termisk varme for biblioteket, kaféen, aktivitetsarealene og varme til snøsmelting i 2018 er ca. 150 MWh/år, og graddagskorrigert endes det termiske energiforbruket til ca. 153 MWh/år. Ekskluderes disse verdiene fra det graddagskorrigerte energiforbruket reduseres det totale avviket fra ca. 14% til ca. 5 % for 2018. For 2017 vil det totale avviket reduseres fra ca. 25 % til ca. 3 % hvis varme til snøsmelting ekskluderes.

Et totalt avvik på **ca. 3 %** og **ca. 5 %** fra simulerte verdier i henholdsvis 2017 og 2018 er svært lite og tyder på at simuleringen for boligtårnene og barnehagen har vært tilnærmet lik de faktiske forholdene.

Figur 5.2 viser avviket mellom simulert og graddagskorrigert varmebehov for studentbyen Moholt 50|50.



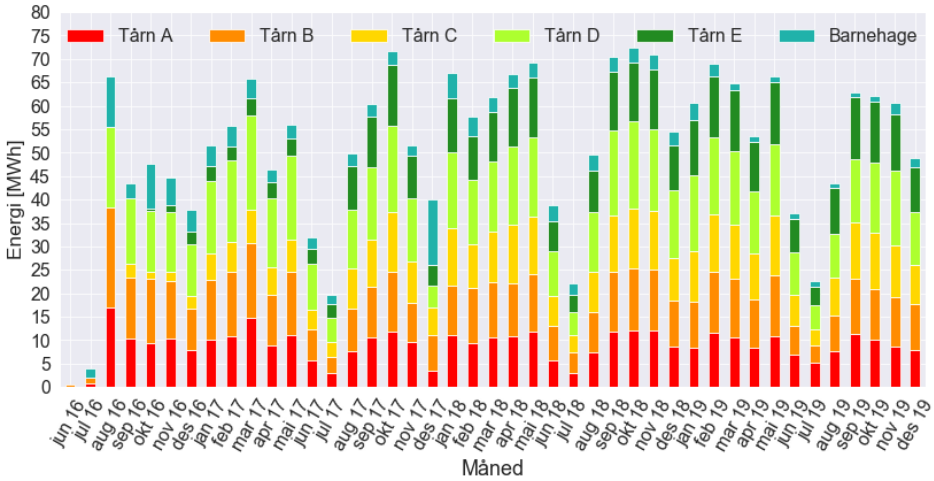
Figur 5.2: Sammenligning av graddagskorrigerte målinger av energiforbruk og simulert energiforbruk

Det graddagskorrigerte varmebehovet til oppvarming av ventilasjonsluft og varme til snøsmelting forklarer ikke den store differansen mellom varmebehovet og varmeleveransen for oppvarming av ventilasjonsluft.

5.1.3 Varme til varmtvannsberedning i boligtårnene og barnehagen

Varme til varmtvannsberedning utgjør den største andelen av varmebehovet ved Moholt 50|50. Det har ikke vært mulig å hente ut spesifikk data om varmtvannsbehovet til biblioteksbygningen. Forbruket av varmtvann i biblioteksbygningen og barnehagen er beregnet til kjøkkenene, håndvask samt enkel dusj i barnehagen. Og det kan antas at den største andelen av varmt tappevann ved Moholt 50|50 går til studentboligene, som har dusjfasiliteter til både studentboligene og treningssenter, samt vaskeri.

Månedlig fordeling av varmeleveransen for varmt tappevann for de ulike boligtårnene og barnehagen fra 2016 til 2019 er presentert i figur 5.3. Det er ikke registrert målinger før juni 2016. De første studentene flyttet inn i tre av fem boligtårn i august 2016. De to siste boligtårnene, tårn B og E var innflytningsklare i desember 2016. Målt månedlig varmeleveranse til varmtvannsberedning er presentert i Vedlegg H.1.



Figur 5.3: Målt energibehov til varmtvannsberedning i de fem boligtårnene og barnehagen ved studentbyen Moholt 50|50 fra 2016 til 2019

Total varmeleveranse for 2017, 2018 og 2019 er henholdsvis ca. 601 MWh, 702 MWh og 652 MWh. Det termiske energibehovet til varmtvannsberedning er relativt likt for de ulike boligtårnene. Boligtårn C og E har et lavere varmebehov enn de andre boligtårnene fram til august 2017. Dette skyldes trolig at få studenter flyttet inn da bygningene var innflytningsklare i desember 2016. Siden august 2017 har alle hyblene i studentbyen vært fylt opp.

Høstsemesteret starter i midten av august og slutter rundt midten av desember, men noen studenter har siste eksamen allerede i slutten av november. Vårsemesteret starter i starten av januar og slutter i midten av juni. Samtidig reiser mange studenter bort i feriene og ved semesterslutt, særlig om sommeren og i julen. Dette forklarer det relativt lave varmtvanns-

behovet i desember og juli.

Varmeleveranse til varmtvannsberedning per person i boligtårnene og barnehagen er presentert i tabell 5.3. Antall studenter i hvert boligtårn og antall barn i barnehagen er presentert i Vedlegg A.

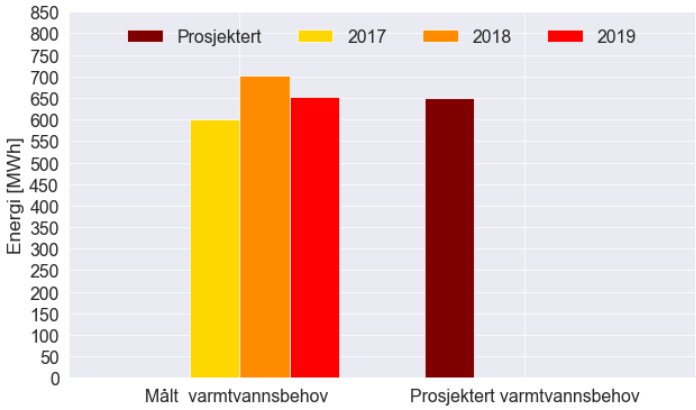
	Varmeleveranse til varmtvannsberedning per person		
Bygg	**[kWh/(år person)]**		
	2017	**2018**	**2019**
Tårn A	897	957	900
Tårn B	1 040	1 052	1 000
Tårn C	664	953	924
Tårn D	1 323	1 393	1 257
Tårn E	538	954	1 012
Gjennomsnitt per år	**892 kWh/pers.**	**1 062 kWh/pers.**	**1 029 kWh/pers.**
Barnehage	**281 kWh/pers.**	**235 kWh/pers.**	**123 kWh/pers.**

Tabell 5.3: Varmeleveranse til varmtvannsberedning per student for de ulike byggene ved Moholt 50|50

Gjennomsnittlig varmeleveranse til varmtvannsberedning per person per år varierer fra ca. 900-1100 kWh i boligtårnene og fra ca. 125-281 kWh i barnehagen. Varmeleveransen til varmtvannsberedning i boligtårnene har et avvik på ca. 10 % fra prosjektert varmebehov. Dette er lavt og viser nytteverdien av å bruke reelle måledata til prosjektering av termiske energisystem.

Boligtårn D har høyere varmeleveranse til varmtvannsberedning enn de andre boligtårnene. Den høye varmeleveransen skyldes høyst sannsynlig at boligtårnet inkluderer varmeleveranse til varmtvannsberedning i vaskeriet. Treningssenteret i boligtårn B har dusjfasiliteter som høyst sannsynlig er årsaken til den noe høyere varmeleveransen sammenlignet med boligtårn A, C og D.

Sammenligning mellom målt og prosjektert termisk energibehov til varmtvannsberedning for de fem boligtårnene og barnehagen er presentert i figur 5.4.

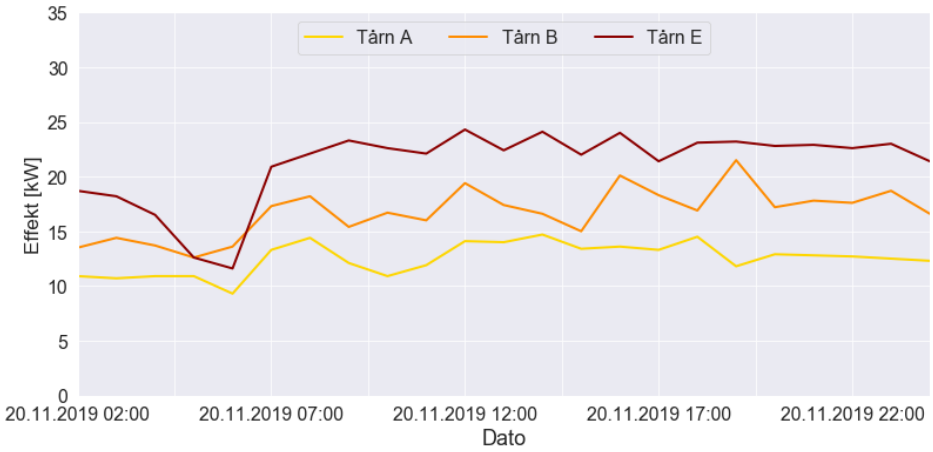


Figur 5.4: Prosjektert termisk energibehov til varmtvannsberedning sammenlignet med målt energibehov til varmtvannsberedning for 2017, 2018 og 2019

Avviket mellom målt og prosjektert varmtvannsbehov for 2017, 2018 og 2019 er henholdsvis ca. -8 %, +8 % og +4 %. Det lave avviket skyldes at Sit Bolig har prosjektert varmtvannsbehovet til studentboligene basert på tall fra andre studentbyer de drifter. Varmtvannsbehovet kalkulert i SIMIEN og varmtvannsbehovet basert på studentbyen Lerkendal i Trondheim varierer henholdsvis med 13-33 % og 2-10 % fra den målte varmeleveransen.

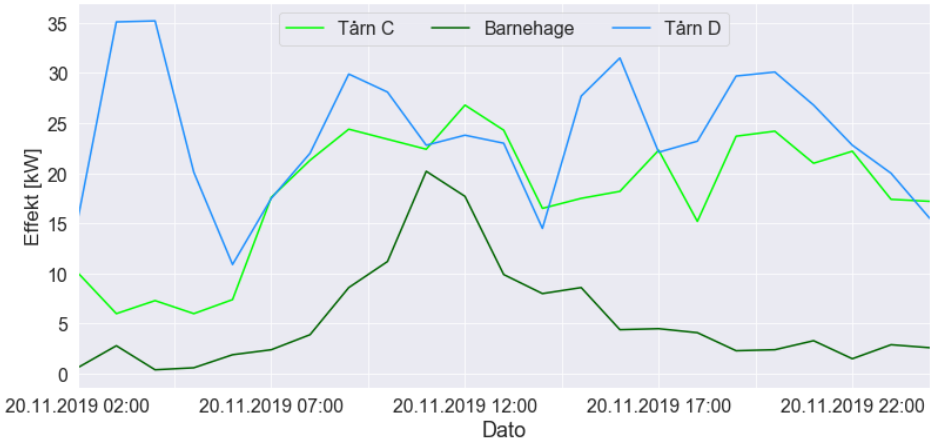
Inkluderes varme levert til forvarming av varmt tappevann til den eksisterende studentbyen vil avviket mellom det målte varmeleveransen til varmtvannsberedning og det prosjekterte varmebehovet være betraktelig høyere. Varme til forvarming av tappevann til den eksisterende studentbyen er ikke inkludert i det prosjekterte varmebehovet til varmtvannsberedning, og vil analyseres i kapittel 5.1.6.

Effektbehovet for oppvarming av varmt tappevann for boligtårnene og barnehagen for en typisk ukedag presentert i figur 5.5 og 5.6.



Figur 5.5: Målt effektbehov til oppvarming av varmt tappevann onsdag 20. november 2019 for boligtårn A, B og E

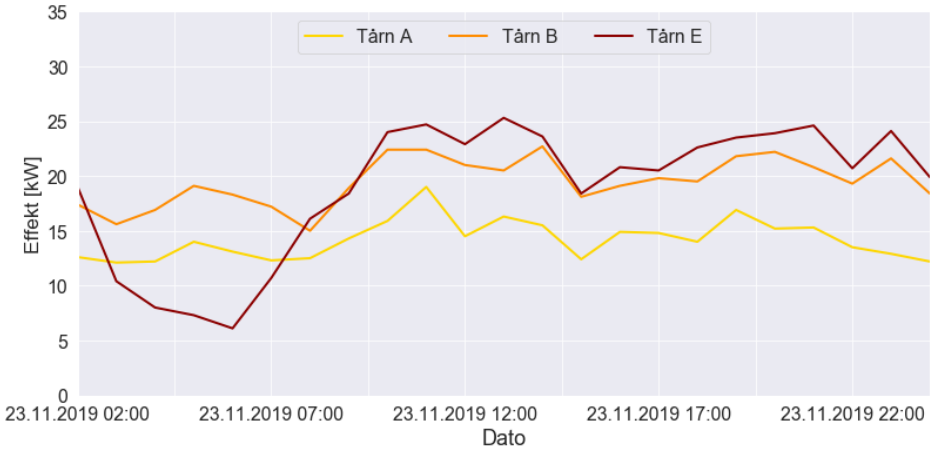
For boligtårn A, B og E øker effektbehovet om morgenen fra klokken 06-07.00. Effektbehovet er relativt jevnt gjennom dagen før det synker rundt klokken 01.00. De tre boligtårnene har noe ulike kurver, hvor tårn E har er vesentlig høyere effektbehov sammenlignet med de to andre boligtårnene. Tårn A har det laveste effektbehovet av de fem boligtårnene og en effektkurve som varierer i mindre grad. Effektkurven til boligtårn B har større variasjoner enn de to andre boligtårnene gjennom dagen, hvor en effekttopp like før klokken 18.00. Det er stor pågang på treningssenteret i denne perioden og er høyst sannsynlig årsaken til effekttoppen. Besøksstatistikk for treningssenteret for onsdag og lørdag er vist i Vedlegg M.



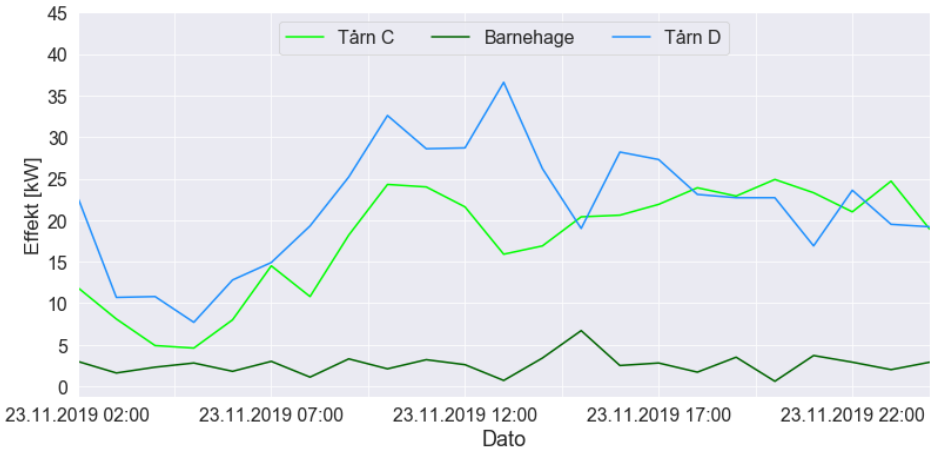
Figur 5.6: Målt effektbehov til oppvarming av varmt tappevann onsdag 20. november 2019 for boligtårn C, D og barnehagen

Effektkurven til boligtårn C varierer i større grad enn de andre boligtårnene, som har en jevnere kurve. Boligtårn C følger kurven til de andre boligtårnene med effekttopp om morgenen, noen effekttopper utover dagen, og lavere effekter om natten. Effektbehovet til barnehagen er relativt jevnt med noen effekttopper midt på dagen.

Effektbehovet for oppvarming av varmt tappevann for boligtårnene og barnehagen for en typisk dag i helgen er presentert i figur 5.8 og 5.7.



Figur 5.7: Målt effektbehov til oppvarming av varmt tappevann lørdag 23. november 2019 for boligtårn C, D og barnehagen



Figur 5.8: Målt effektbehov til oppvarming av varmt tappevann lørdag 23. november 2019 for boligtårn C, D og barnehagen

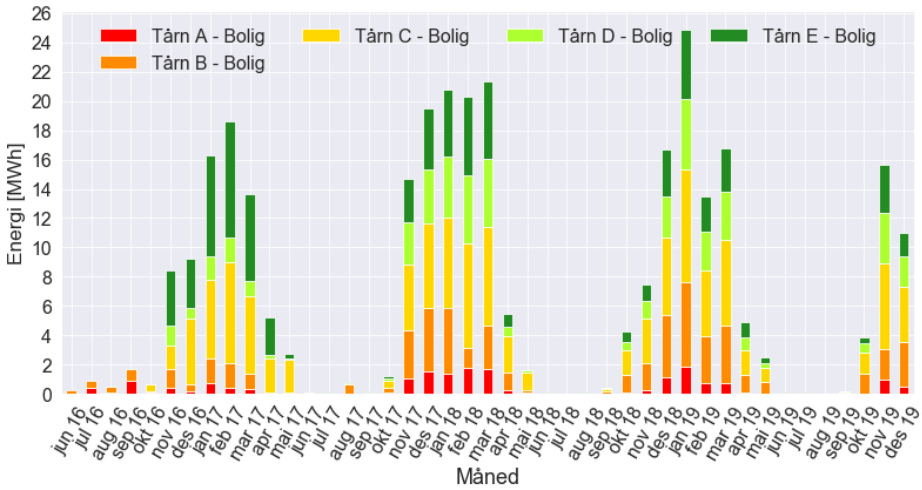
Effekttoppen for alle boligtårnene er større og inntreffer senere for alle boligtårnene lørdag 23. november 2019 sammenlignet med onsdag 20. november 2019. Effektbehovet synker noe utover dagen med noen effekttopper, før effektbehovet synker fra klokken 01.00. Barnehagens effektbehov er svært lavt, da den er stengt i helgene.

Forskjell i effektbehovet til de fem boligtårnene kan ha sammenheng med studentenes ulike brukervaner, samtidig som det i perioder kan være flere studenter i et boligtårn og færre i et annet. De ulike bedriftene som holder til i næringsarealene og deres varmtvannsbehov vil variere, og kan gi utslag på effektkurvene. Studentbyens vaskeri ligger i næringsarealene til boligtårn D, og vil gi boligtårnet et større effektbehov og andre effekttopper enn de andre tårnene. Effektkurven for boligtårn D vil variere etter når vaskemaskinene i vaskeriet er i drift, og er høyst sannsynlig årsaken til variasjonene i effektkurven til de andre tårnene både i antall effekttopper og tidspunktene for disse.

5.1.4 Varme til oppvarming av ventilasjonsluft

Varme til oppvarming av ventilasjonsluft utgjør den tredje største andelen av varmebehovet ved studentbyen, etter varme til varmt tappevann og forvarming av tappevann for HK21. Biblioteksbygningen åpnet 3. desember 2018 og og ventilasjonsanleggene ble igangkjørt i november 2018.

Månedlig fordeling av varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft for hybelarealene i de ulike boligtårnene fra 2016 til 2019 er vist i figur 5.9. Målt månedlig varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft for boligtårnene, barnehagen og biblioteksbygningen er presentert i Vedlegg H.2.

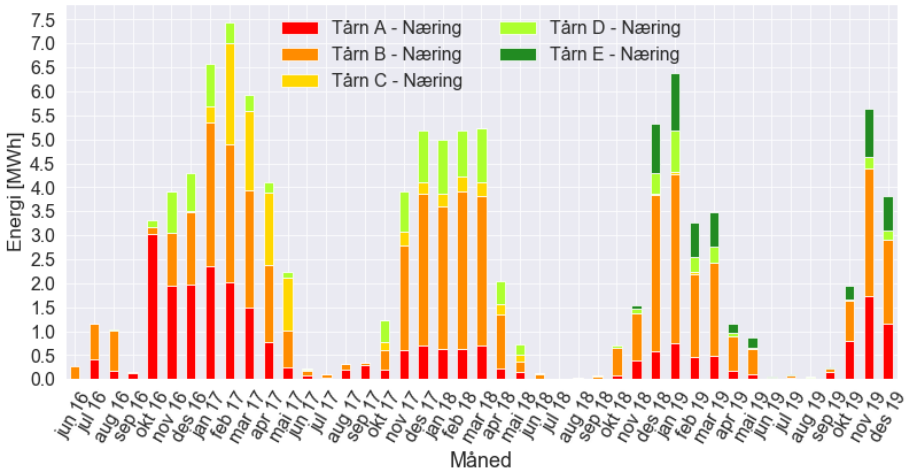


Figur 5.9: Målt varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft for boliger fra 2016 til 2019

Total varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft for 2017, 2018 og 2019 er gjennomsnittlig ca. 165 MWh/år. Varmeleveransen til oppvarming av ventilasjonsluft til hybelarealene varierer fra de ulike boligtårnene. Den høyeste månedlige varmeleveransen for oppvarming av ventilasjonsluft er fra november til mars og varierer fra ca. 8-25 MWh/mnd. Varmebehovet for oppvarming av ventilasjonsluft er svært lavt til ikke eksisterende i sommermånedene.

Boligtårn A har et vesentlig lavere varmebehov for oppvarming av ventilasjonsluft enn de andre boligtårnene, og skyldes trolig lavere tilførte luftmengder til hybelarealene sammenlignet med de andre boligtårnene. Luftmengder til de ulike boligtårnene er presentert i Vedlegg Q. Fra november 2016 til mai 2017 har boligtårn B og D et relativt lavt varmebehov sammenlignet med boligtårn C og E.

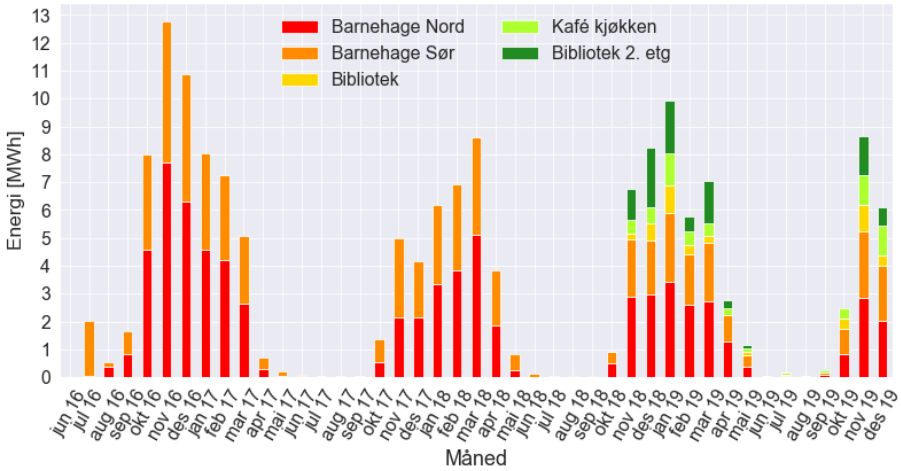
Månedlig fordeling av varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft for næringsarealene i de ulike boligtårnene fra 2016 til 2019 er vist i figur 5.10.



Figur 5.10: Målt varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft til næringsdelen i de fem tårnene fra 2016 til 2019

Varmeleveransen til oppvarming av ventilasjonsluft i næringsarealene varier fra de ulike boligtårnene. Treningssenteret i boligtårn B har det klart største behovet for oppvarming av ventilasjonsluft. Som vist i Vedlegg Q, har treningssenteret i boligtårn B høyere gjennomsnittlig tilført luftmengder til treningsarealene enn de andre næringsarealene.

Månedlig fordeling av varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft for barnehagen og biblioteksbygningen i de ulike boligtårnene fra 2016 til 2019 er vist i figur 5.11.



Figur 5.11: Målt varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft til barnehagen og biblioteksbygningen fra 2016 til 2019

Barnehagen har den største varmeleveransen for oppvarming av ventilasjonsluft vinteren 2016 til 2017. Fra 2017 til 2019 er varmeleveransen redusert, samtidig som åpningen av biblioteket i desember 2018 øker den totale varmeleveransen for oppvarming av ventilasjonsluft i forhold til året før.

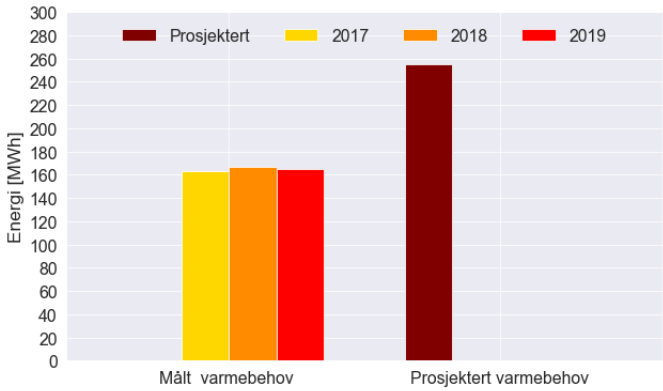
Gjennomsnittlig spesifikk varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft for 2017 til 2019 til hybelarealene og næringsarealene i boligtårnene er henholdsvis ca. 0,5 kWh/m^2 og 13 kWh/m^2. For barnehagen og biblioteket er den gjennomsnittlige varmeleveransen henholdsvis ca. 1,3 kWh/m^2 og 29 kWh/m^2. Målt spesifikk varmeleveranse til de ulike arealene per år er presentert i Vedlegg H.2. Forskjell i spesifikk varmeleveranse til de næringsarealene, barnehagen og biblioteksbygningen er høyst sannsynlig forårsaket av ulik bruk av de forskjellige arealene.

Varmeleveransen for oppvarming av ventilasjonsluft vil variere med utetemperaturen. Dette kan være en påvirkende faktor for variasjonene i varmeleveransen, samtidig som studentene og de ansattes ulike brukervaner vil være en faktor til variasjonene i varmeleveransen til oppvarming av ventilasjonsluft.

Hybelarealene i boligtårnene er nærmest identiske og er prosjektert med samme varmeleveranse for oppvarming av ventilasjonsluft. Som figur 5.9 viser, er det store forskjeller på varmebehovet for de ulike boligtårnene. Luftmengdene levert til de ulike bygningene, presentert i vedlegg Q, viste at det er store variasjoner i luftmengdene levert til hybelarealene i boligtårnene. Boligtårn A har en gjennomsnittlig levert luftmengde på 6500 m^3/h, som er noe over den prosjekterte luftmengden på 6000 m^3/h. Dette er vesentlig lavere enn boligtårn B, C, D og E som både har høyere varmeleveranse og en høyere gjennomsnittlig luftmengde på 9000 m^3/h. Det vil ikke i denne oppgaven bli undersøkt videre hva som kan

være årsaken til de store variasjonene i luftmengdene (CAV).

Sammenligning mellom målt og prosjektert varmebehov for oppvarming av ventilasjonsluft for boligtårnene, barnehagen og biblioteket er presentert i figur 5.12.



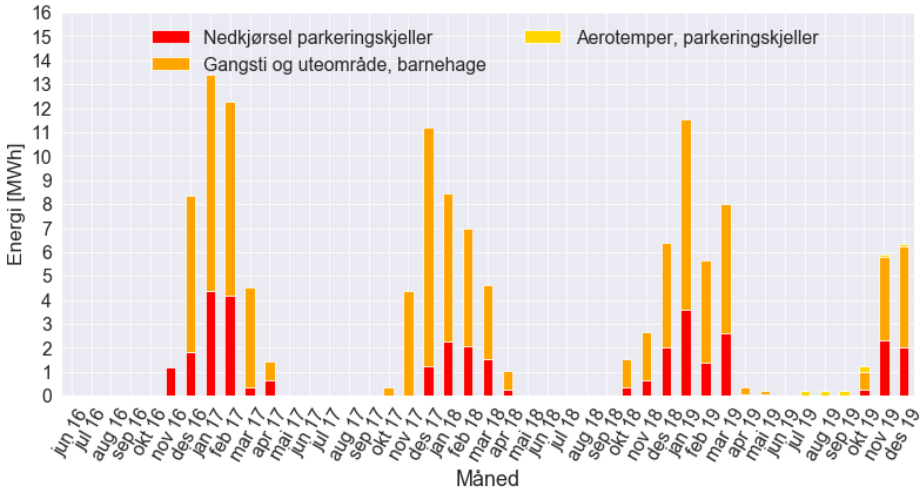
Figur 5.12: Prosjektert varmebehov for oppvarming av ventilasjonsluft sammenlignet med det målte varmebehovet

Det målte varmebehovet for oppvarming av ventilasjonsluft varierer svært lite fra 2017 til 2019. Den målte varmeleveransen for 2017, 2018 og 2019 er gjennomsnittlig **ca. 35 %** lavere enn det prosjekterte varmebehovet. Den reduserte varmeleveransen skyldes ikke lavere luftmengder enn prosjekterte verdier og vil ikke bli videre analysert i denne oppgaven.

5.1.5 Varme til aerotemperen og snøsmelting

Varme til aerotemperen i parkeringskjelleren og varme til snøsmelting utgjør det minste varmebehovet ved Moholt 50|50. Det er et snøsmelting ved nedkjøringen til parkeringskjelleren som er koblet til undersentralen i boligtårn A og snøsmelting som er koblet til undersentralen til barnehagen. Varme til snøsmelting ved barnehagen leverer varme til to soner, trappen og gangstien opp til barnehagen og ved inngangspartiet ned til grinden. Målinger for varmeleveransen til aerotemperen i parkeringskjelleren startet i begynnelsen av juli 2019.

Månedlig fordeling av varmebehovet til aerotemperen og snøsmelteanleggene fra 2016 til 2019. er presentert i figur 5.13. Målt månedlig varmeleveransen til snøsmelteanlegget er presentert i Vedlegg H.3.

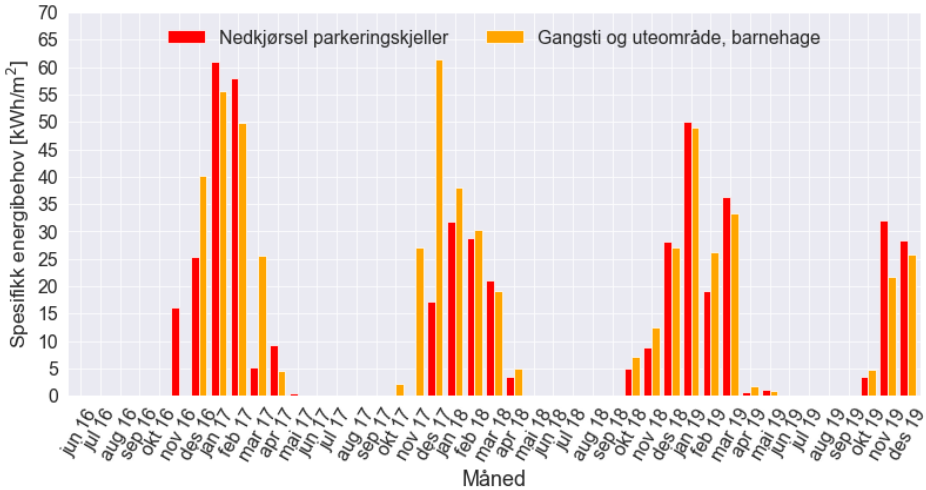


Figur 5.13: Målt varmeleveranse til snøsmelteanleggene og aerotemperen fra 2016 til 2019

Barnehagens snøsmelteanlegg utgjør omtrent to tredjedeler av varmeleveransen, mens snøsmeltingen i nedkjøringen til parkeringskjelleren utgjør den resterende tredjedelen. Gjennomsnittlig total varmeleveranse for 2017, 2018 og 2019 er ca. 40 kWh/år.

Varmeleveransen til aerotemperen i parkeringskjelleren er totalt 1100 kWh siden i juli 2019. Dette er svært lite sammenlignet med varmebehovet i snøsmelteanleggene. Det lave varmebehovet skyldes den lave settpukttemperaturen på 5 °C i parkeringskjelleren. For å kunne ha en lav settpunkttemperatur og et lavt effektbehov i parkeringskjelleren, er det installert varmekabler rundt sprinkleranlegget for å forhindre at rørene fryser.

Den spesifikke varmeleveransen til snøsmelteanleggene er presentert i figur 5.14.

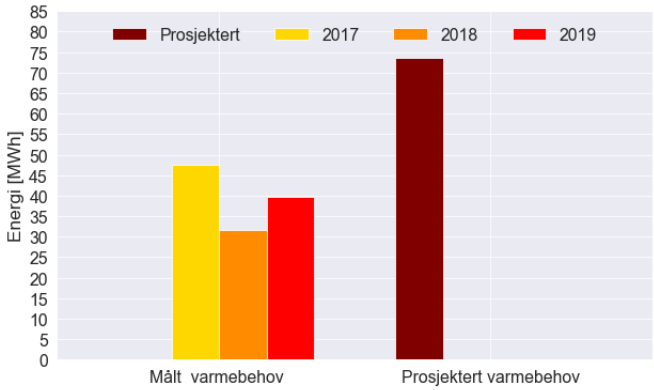


Figur 5.14: Målt spesifikk varmeleveranse til snøsmelteanleggene fra 2016 til 2019

Spesifikk varmeleveranse til snøsmelteanlegget utenfor barnehagen og nedkjørselen til parkeringskjelleren varierer opp til omtrent 60 kWh/m^2. Det årlige termiske energiforbruket for nedkjøringen til parkeringskjelleren og barnehagen er i gjennomsnitt **ca. 150 kWh/(m^2 år)** per snøsmelteanlegg. Målinger av spesifikk varmeleveranse er presentert i Vedlegg H.

I Trondheimsområdet kan det regnes med et årlig energiforbruk på ca. 100-160 kWh/(m^2 år) i godt regulerte anlegg. Ved mindre god regulering kan årlig energibehov til snøsmelting komme opp mot 300-400 kWh/(m^2 år) (Entro Energi AS, 2000). Dette viser at snøsmeltingen ved Moholt 50|50 er godt regulert.

Sammenligning mellom den målte varmeleveransen og prosjekterte varmebehovet til snøsmelteanlegget og aerotemperen er presentert i figur 5.15.



Figur 5.15: Prosjektert varmebehov for snøsmelteanleggene og aerotemperen sammenlignet med det målte varmebehovet

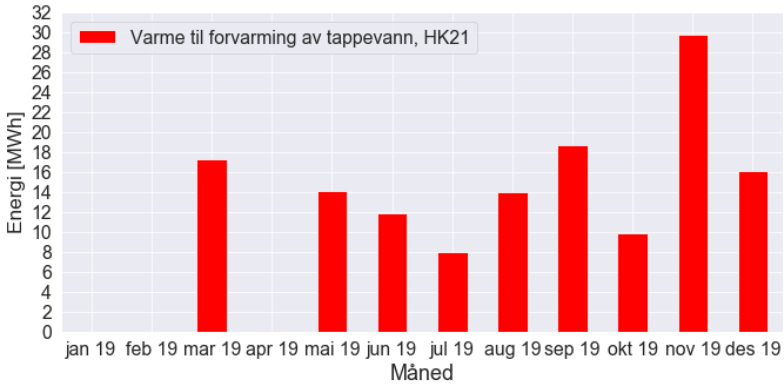
Den målte varmeleveransen for snøsmelting og aerotemperen er vesentlig lavere enn det prosjekterte varmebehovet. Avviket mellom det prosjekterte varmebehovet og den målte varmeleveransen for 2017, 2018 og 2019 er ca. -46 %.

Snøsmelting ved barnehagen driftes mellom utetemperaturene mellom -6 °C og 3 °C, mens snøsmelting i nedkjøringen til parkeringskjelleren har temperaturgrensene -7 °C og 5 °C. Lengre perioder med temperaturer mellom temperaturgrensene vil føre til et økt varmebehov for snøsmelteanleggene. Varme perioder og perioder med temperaturer under -6 °C og -7 °C vil føre til et lavere varmebehov.

5.1.6 Forvarming av varmt tappevann til eksisterende studentboliger, HK21

Varme til forvarming av varmt tappevann til deler av den eksisterende studentbyen i Herman Krags gate 21 (HK21) utgjør den nest største andelen av varmebehovet til Moholt 50|50. Forvarming av tappevann til HK21 startet i mars 2019. Tabell 28 viser det målte forbruket av varme til forvarming av varmt tappevann i 2019.

Målt månedlig fordeling av varmeleveransen til forvarming av varmt tappevann ved HK21 i 2019 er presentert i figur 5.16. Målt varmeleveranse til forvarming av varmt tappevann er presentert i tabell i Vedlegg H.4.

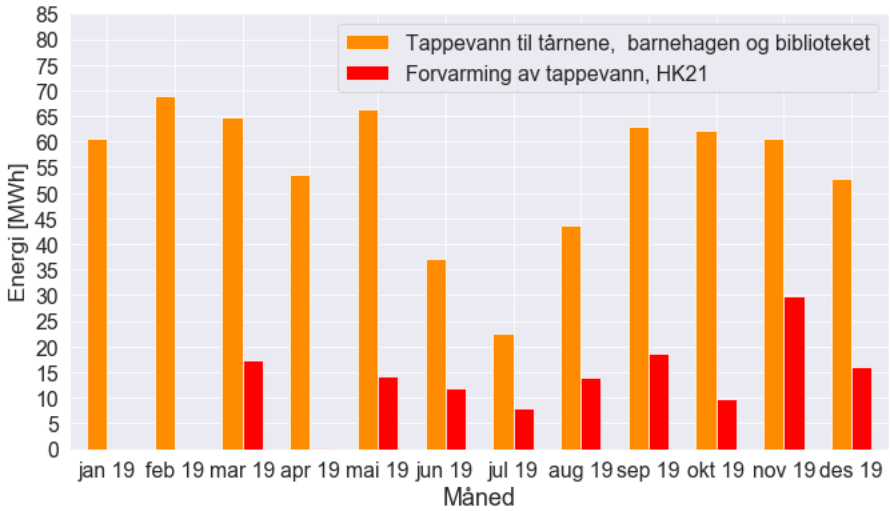


Figur 5.16: Målt varmeleveranse til forvarming av varmt tappevann til HK21

Total varmeleveranse til forvarming av varmt tappevann til HK21 er ca. 125 MWh/år for 2019. Varme til forvarming av varmt tappevann til HK21 ble stoppet i april 2019 grunnet kompressorhavari på det ene varmepumpeaggregatet. Dette førte til at varmepumpeanlegget hadde lavere effektkapasitet, og boligtårnene, barnehagen og biblioteksbygningen ble prioritert. IT-systemene for Sit Bolig ble oppgradert i omtrent en måned fra 16. oktober 2019. Oppgraderingen førte til stans i kommunikasjonen mellom energimålerene ved HK21 og SD-anlegget, og varmen som ble levert til HK21 er ikke registrert i den grafiske fremstillingen. Det antas at varmeleveransen for oktober og november derfor er høyere enn i figur 5.16.

Det er stipulert med en termisk energileveranse til HK21 på 230 000 kWh/år. Ved å forvarme det varme tappevannet med varme fra varmesentralen i stedet for bruk av elkolber forventer Studentskipnadens en reduksjon av el. forbruk på ca. 150.000 kWh/år.

Sammenligning av varmt målt varme til forvarming av tappevann til boligtårnene, barnehagen og biblioteksbygningen og forvarming av tappevann til HK21 er presentert i figur 5.17.



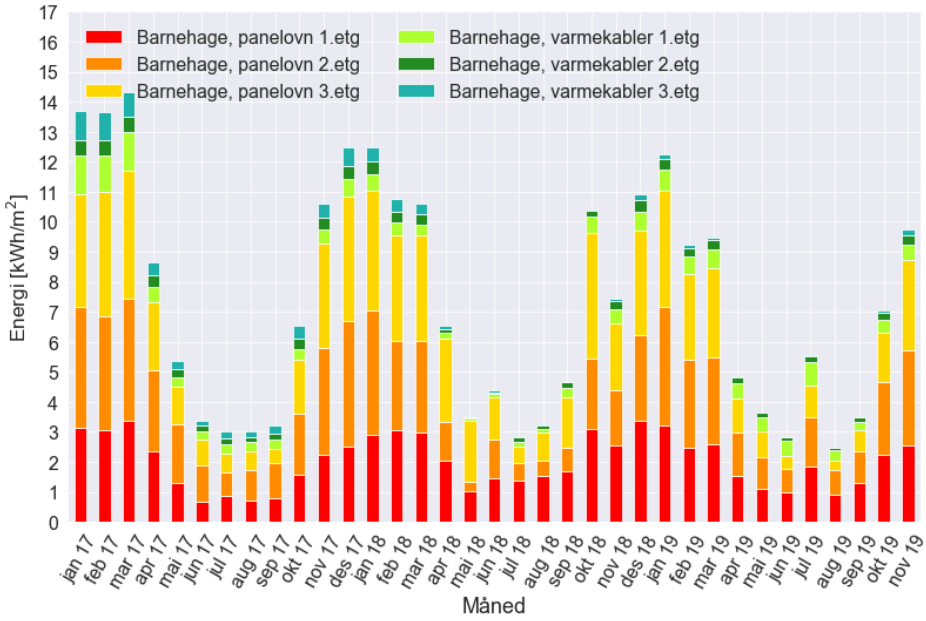
Figur 5.17: Sammenligning av målt varmeleveranse til forvarming av varmt tappevann for Moholt 50|50

Mellom en tredjedel og en fjerdedel av total varmeleveranse til varmtvannsberedning går til forvarming av tappevann ved HK21. Dette vil føre til en økt total varmeleveranse for 2019 sammenlignet med de foregående årene. Ved bruk av den stipulerte varmeleveransen til HK21, vil den totale varmeleveransen til studentbyen øke med omtrent 35 %.

5.1.7 Forbruk av elektrisitet til romoppvarming

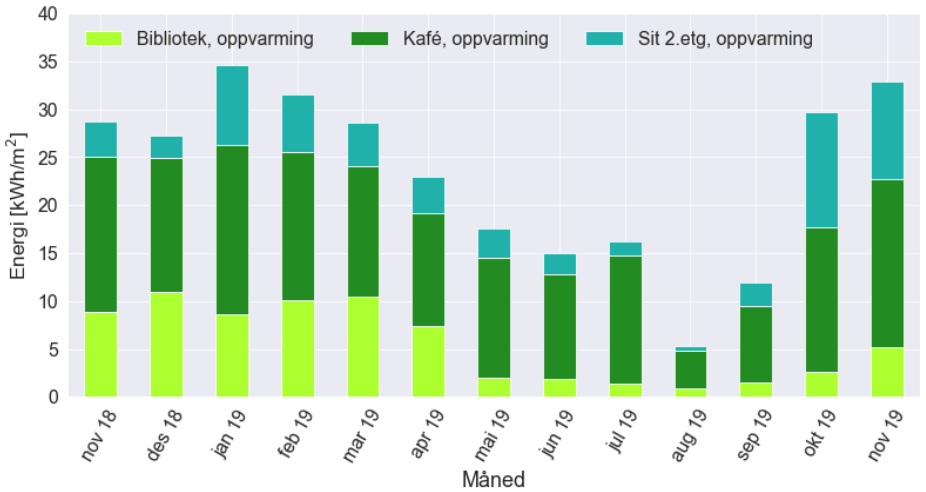
Det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 er dimensjonert for å levere varme til varmtvannsberedning, varme til oppvarming av ventilasjonsluft og varme til snøsmelting. Elektriske panelovner er montert i studentboligene, barnehagen og i biblioteket for romoppvarming. I barnehagen er det i tillegg installert elektriske varmekabler. Det prosjekterte energibehovet til romoppvarming var lavt, noe som førte til den valgte løsningen med elektrisk romoppvarming.

Både barnehagen og biblioteksbygningen har energimålere som måler el. forbruket til panelovnene og varmekablene. Målt el. forbruk til romoppvarming i barnehagen og blioteksbygningen er presentert i figur 5.18 og 5.19. El. forbruket til romoppvarmingen i barnehagen og biblioteksbygninger er ikke normalårskorrigert i denne analysen.



Figur 5.18: Målt el.forbruk til panelovner og varmekabler ved Moholt barnehage

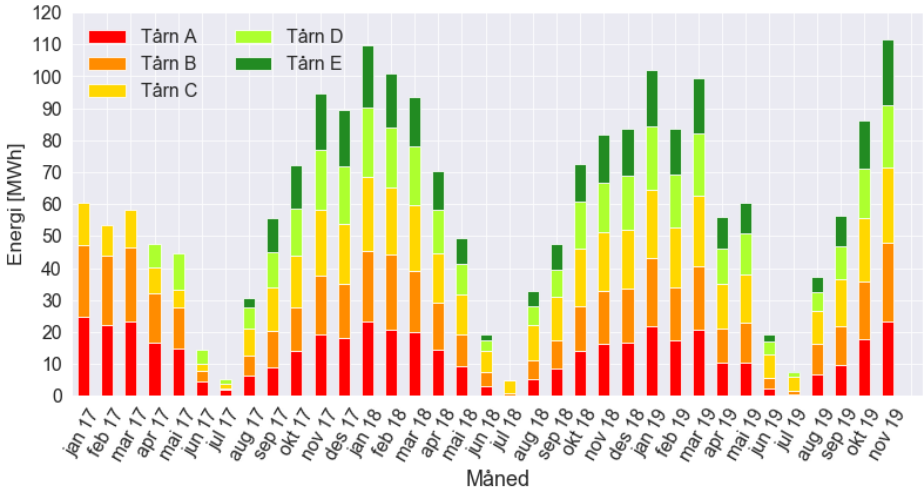
Panelovnene har det høyeste el. forbruket. Energiforbruket til varmekablene er relativt lite sammenlignet med panelovnene.



Figur 5.19: Målt el. forbruk til romoppvarming for biblioteksbygget ved Moholt 50|50

I biblioteksbygningen varierer el. forbruket til romoppvarming med årstiden, med lavest forbruk om sommeren og høyest om vinteren.

Det er ikke installert energimålere i boligtårnene som spesifikt måler energiforbruket til romoppvarming. Hver etasje i boligblokkene har en energimåler som måler totalt el. forbruk til belysning, teknisk utstyr og romoppvarming. Energiforbruket til belysning og teknisk utstyr i boligtårnene er beregnet i Vedlegg O. Beregnet el. forbruk til belysning og teknisk utstyr er trukket fra målt el. forbruk i boligtårnene, og gir et estimert el. forbruk til oppvarming i boligtårnene, illustrert i figur 5.20.



Figur 5.20: Beregnet el. forbruk til oppvarming i Tårn A-E ved Moholt 50|50

Boligtårn D fikk negative verdier i januar, februar og mars 2017, da beregnet el. forbruk til belysning og teknisk utstyr ble trukket fra de målte verdiene. Det samme gjelder for boligtårn E for månedene januar til juli 2017 og juli 2018, samt juli 2018 for boligtårn A. I den grafiske fremstillingen er disse månedene satt til å ha null forbruk av elektrisitet til romoppvarming.

Det totale el. forbruket ligger på mellom ca. **36 og 48 kWh/m^2** per år per tårn i 2018 og 2019. Som for barnehagen og biblioteksbygningen varierer el. forbruket til romoppvarmingen med årstiden og utetemperaturen. Boligtårnene har et relativt likt el. forbruk til romoppvarming.

Små forskjeller i de ulike boligtårnene kan komme av ulike brukervaner. Samtidig er det usikkert hvor mange studenter som faktisk bor i hyblene de leier til enhver tid. Særlig i feriene er det svært mange som ikke er til stede, noe som gir et lavere oppvarmingsbehov i disse periodene.

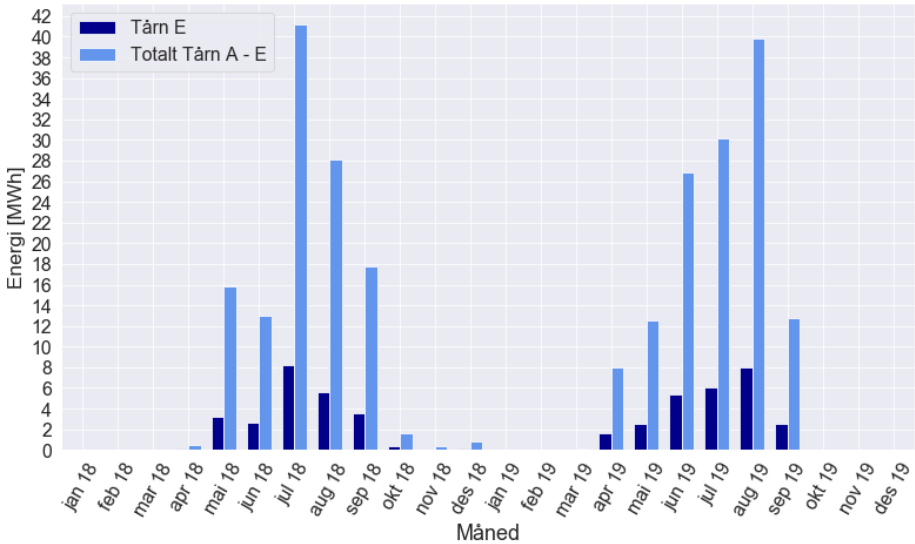
5.1.8 Kjøleleveranse

Den målte kjøleleveransen for ventilasjonsluft til boligtårnene og varmeleveranse til dstribusjonsnettet til brønnparken er basert på målinger gjort i boligtårn E. Det antas at kjøleleveransen er tilnærmet lik for alle 5 tårnene. Den totale kjøleleveransen fås ved å multiplisere kjøleleveransen til tårn E med totalt antall boligtårn. Det er ikke installert energimålere for de andre boligtårnene, barnehagen eller biblioteksbygningen og kjøleleveranse for disse byggene er ikke målt.

Beskrielse	Målt kjøleleveranse [kWh]	
	2018	2019
Kjøling ventilasjonsluft Tårn E	23 839	26 019
Total kjøleleveranse	**119 195**	**130 095**

Tabell 5.4: Målt kjøleleveranse for tårn E og total kjøleleveranse for boligtårnene

Figur 5.21 viser den månedlige kjøleleveransen til boligtårn E og den samlede leveransen for de fem boligtårnene.



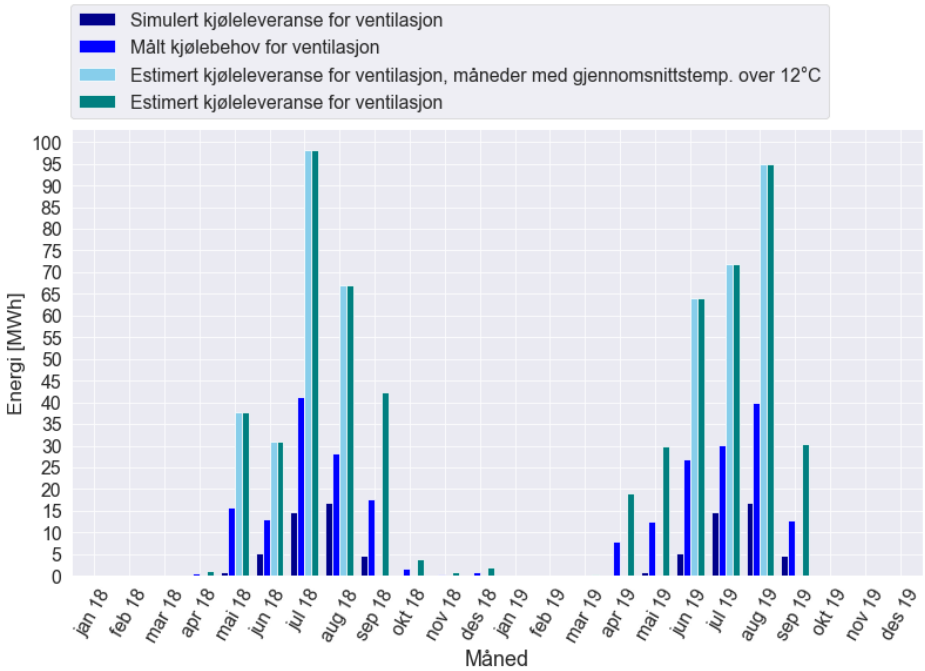
Figur 5.21: Målt månedlig oversikt over kjøleleveranse fra boligdelen i tårnene ved Moholt 50|50

Det gjenvinnes varme fra alle ventilasjonsaggregatene i både næringsarealene og hybelarealene til boligtårnene, samt barnehagen og biblioteket. Den totale kjøleleveransen vil høyst sannsynlig være høyere enn de målte verdiene for boligtårn E ganget med fem.

De totalt 15 ventilasjonsaggregatene ved Moholt 50|50 er dimensjonert med luftmengdene 6 000 m^3/h per boligtårn, 2300 m^3/h per næringsareal og 15 000 m^3/h for barnehagen og biblioteket. Dette gir en totalt luftmengde på 71 500 m^3/h. Ved å basere seg på de prosjekterte luftmengdene i Tårn E og den målte kjøleleveransen til boligarealene i boligtårn E, er det i tabell 31 estimert hva den totale kjøleleveransen for studentbyen er.

Ventilasjonsaggregatene som er installert ved studentbyen kan ikke levere kjøling til ventilasjonsluften når utetemperaturen synker under 12 °C. Kjøleleveransen er estimert både med og uten temperaturgrensen på 12 °C, henholdsvis Estimert, 12 °C"og Estimert". I estimatet som tar hensyn til temperaturgrensen til ventilasjonsaggregatet er kjøleleveransen satt til null i de månedene gjennomsnittstemperaturen er under 12 °C. Den simulerte kjøleleveransen kommer fra simuleringer gjort i SIMIEN (Torp, 2016) .

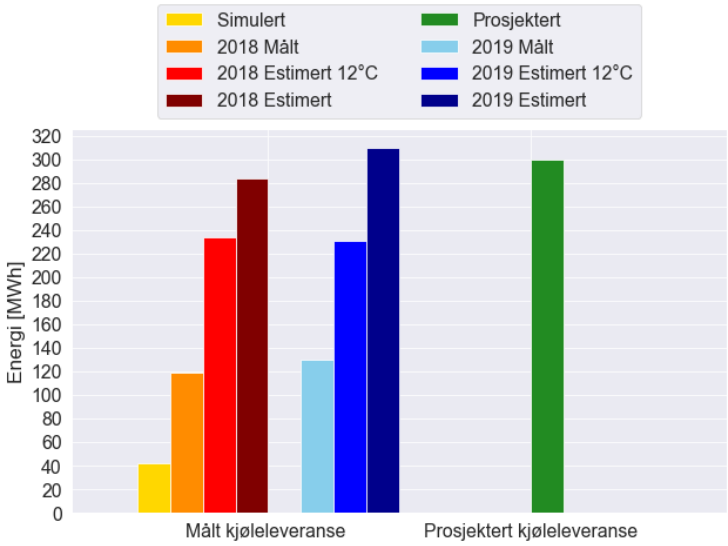
Figur 5.22 viser de målte, simulerte og estimerte kjøleleveransene for ventilasjon.



Figur 5.22: Estimert, simulert og målt varmegjenvinning fra ventilasjonsluft til brønnparken ved studentbyen Moholt 50|50

Den estimerte kjøleleveransen er mellom 1,96 og 2,38 ganger større enn den målte kjøleleveransen. Målt kjøleleveranse inkluderer bare boligtårnene, mens den estimerte inkluderer næringsarealene, barnehagen og biblioteksbygningen.

Sammenligning av den målte, simulerte og estimerte varmegjenvinningen fra ventilasjonsluft og den prosjekterte varmegjenvinningen fra ventilasjonsluft er presentert i figur 5.23.



Figur 5.23: Prosjektert kjøleleveranse fra varmegjenvinningen fra ventilasjonsluft til brønnpark sammenlignet med målt, simulert og estimert kjøleleveranse

Avviket mellom den prosjekterte kjøleleveransen og de simulerte, målte, estimerte kjøleleveransene (med og uten temperaturgrense) kjøleleveransene for 2018 er henholdsvis -86 %, -60 %, -22 %, +5 % . For 2019 er avviket fra målt og estimert (med og uten temperaturgrense) kjøleleveranse henholdsvis -57 %, -23 %, +3 %. Estimert kjøleleveranse uten temperaturgrensen på 12 °C er nærmest den prosjekterte kjøleleveransen med kun +5 % og +3 % avvik for 2018 og 2019.

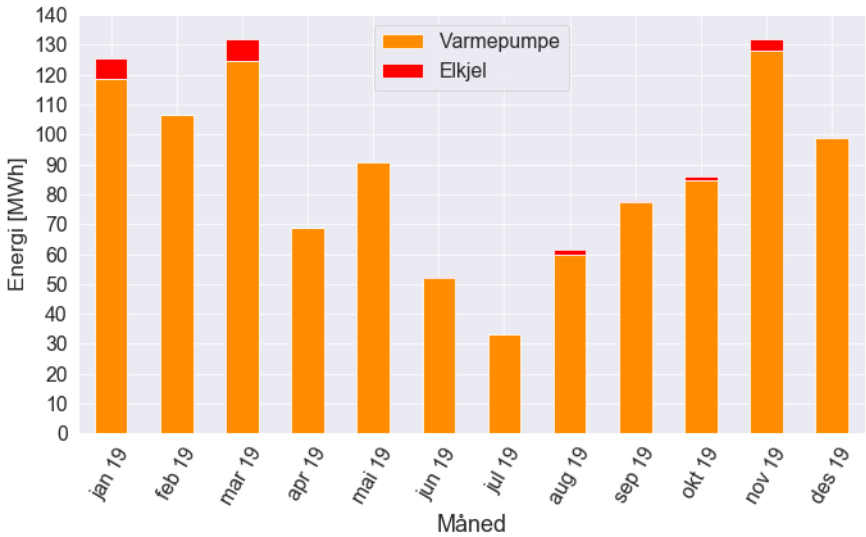
Kjøleleveransen er ikke korrigert ved bruk av ”cooling degree days”, som er forskjellen mellom en kjølegrense og faktisk temperatur. I Norge og i land med lignende klima er ikke en slik korrigering inkludert i modeller som korrigerer energibruken. En grunn til dette er at en slik kjøleffekt er funnet til å være lav (Pöyry Management Consulting AS, 2014).

5.2 Analyse av varmesentral

I dette kapittelet er det gjennomført en analyse av varmesentralen og varmepumpeanlegget ved det termiske energisystemet ved Moholt 50|50. Videre er varmepumpeaggregatenes energidekningsgrad, SCOP og driftsforhold analysert.

5.2.1 Varmeleveranse fra varmesentralen

Den månedlige varmeleveransen fra varmesentralen til boligtårnene, barnehagen, biblioteksbygningen og HK21 i 2019 er presentert i figur 5.24. Grunnet omstart av varmesentralens energisammendrag 1. januar 2019, har det ikke vært mulig å hente ut verdier fra tidligere år. Målt månedlig varmeleveranse fra varmesentralen er presentert i Vedlegg H.5.



Figur 5.24: Målt varmeleveranse fra varmesentralen for Moholt 50|50 i 2019

Total varmeleveranse for 2019 for varmepumpeanlegget og elektrokjelen er henholdsvis ca. 1050 MWh/år og 22 MWh/år. I perioder med en varmeleveranse over 120 MWh per måned, som i januar, februar og november 2019, produserer elektrokjelen varme til varmedistribusjonsnettet. Det termiske energisystemet hadde redusert kapasitet fra juni til oktober 2019, grunnet kompressorhavari og bytte av begge kompressorene på alle tre varmepumpeaggregatene. Den reduserte kapasiteten har høyst sannsynlig ført til at elkjelen produserte varme i denne perioden. Elektrokjelen er dimensjonert for å ta spisslasten i det termiske energisystemet eller fungere som reserveløsning ved driftsproblemer.

5.2.2 Energidekningsgrad for varmepumpeanlegget

Energidekningsgrad for varmepumpeanlegget er beregnet basert på verdier fra varmeleveranse til byggene fra varmepumpeaggregatene. Beregnet energidekningsgrad for varmepumpeanlegget er presentert i tabell 5.5. Månedlig beregnet energidekningsgrad for varmepumpeanlegget er presentert i Vedlegg J.

Beskrivelse	Energi [kWh]
Total varmeleveranse	1 073 753
Total varmeleveranse fra varmepumpeaggregater	1 052 190
Total varmeleveranse fra elektrokjel	21 564
Total energidekningsgrad	**98 %**

Tabell 5.5: Målt energidekningsgrad for varmepumpeanlegget i 2019

Varmepumpeanlegget leverer **ca. 98 %** av all varme fra varmesentralen i 2019. Dette er en høy energidekningsgrad og viser at varmepumpeanlegget fungerer som prosjektert hvor elektrokjelen kun brukes som spisslast eller som reserveløsning (back-up). Energidekningsgraden kan antas å øke ved fremtidig drift, da to kompressorer havarerte samt kompressorbytte av alle kompressorene i varmepumpeanlegget, og som førte til lavere kapasitet i varmepumpeanlegget.

Energidekningsgraden er kalkulert ved bruk av varmeleveranse fra varmesentralen og inkluderer ikke tap i rørnettet. Det gjennomsnittlige tapet i rørnettet er omtrent 4 %. Tap i rørnettet fra varmesentralen til boligtårnene er presentert i Vedlegg J. Videre analyse av årsak til variasjonene i varmetapene i rørnettet vil ikke inngå i denne analysen.

Forskjell i total varmeleveranse fra varmesentralen målt i varmesentralens, varmeopptaks- og varmedistribusjonsnettets SD-anlegg og total varmeleveranse målt i byggene og undersentralenes SD-anlegg viser en forskjell på omtrent 80 MWh i 2019. Dette utgjør et tap av varme på ca. 8 % fra varmesentralen til byggene. En andel av dette vil høyst sannsynlig være varmetap i distribusjonsnettet, men dette vil ikke analyseres videre i denne oppgaven.

5.2.3 SCOP og energisparing

Effektiviteten til varmepumpeaggregatene er beregnet ved bruk av SCOP[1], som beskriver forholdet mellom levert varmemengde og tilført elektrisk energi til aggregatene. Beregningene av gjennomsnittlig COP (SCOP) over et år er presentert i tabell 5.6 og baserer seg på definisjoner i SEPEMO-prosjektet (Zottl et al., 2011).

[1] Gjennomsnittlig vektet effektfaktor

SCOP	1	2
Varme	$SCOP_{1,Varme} = \frac{Q_{Varme}}{E_{VP}}$	$SCOP_{2,Varme} = \frac{Q_{Varme}}{E_{VP}+E_{Pumpe}}$
Varme- og kjøleleverane	$SCOP_1 = \frac{Q_{Varme}+Q_{Kjøling}}{E_{VP}}$	$SCOP_2 = \frac{Q_{Varme}+Q_{Kjøling}}{E_{VP}+E_{Pumpe}}$

Tabell 5.6: Definisjoner av ulike SCOP-verdier (Zottl et al., 2011)

Hvor:
Q_{Varme} = Varmeleveranse fra varmepumpen [kWh]
$Q_{Kjøling}$ = Frikjøling fra brønnparken = varmegjenvinning fra ventilasjonsluft [kWh]
E_{Pumpe} = Elektrisitet tilført brønnpumpen [kWh]
E_{VP}) = Elektrisitet tilført varmepumpeaggregatene [kWh]

Beregnede SCOP-verdier for de tre varmepumpeaggregatene for november 2018 til oktober 2019 er presentert i tabell 5.7. Vedlegg N forklarer hvordan beregningene er utført. Den elektriske effekten som er brukt i beregningene er tilført elektrisitet til kompressorer samt sirkulasjonspumpe P3, P5, P7 og P8.

SCOP	SCOP 1	SCOP 2
Varme	3,2	2,8
Varme- og kjøleleveranse	3,8	3,4

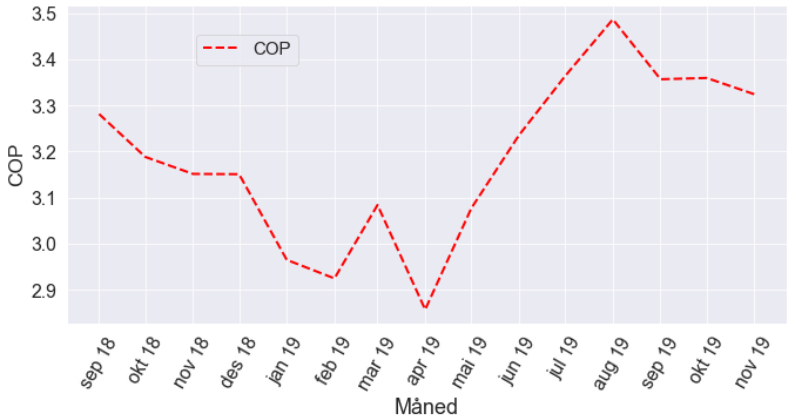
Tabell 5.7: Målt gjennomsnittlig SCOP for november 2018 til oktober 2019 for varmepumpeaggregatene/ kjølemaskinene

For varmepumpeanlegget ved Moholt 50|50 vil en gjennomsnittlig COP (SCOP) på 2,8 tilsvare **ca. 65 % energisparing** i forhold til elektrisk oppvarming. Inkluderes kjøleleveransen vil den beregnede SCOP-verdien være 3,4 som tilsvarer **ca. 71 % energisparing**. Varmepumpeanlegg har gjerne en gjennomsnittlig COP (SCOP) mellom 2 og 5. Varmepumpesystemer med avtagende temperaturforskjell mellom varmekilde og levert vanntemperatur til sluttforbruker vil oppnå høyere SCOP og dermed høyere energisparing (Amble et al., 2018).

Det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 henter varme fra fjell som defineres som en varmekilde med relativt høyt temperaturnivå og leverer varme til boligtårnene, barnehagen og biblioteket på et moderat temperaturnivå (ca. 45-50 °C). Dette er kriterier som tilsier at forventet SCOP-verdi burde vært høyere enn 3,2 for varmepumpeanlegget ved varmeleveranse. Den relativt lave SCOP-verdien kan skyldes at to kompressorer havarerte og alle seks kompressorene ble byttet i løpet av måleperioden for den beregnede SCOP-verdien.

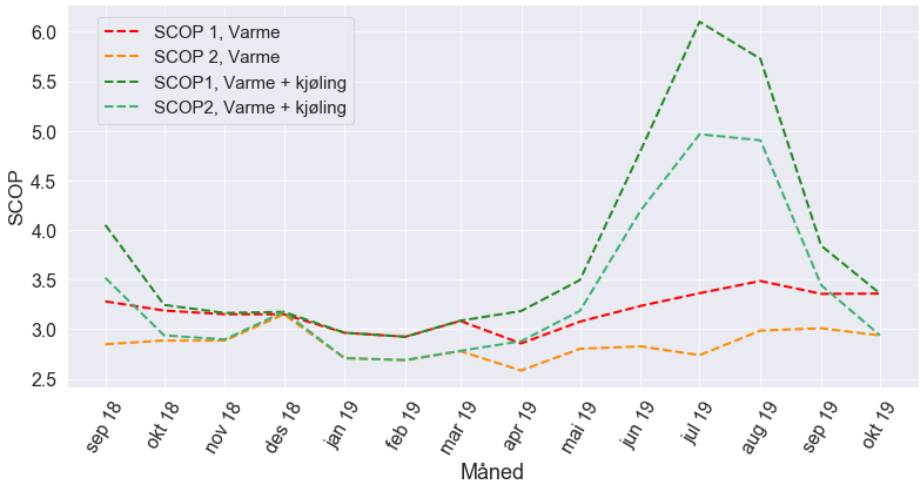
Beregnede SCOP-verdier per måned er presentert i figur 5.25 og 5.26. I månedene april - september 2019 havarerte kompressorene i varmepumpeaggregat VP2 og VP3, mens kompressorene til VP1 ble byttet i denne perioden. Ettersom minst ett av varmepumpeag-

gregatene var i drift i denne perioden, er det valgt å ta med disse verdiene i beregningen av SCOP og analysen.



Figur 5.25: Beregnet SCOP-verdi for varmepumpeaggregatene ved Moholt 50|50

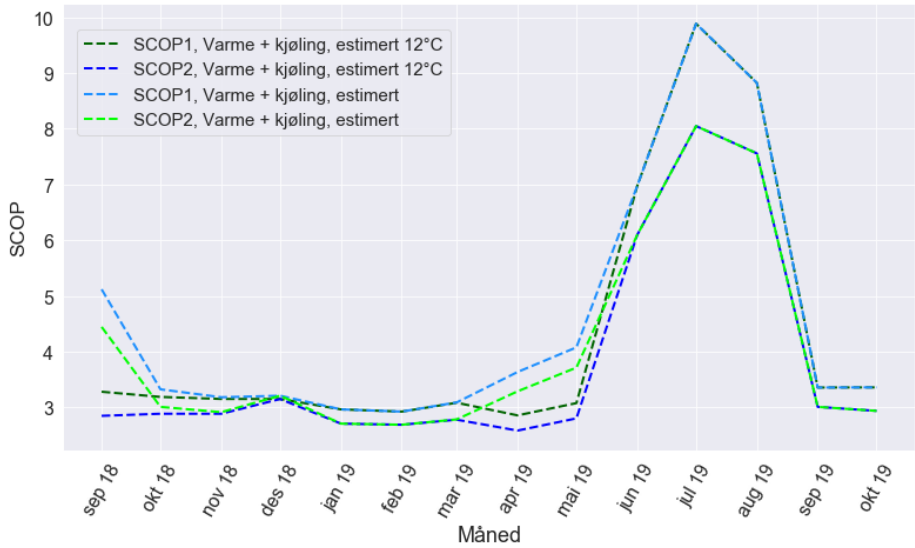
COP-verdien for varmepumpeaggregatene varierer fra ca. 2,9 til ca. 3,5. Den lave COP-verdien i april 2019 er sannsynligvis på grunn av kompressorhavariet.



Figur 5.26: Beregnede SCOP-verdier for varmepumpeaggregatene ved Moholt 50|50.

SCOP-verdiene har små variasjoner i høst og vintermånedene, hvor den varierer mellom 2,6 og 3,2.

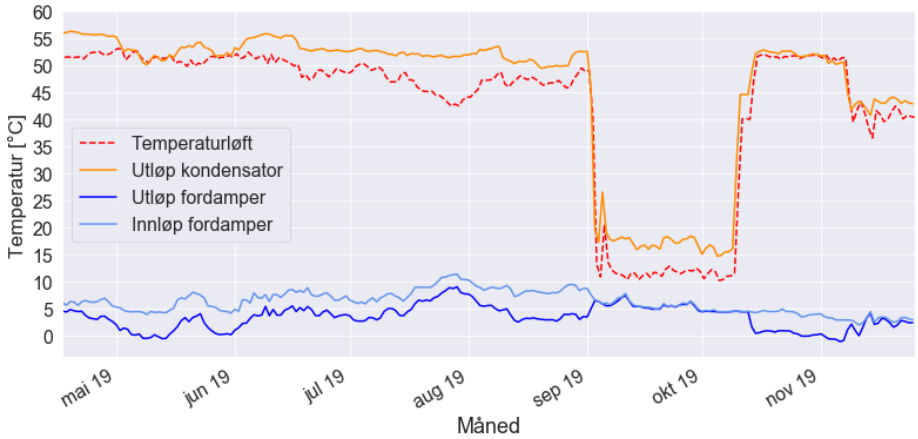
Varmegjenvinning fra ventilasjonsluft i figur 5.6 er basert på de målte verdiene fra boligtårn E multiplisert med antall tårn. Dette er det mest konservative anslaget for kjøleleveranse til bygningene ved Moholt 50|50. Ved å bruke de estimerte verdiene for kjøleleveranse presentert i kapittel 5.1.8 og figur 5.22, vil en høyere SCOP for varme- og kjøleleveranse oppnås, som vist i figur 5.27. Det ene estimatet baserer seg på luftmengder og målte verdier fra tårn E, mens det andre kun har kjøleleveranse når det månedlige gjennomsnittstemperaturer er over 12 °C.



Figur 5.27: Beregnede SCOP-verdier for varmepumpeaggregatene ved Moholt 50|50 med estimerte verdier for varmegjenvinning fra ventilasjonsluft.

Ved bruk av de estimerte kjøleleveransene til studentbyen er den månedlige SCOP-verdien høyere i sommermånedene. SCOP-verdien er tilnærmet som i figur 5.26 i de resterende månedene når varmepumpene hovedsakelig leverer varme.

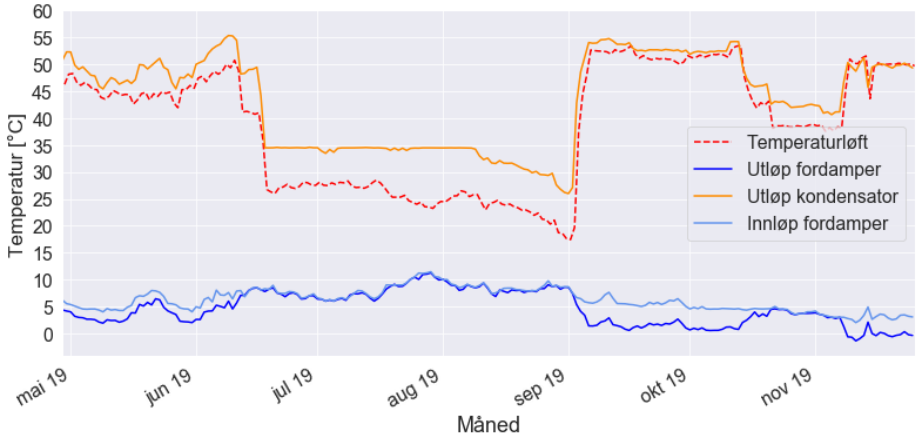
Figur 5.28, 5.29 og 5.30 viser målt gjennomsnittstemperatur per dag til fordamperen og kondensatoren, samt temperaturløftet for de tre varmpeumpeaggregatene. Høye temperaturløft fører til at varmepumpeaggregatene får et høyere effektbehov, som resulterer i en lavere SCOP.



Figur 5.28: Målt inn- og utløpstemperatur til fordamperen, utløpstemperatur til kondensatoren, samt temperaturløftet for varmepumpeaggregat VP1

Kompressorene i varmepumpeaggregat VP1 ble byttet mellom 4. september og 14. oktober 2019. Varmepumpen var i denne perioden ute av drift, og utløpstemperaturen for kondensatoren er derfor lave.

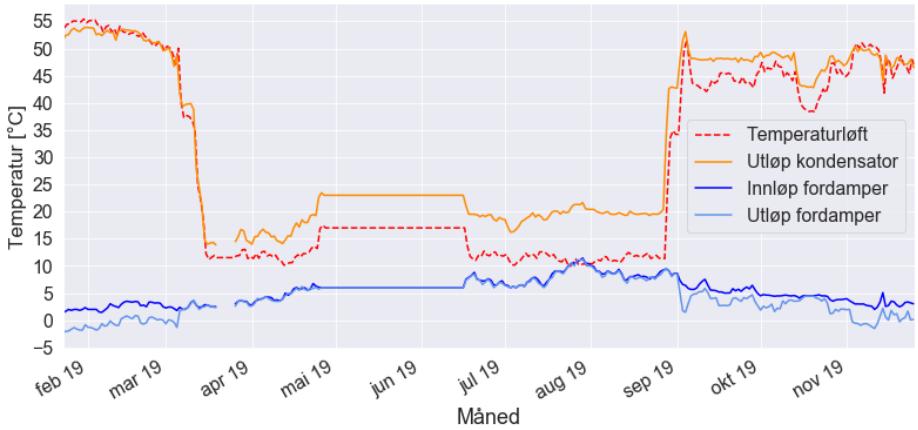
Innløpstemperaturen til fordamperen varierer mellom 2,1 °C og 11,5 °C. Temperaturen er høyest i sommermånedene og lavest i vintermånedene. Temperaturen ut av kondensatoren varierer mellom 38 °C og 56,4 °C.



Figur 5.29: Målt inn- og utløpstemperatur til fordamperen, utløpstemperatur til kondensatoren, samt temperaturløftet for varmepumpeaggregat VP2

I varmepumpeaggregat VP2 havarerte den ene kompressoren 17. juni 2019 og var ute av drift til starten av september 2019.

Temperaturen inn på fordamperen varierer mellom ca. 2 °C og 12 °C. Kondensatorens utløpstemperatur varierer mellom ca. 43 °C og 55 °C.



Figur 5.30: Målt inn- og utløpstemperatur til fordamperen, utløpstemperatur til kondensatoren, samt temperaturløftet for varmepumpeaggregat VP3

Den ene kompressoren i varmepumpeaggregat VP3 havarerte i starten av mars 2019 og aggregatet var ute av drift til i starten av september 2019. Fordamperens innløpstemperatur varierer mellom ca. 2 °C og 11 °C. Temperaturen er høyest i sommermånedene og lavest i vintermånedene. Utløpstemperaturen fra kondensatoren varierer mellom ca. 38 °C og 54 °C.

Den reelle utløpstemperaturen for kondensatorene i de tre varmepumpeaggregatene varierer mellom ca. 33 °C og 67 °C, mens aggregatene var tilgjengelig til drift. Detter er henholdsvis svært lav og svært høy utløpstemperatur for kondensatoren.

Temperaturløftet varierer mellom de tre varmepumpeaggregatene. VP1 er det aggregatet som har vært lengst i drift i denne perioden og har det høyeste temperaturløftet på over 50 °C mellom mai og midten av juni 2019, samt i midten av oktober til midten av november 2019. I denne perioden har VP2 hatt et temperaturløft på henholdsvis ca. 43-51 °C og ca. 38-48 °C, mens VP3 varierer mellom ca. 38-48 °i den siste perioden. For beregningen av SCOP-verdien er det totale temperaturløftet for de tre varmepumpeaggregatene som er utslagsgivende.

5.2.4 Varmepumpeaggregatenes integrerte kontrollsystem

For å analysere de faktiske driftsforholdene for de tre varmepumpeaggregatene ble aggregatenes integrerte kontrollsystem avlest 12. oktober 2019 kl 14.00. Relevante verdier fra kontrollsystemet er presentert i tabell 5.8. Vedlegg F.1 viser alle verdiene som ble loggført fra det interne kontrollsystemet 12. oktober 2019. Aggregat VP2 og VP3 hadde 100 % kompressorpådrag, mens aggregat VP1 var slått av. SD-anlegget for varmesentralen viste at aggregat 1 hadde gått med 50 % pådrag omtrent en time tidligere.

Display	Beskrivelse	VP 1	VP 2	VP 3
Krets A				
CAP_T	Total kapasitet	0%	100 %	100 %
EWT	**Inngående vanntemperatur ford.**	**2,6 °C**	**2,6 °C**	**2,5 °C**
LWT	Utgående vanntemperatur ford.	2,5 °C	-0,9 °C	-1,0 °C
DGT_A	**Trykkgasstemp.**	**20,3 °C**	**95,7 °C**	**98,5 °C**
Kondensator				
Cond_ewt	Kondensator inngående temp.	43,7 °C	43,1 °C	43,3 °C
Cond_lwt	**Kondensator utgående temp.**	**43,6 °C**	**51,8 °C**	**52,3 °C**
Driftstid				
hr_mach	Driftstid enhet	14798 t	13 328 t	16 122t
st_mach	**Antall start, enhet**	**19 985**	**18 370**	**31 313**
hr_cp_a1	Timer kompressor A1	12 340 t	10 410 t	12 484
st_cp_a1	Antall start kompressor A1	22 652	20 773	32 584
hr_cp_a2	Timer kompressor A2	12 419 t	10 705 t	12 663t
st_cp_a2	Antall start kompressor A2	22 645	20 705	32 566

Tabell 5.8: Avlesning av varmepumpeaggregatenes integrerte kontrollsystem, 12. oktober 2019 kl 14.00

Trykkgasstemperaturen t_{tg}, vist i tabell 19, er 95,7 °C og 98,5 °C for henholdsvis aggregat 2 og 3. Det anbefales å ha en moderat trykkgasstemperatur for å unngå slitasje på kompressorene. Høy trykkgasstemperatur, ca. 100-110 °C, over lengre tid er uheldig, da dette kan føre til kjemisk nedbrytning av arbeidsmediet, karbonisering av oljen, høyt oljeutkast og ødeleggelse av pakninger. Lekkasjer og kompressorhavari kan være resulterende konsekvens av en høy trykkgasstemperatur over lengre tid (Stene, 2018a).

De 6 kompressorene fra Danfoss ble skiftet etter kompressoren i varmepumpeaggregat VP2 havarerte 17. juni 2019. Det ble etter havariet montert ekstra tilbakeslagsventiler på røret ut fra kompressorene på alle tre varmepumpeaggregatene. Tilbakeslagsventil vil forhindre tilbakeslag av gass i kompressoren.

Antall start/stopp for kompressorer i varmepumpeanlegget
Anbefalt antall start for scrollkompressorer er maksimalt 3-4 i timen (Stene, 2018b). Hver kompressor i varmepumpeaggregatene har ulik driftstid og ulik antall start, hvor gjennomsnittlig start per time er presentert i figur 5.9. Gjennomsnittlig antall start per time er funnet

ved å dele driftstid på totalt antall start. Varmepumpeaggregat 3, VP3 skiller seg ut med 2-3000 flere driftstimer for aggregatet og omentrent en tredjedel flere start en de to andre aggregatene.

Beskrivelse	Antall start per time
Varmepumpeaggregat VP1	1,35
Varmepumpeaggregat VP2	1,37
Varmepumpeaggregat VP3	1,94
VP1 Kompressor 1	1,84
VP1 Kompressor 2	1,82
VP2 Kompressor 1	2,00
VP2 Kompressor 2	1,93
VP3 Kompressor 1	2,61
VP3 Kompressor 2	2,57

Tabell 5.9: Gjennomsnittlig start i timen per aggregat og kompressor

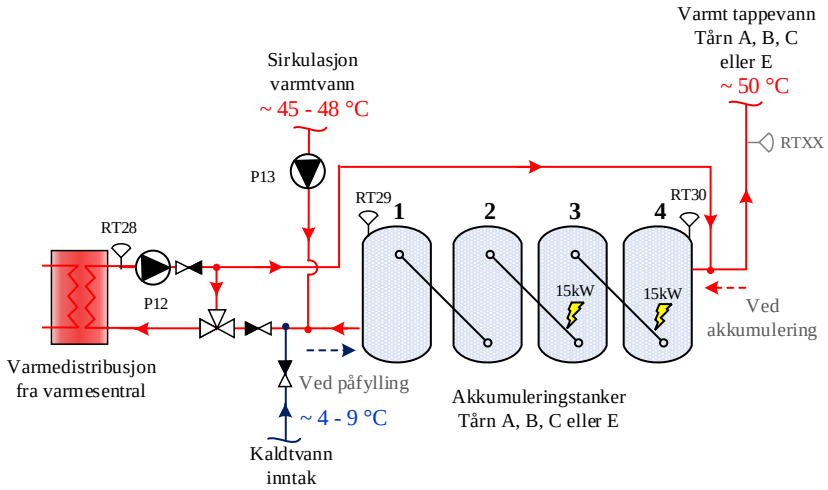
Gjennomsnittlig antall start for kompressorene varierer fra 1,84 til 2,61 start i timen. Perioder med flere antall start i timen enn anbefalt øker slitasje på kompressoren og fører til redusert levetid, eventuelt kompressorhavari.

Scrollkompressorer med på/av-regulering har en moderat virkningsgrad. Turtallsregulerte kompressorer (VSD-regulering) har en svært høy virkningsgrad for både dellast og fullastdrift. Ved bruk av turtallsregulerte kompressorer kan kompressorene reguleres fra 15-20 % til 100 %, noe som vil redusere antall start/stopp i kompressorene og øke varmepumpeaggregatenes virkningsgrad (COP). I tillegg vil turtallsregulerte kompressorer føre til jevnere drift, som vil redusere slitasje og føre til økt levetid for kompressorene (Stene, 2018b).

5.3 Analyse av akkumuleringstankene i varmedistribusjonssystemet

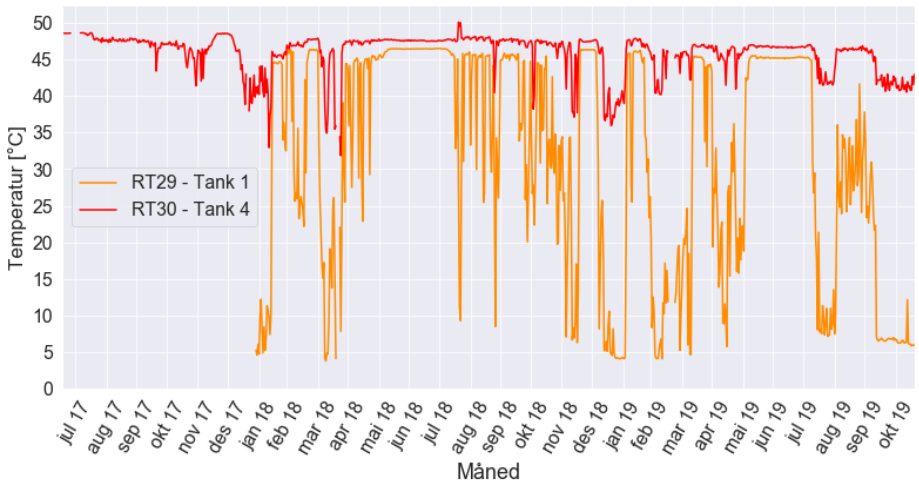
Systemskissen for akkumuleringstankene i tårn A, B, C og E er vist i figur 5.31. Temperaturføler RT29 måler temperaturen øverst i tank 1, mens temperaturføler RT30 måler temperaturen øverst i tank 4. Settpunkttemperaturen i tank 4 er satt til **52 °C**. Elkolbene i tank 3 og 4 slås på når temperaturen i tank 3 og 4 er henholdsvis 35°C og 44 °C. Den programmerte tidsforsinkelsen for tank 3 er satt til 40 sekund, mens den er 30 sekund for tank 4. Grunnet denne tidsforsinkelsen og tiden det tar å varme opp vannet i tank 4 til settpunkt, vil noe av vannet som leveres til tårnene når det tappes for varmtvann være under settpunkt. Temperaturføler RT30 skal flyttes av SiT Bolig i nær framtid til øverst i tank 3, for å ta hensyn til forsinkelsen og for å ha en sikkerhetsmargin.

Det er per i dag usikkert hvilken tappevannstemperatur som leveres til boligtårnene, barnehagen og biblioteksbygningen. En ekstra temperaturføler RTXX som måler temperaturen levert til bygningene ville vist den faktiske temperaturen levert til bygningene.



Figur 5.31: Systemskisse av akkumuleringstankene i Tårn A, B, C og E

Figur 5.32 viser målt gjennomsnittstemperatur per dag i akkumuleringstank 1 og 4 for boligtårn A.

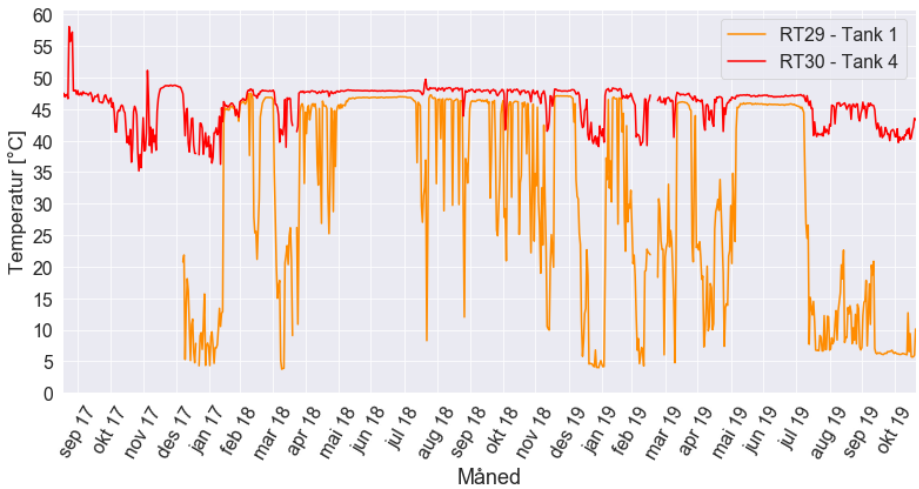


Figur 5.32: Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank i Tårn A

Temperaturen i tank 4 fluktuerer særlig i vintermånedene, fra 35 °C til 40 °C. En ideell temperaturgraf for tank 4 ville vært jevn rundt ønsket settpunkt og temperaturvekslingene viser problemer med akkumuleringen. I september og oktober 2019 var temperaturen i tank 4 mellom 41-43 °C, ca. 10 °C lavere enn settpunkt. Anbefalt temperatur for bad, dusj og håndvask er 38 °C, mens rengjøring, oppvask og skylling for hånd har en anbefalt temperatur mellom 40-60 °C (SINTEF Byggforsk, 2015). Inkluderes et varmetap mellom tankene og tappevannsuttaket kan temperaturen bli enda lavere.

Variasjonene i tank 1 er større, fra 4-5 °C , som er nettvanstemperatur, til ca. 47 °C. Dette er perioder hvor tank 1 fylles med nettvann. Avhengig av årstid varierer nettvanntemperaturen i Trondheimsområdet varierer mellom 4 til 9 °C (Eggen, 2019). Ideelt sett skulle tank 1 blitt fylt opp ved akkumulering.

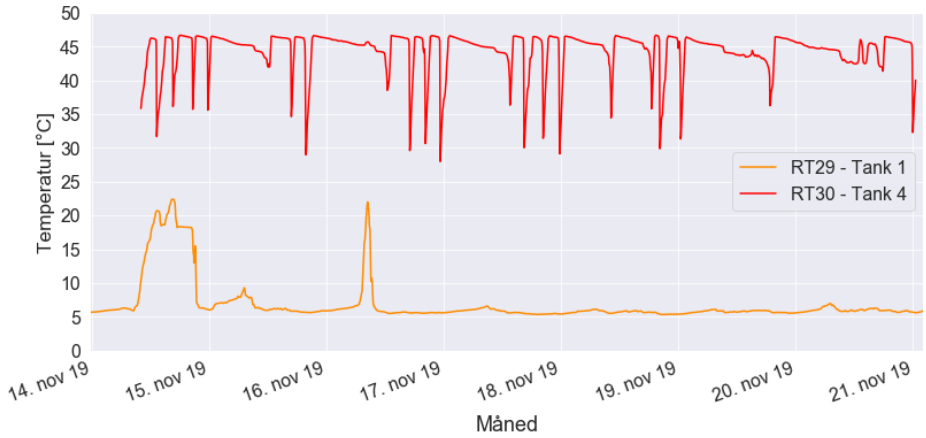
Gjennomsnittstemperatur per dag i akkumuleringstank 1 og 4 i boligtårn B er presentert i figur 5.33.



Figur 5.33: Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank i Tårn B

Temperaturene i akkumuleringstank 1 og 4 i tårn B er lik temperaturene i tankene i Tårn A. Temperaturene i varmeste tank, tank 4, varierer mellom ca. 35 °C og 50 °C.

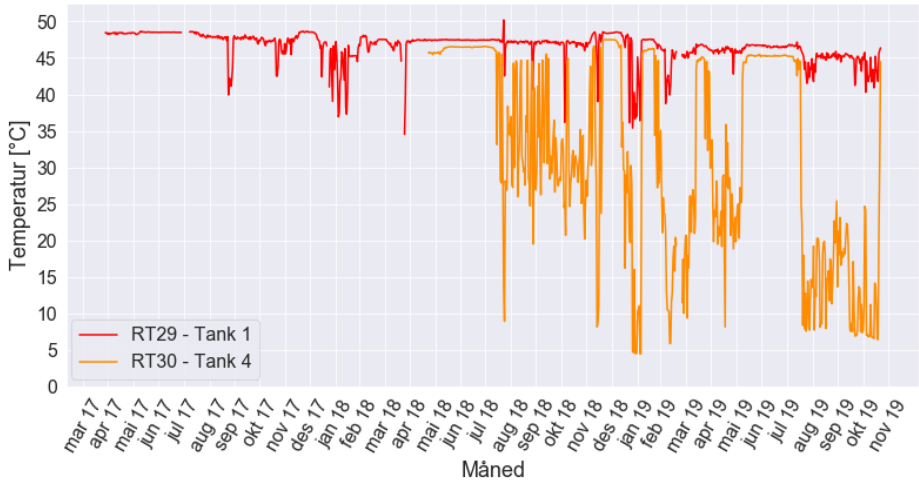
Målte temperaturvariasjoner i akkumuleringstank 1 og 4 i boligtårn B for en uke i midten av november 2019 er presentert i figur 5.34.



Figur 5.34: Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank i Tårn B

Temperaturvariasjonene i tank 4 varierer fra omtrent 27 °C til 47 °C. Elkolben slås inn når temperaturen i tanken synker under 44 °C, og hever temperaturen til 47 °C. Temperaturen i tank 1 er ca. 5 °C i store deler av perioden.

Figur 5.35 viser målt gjennomsnittstemperatur per dag i akkumuleringstanken 1 og 4 i boligtårn C.

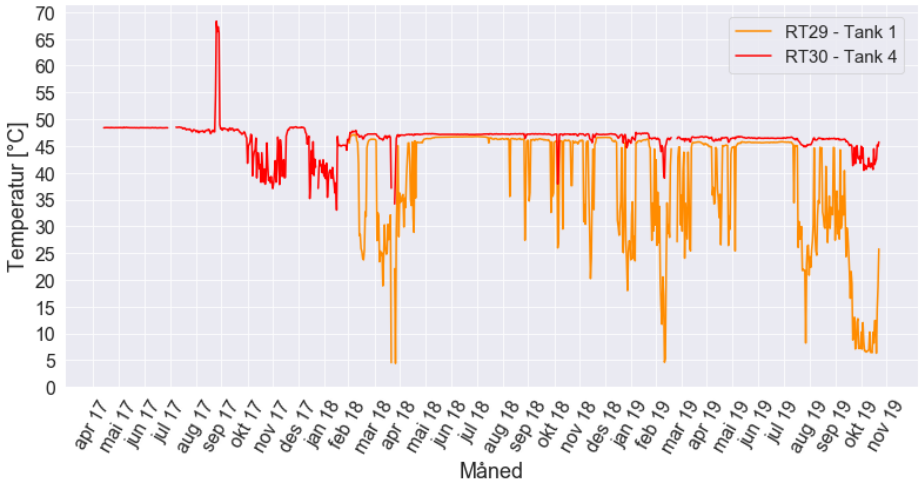


Figur 5.35: Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank i Tårn C

Temperaturen i både akkumuleringstank 1 og 2 i boligtårn C er svært like temperaturene i akkumuleringstankene i boligtårn A og B. Det er relativt store fluktuasjoner fra 5 °C til

45 °for temperaturen i tank 1 og fra 35 °C til 47 °C for tank 4. Dette viser akkumuleringsproblemer i boligtårn C.

Målt gjennomsnittstemperatur i akkumuleringstank 1 og 4 per dag i boligtårn E er presentert i figur 5.36.

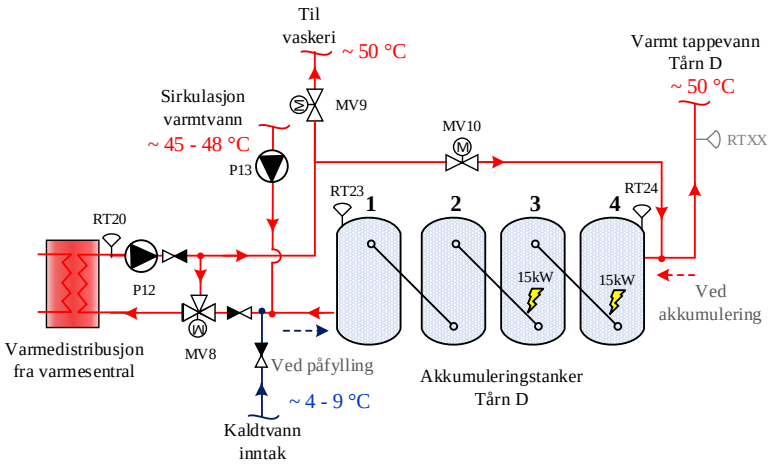


Figur 5.36: Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank i Tårn E

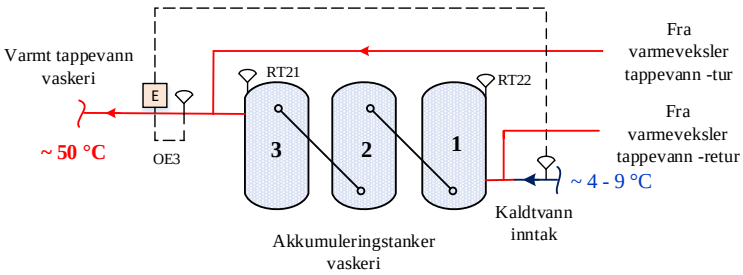
Temperaturen i tank 4 varierer mindre enn i de andre boligtårnene. Det er noen fluktuasjoner i høst og vintermånedene, som også er perioder de andre boligtårnene har hatt akkumuleringsproblemer. Temperaturen i tank 1 er stabil i sommermånedene, men varierer mellom ca. 5-25 °C og 47 °C. Mellom 23. september og 28. september 2017 er temperaturen i akkumuleringstankene mellom 50 °C og 70 °C. Dette er langt over settpunkt og er trolig innkjøringsproblemer.

Undersentralen i boligtårn D skiller seg fra de andre tårnene ved at deler av næringsdelen er vaskeri. I tillegg til de fire akkumuleringstankene til varmt tappevann, har undersentralen tre tanker til vaskeriet. Undersentralen har to motorstyrte ventiler, MV8 og MV10, vist i figur 5.37. De motorstyrte ventilene regulerer vannmengde automatisk etter målt temperatur. MV10 reguleres etter temperaturføler RT23. Er temperaturen i tank 1 under settpunkt vil ventilen reguleres slik at tankene fylles på med varmtvann.

Figur 5.38 viser akkumuleringtankene i vaskeriet. Akkumuleringstankene til varmt tappevann til boligtårnene har prioritet.

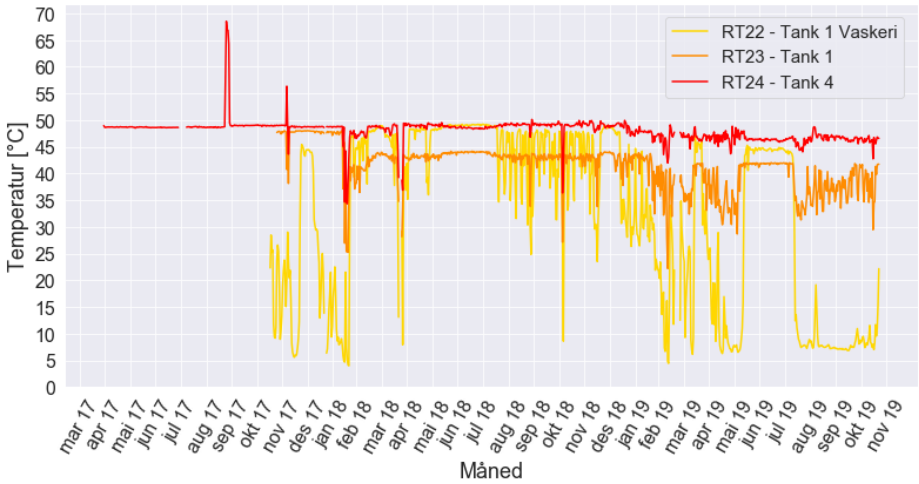


Figur 5.37: Systemskisse av akkumuleringstankene for varmt tappevann til bolig- og næringsdelen i Tårn D



Figur 5.38: Systemskisse av akkumuleringstankene for varmt tappevann til vaskeriet i Tårn D

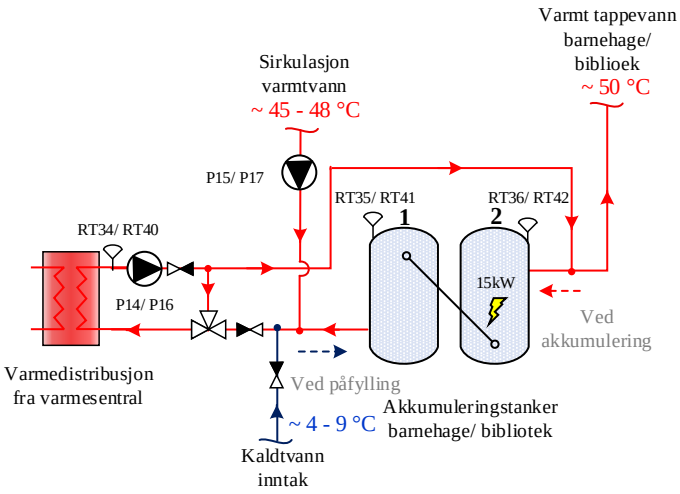
Målt gjennomsnittstemperatur i akkumuleringstank 1 og 4 for boligtårn D og tank 1 for vaskeriet er presentert i figur 5.39. I systemskissen er det installert en temperaturføler, RT21, i vaskeriets siste tank. Denne temperaturføleren er ikke koblet til undersentralens SD-anlegg, og resultater fra denne føleren er derfor ikke tatt med i analysen.



Figur 5.39: Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank for varmt tappevann til boligene og første tank til vaskeriet i Tårn D

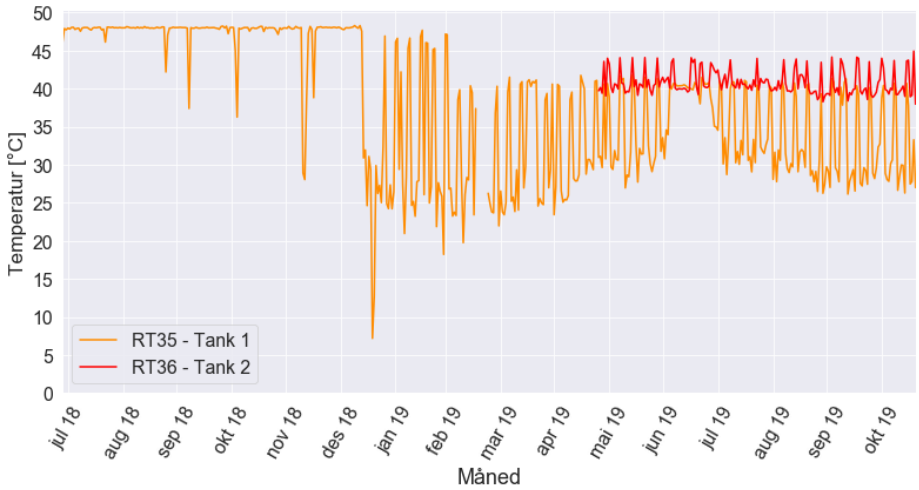
Akkumuleringstank 4 har en relativt stabil temperatur på omentrent 46-49 °C. Dette tyder på at akkumuleringen i boligtårn D fungerer bedre enn i de andre boligtårnene. Variasjonene i tank 1 varierer i mindre grad og holder tidvis en temperatur på 43-44 °C. Temperatursvingningene er større i tank 1 i vaskeriet. Dette kan være et resultat av at akkumuleringstankene for varmt tappevann til bolig- og næringsdelen har prioritet. Tårn D har en temperaturøkning opp til omentrent 70 °C mellom 23. september og 28. september 2017, samtidig som Tårn E.

I barnehagen og biblioteket er det installert to akkumuleringstanker, vist i figur 5.40.



Figur 5.40: Systemskisse av akkumuleringstankene til barnehagen og biblioteket

Figur 5.41 viser målt gjennomsnittstemperatur per dag i akkumuleringstankene 1 og 2 i barnehagen.

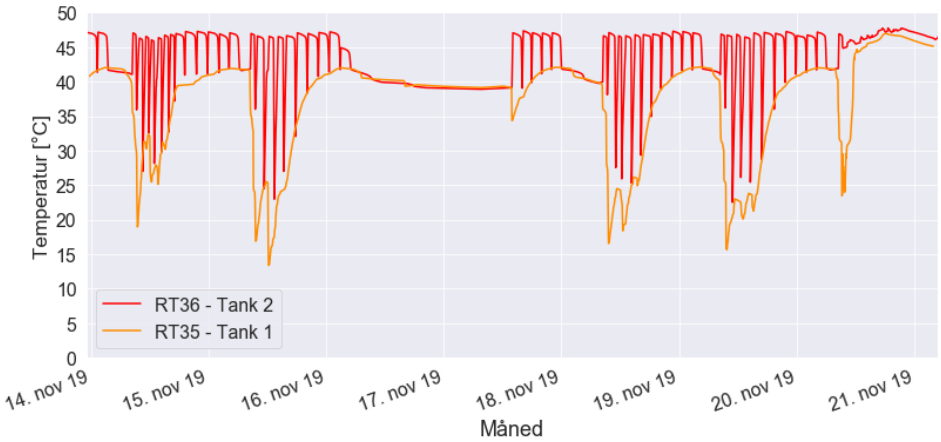


Figur 5.41: Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank i barnehagen

Elkolben slår inn når temperaturen i tanken synker til omentrent 40 °C. Dette vises ved at temperaturen i tanken stiger raskt til 44 °C, før den synker igjen. Temperaturen i tank 1 varierer i størst grad mellom 24 °C og 41 °C, og har maksimal- og minimalverdier omtrent

samtidig som tank 2.

Målt temperatur i akkumuleringstank 1 og 2 i barnehagen i tidsperioden 14. november 2019 til 21.november 2019, er presentert i figur 5.42.



Figur 5.42: Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank i barnehagen

Elkolben kobles inn opp til flere ganger per døgn og løfter temperaturen opp til omentrent 47 °C. Deretter synker temperaturen ned til mellom 25 °C og 40 °C, før den løftes opp igjen til 47 °C.

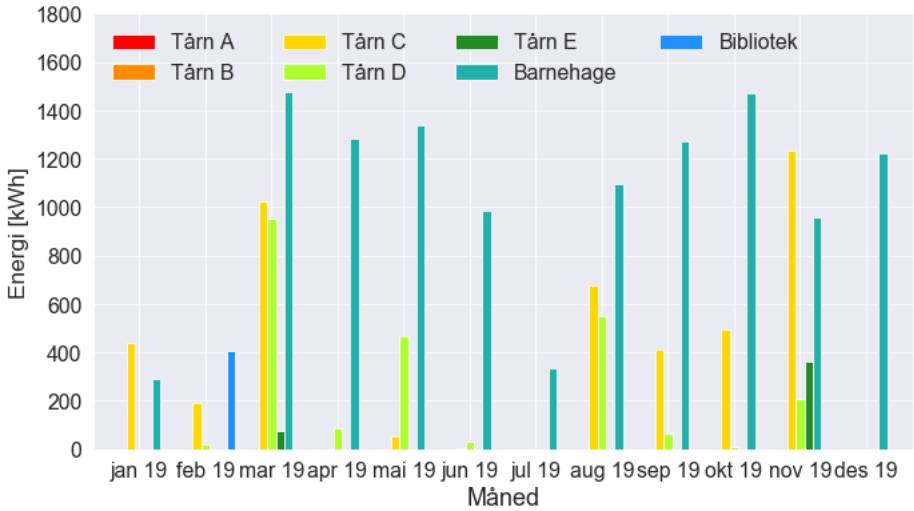
Målt gjennomsnittstemperatur per dag til akkumuleringstank 1 og 2 i biblioteket er presentert i figur 5.43.

Figur 5.43: Målt temperatur i første og siste akkumuleringstank i bibliotek

Tank 2 har en relativt stabil temperatur, bortsett fra i perioden januar - februar 2019, hvor temperaturen varierer mellom 42 og 47 °C. I perioden september - oktober 2019 varierer temperaturen i tank 2 mellom 35 og 45 °C. I akkumuleringstank 1 varierer temperaturen i samme tidsrom som tank 2, men mellom 16 og 40-43 °C. Temperaturen i tank 1 er utenom disse tidsrommene stabil og varierer lite.

Akkumuleringen i boligtårn D er relativt god, og fungerer i mye større grad enn de andre boligtårnene. Forskjellen mellom boligtårn D og de andre boligtårnene er de to motorstyrte reguleringsventilene MV8 og MV10. Det er høyst sannsynlig at det er denne løsningen som fører til bedre akkumulering i tårnet og ville sannsynligvis forbedret akkumuleringen i de andre boligtårnene, barnehagen og biblioteksbygningen.

Målt elektriske forbruk til elkolbene i akkumuleringstankene i boligtårnene, barnehagen og biblioteksbygningen for 2019 er presentert i figur 5.44. Grunnet feil i undersentralens SD-anlegg er ikke målingene av elforbruket til elkolbene i tårn A og B lagret. De er derfor ikke presentert i denne analysen.



Figur 5.44: Målt forbruk av elektrisitet til elkolbene i varmtvannsberedere ved Moholt 50|50

Elforbruket til elkolbene i barnehagen varierer mellom ca. 400 kWh/mnd og 1450 kWh/mnd, i store deler av 2019. Det totale elforbruket til elkolbene i barnehagen er omtrent 12 MWh/år. Den gjennomsnittlige varmeleveransen til varmtvannsberedning i barnehagen fra 2016 til 2019 er ca. 37 MWh/år, mens varmeleveransen for 2019 er ca. 21 MWh/år. Dette er 43 % lavere enn gjennomsnittet for de fire årene. Ekskluderes varmeleveransen til varmtvannsberedning i barnehagen for 2019, er gjennomsnittet for de tre årene ca. 42 MWh/år.

Elforbruket til elkolbene i varmtvannsbererderne i barnehagen er 43 % av total varmeleveranse til varmtvannsbererderne i barnehagen i 2019. Dette viser tydelig at akkumuleringen i barnehagen ikke fungerer etter hensikten. Ved analyse av temperaturgrafen til tank 2 i figur 5.41, viser grafen at elkolbene slås inn opp til flere ganger daglig.

Boligtårn D har et elforbruk til elkolbene mellom 400 kWh til 950 kWh, fra mars, mai og august 2019. Dette kan skyldes prioriteringen av varmt tappevann til akkumuleringstankene til bolig- og næringsdelen, slik at tankene i vaskeriet bruker elkolbene i perioder hvor temperaturen faller under 40 °C.

Elkolbene i boligtårn C forbruker mellom 400 kWh/mnd til 1000 kWh/mnd fra januar til mars og august til september 2019. Dette er i samme periode som temperaturen i tankene varierer mye og elkolbene kobles inn for å holde settpunktemperatur. Temperaturvariasjonene er relativt like i boligtårn A, B og C og det vil være naturlig å anta at boligtårn A og B vil ha et tilnærmet likt elforbruk for elkolbene som boligtårn C.

Boligtårn E har et elforbruk på ca. 70 kWh i mars 2019, som stemmer med temperaturgrafen i figur 5.36. Temperaturen synker til omtrent 39 °C i denne tidsperioden, hvor

elkolbene slås på og øker temperaturen til ca. 47 °C.

I februar 2019 bruker elkolbene i akkumuleringstankene i biblioteket omentrent 400 kWh. Temperaturgrafen i figur 5.43 viser at temperaturen synker under 44 °C og elkolbene slås på og øker temperaturen til 46 °C ved et par tilfeller i denne perioden. Varmetapet i akkumuleringstankene med elkolbe er beregnet til å være 10 kWh/døgn (Variant VVS, 2018).

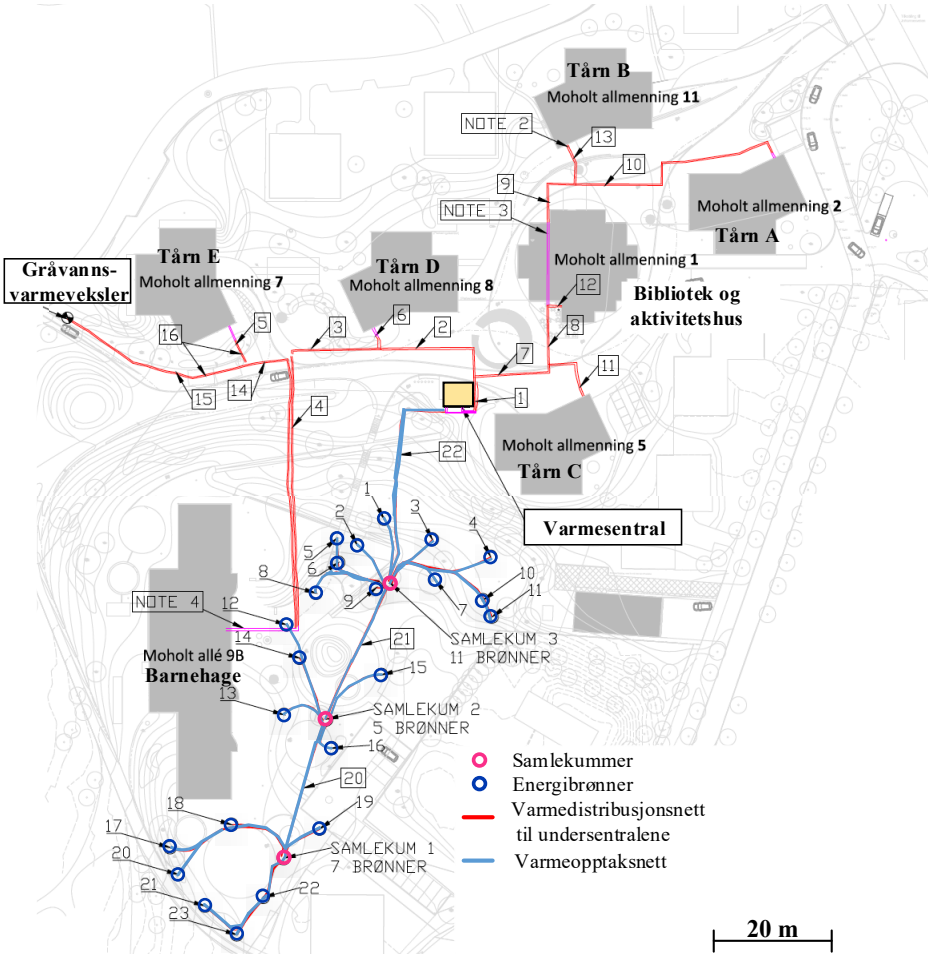
5.4 Analyse av brønnparken (termisk energilager)

Brønnparken for det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 består av 23 energibrønner på ca. 250 meter, og har en total brønndybde på ca. 5750 meter. Energibrønnene har glattrørskollektorer fylt med denaturert etanol (HX i-24) som har et frysepunkt på -10 °C.

Brønnparken er prosjektert til å fungere som et termisk energilager. Borehullkonfigurasjon, mengde tilbakeført varme og temperaturene i brønnparken er viktige faktorer som vil bli analysert i dette kapittelet.

5.4.1 Borehullkonfigurasjon

Brønnparkens borehullkonfigurasjonen er viktig for å kunne oppnå god termisk energilagring i borehullene. Borehullkonfigurasjonen for det termiske energisystemet er presentert i figur 5.45.



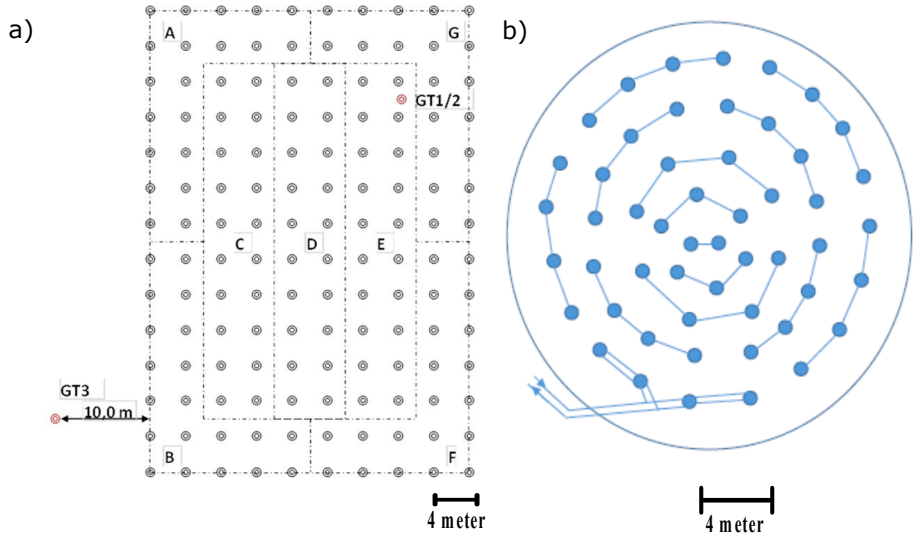
Figur 5.45: Borehullskonfigurasjonen til brønnparken i det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 (redigert) (AF Gruppen, 2015a)

Borehullkonfigurasjonen ved Moholt 50|50 er en utstrakt konfigurasjon, hvor borehullene kan deles inn i tre mer kompakte områder. Avstanden mellom hvert borehull varierer fra omtrent 4 meter til omtrent 15 meter. Enkelte borehull som nummer 2, 5, 6 og 8 er plassert relativt tett, mens andre borehull som 18, 19 og 15 har større avstand til nærmeste borehull. I områder hvor det er større avstand mellom borehullene vil brønnparken ha et større varmetap enn områder med mindre avstand.

Kompakte borehullkonfigurasjoner med firkantet som det termiske energilageret i Emmaboda eller sylindrisk form, som det termiske energilagret Geotermos i Drammen, vil ha en større termisk lagringseffektivitet med lavere varmetap, og vil derfor være gode termiske energilagre. Med en sekskantet eller sylindrisk konfigurasjon vil overflateareal-

til-volum forhold reduseres og varmetapene til omkringliggende fjell vil minimeres, da rekkene i større grad er lukket (Skarphagen et al., 2019a).

Borehullkonfigurasjonen til det termiske energilageret i Emmaboda i Sverige er presentert i figur 5.46 a) og det termiske energilageret Geotermos i prosjektet Fjell 2020 i Drammen figur 5.46 b). Spesifikasjonener og beskrivelse av de to energilagrene er presentert i Vedlegg L



Figur 5.46: Borehullkonfigurasjonen til a) det termiske energilageret i Emmaboda i Sverige (redigert) (Nordell et al., 2015) og b) det termiske energilageret Geotermos i prosjektet Fjell 2020 i Drammen (redigert) (Ramstad, 2017)

En mer kompakt borehullkonfigurasjon ved brønnparken for det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 ville høyst sannsynlig gitt et lavere varmetap til omkringliggende fjell og gitt en høyere lagringseffektivitet.

Brønnparken for det termiske energisystemet ved Moholt 50|50 er et lavtemperatur termisk energilager med en relativt lav temperaturforskjell mellom energilageret og omkringliggende fjell. En lav temperaturforskjell mellom omkringliggende fjell og det termsike energilageret gir et mindre varmetap fra brønnparken (Ramstad, 2017). Varmetilførsel fra omkringliggende fjell til brønnparken oppstår når temperaturen i brønnparken er lavere enn temperaturen for omkringliggende fjell.

Brønnparkkonfigurasjoner med stort volum vil ha et større termisk energilager, og resulterende lavt relativt varmetap (Stene, 2018e).

5.4.2 Frostvæske

Frostvæsken (kuldebærer) brukt i borehullskollektorene i brønnparken ved Moholt 50|50 er denataurent etanol HX i-24. Termofysikalske data ved 0 °C og 10 °C for ulike frostvæsker er presentert i figur 5.47 (Stene, 2019). Etanol har relativt gode termofysikalske egenskaper sammenlignet med andre frostvæsker.

Kuldebærer	Tetthet (kg/m³)		Tetthet x c_p (kJ/m³K)		Termisk kond. (W/mK)		Kinem. viskositet (mm²/s)	
	0 °C	10 °C	0 °C	10 °C	0 °C	10 °C	0 °C	10 °C
Vann	1000	999	4.220	4.190	0,60	0,58	1,0	1,3
Propylenglykol (PG)	1035	1031	3.990	3.978	0,41	0,42	7,8	5,0
Etylenglykol (EG)	1046	1043	3.833	3.859	0,44	0,45	4,2	2,9
Etanol (HX)	972	968	4.170	4.162	0,42	0,43	6,0	3,7
CoolFlow DTX	1049	1046	3.954	3.953	0,47	0,48	4,8	3,3
Thermox FXC2	1040	1036	3.962	3.968	0,44	0,45	8,3	5,2
Thermox DTX					0,45	0,46	5,7	3,8
Kilfrost Geo	1116	1112	4.163	4.159	0,48	0,48	3,5	2,6

Figur 5.47: Termofysikalske data ved 0 °C og 10 °C for ulike frostvæsker (Stene, 2019)

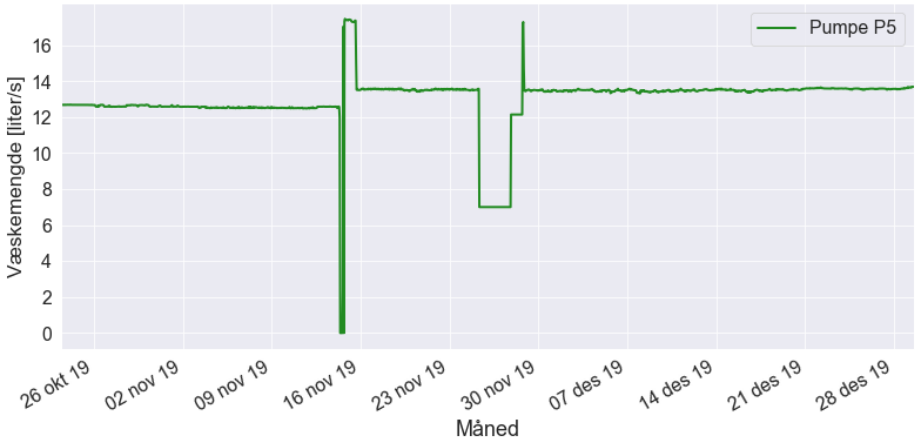
Denaturert etanol med 24 % blanding har et frysepunkt på -10 °C og en øvre temperaturgrense på 20-25 °C (Stene, 2018d). Lavere frostsikring ned til - 17,5 % fås ved HX i-35 (35 % etanolblanding). Denne kuldebæreren vil ha samme temperaturgrense, men et lavere flammepunkt på 27 °C, mot 33 °C for HX i-24.

Borehullskollektor
I brønnparken for det termiske energisystemet er det valgt enkle glattrørskollektorer. Turbokollektorer gir bedre varmeovergang og lavere trykktap. Lavere trykktap fører til lavere energibruk for brønnpumpen som gir en bedre SCOP.

5.4.3 Væskestrømning i energibrønnene

Turbulent strømning gir god konvektiv varmeovergang mellom frostvæsken og rørvegg i kollektorslangen. Anbefalt væskemengde per brønn er 0,50-0,55 liter/s per. Moholt 50|50 har 23 brønner, og anbefalt total væskemengde for brønnparken er derfor i størrelsesorden 11,5-12,7 liter/s.

Målt gjennomsnittlig væskemengde for pumpe P5 per dag i det termiske energisystemet er presentert i figur 5.48.



Figur 5.48: Målt gjennomsnittlig væskemengde for pumpe P5 per dag

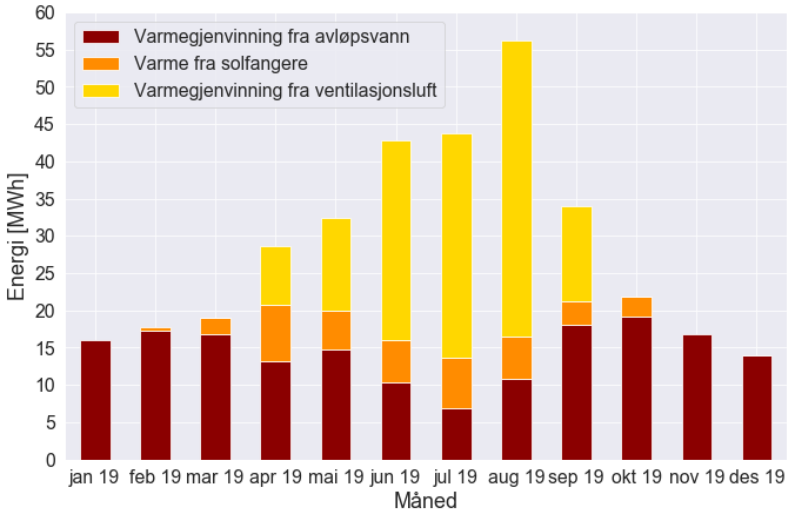
Væskemengden ligger jevnt på 12,6-12,8 liter/s, før den øker til 13,6-13,8 liter/s i slutten av november, som prosentvis er 9,1 % høyere enn ideell væskemengde for brønnparken. Dette tilsvarer henholdsvis en væskemengde på 0,55-0,56 liter/s og 0,59-0,6 liter/s per brønn i brønnparken. Økt væskemengde gjennom brønnparken fører til økt trykktap og unødvendig høyt pumpearbeid. Samtidig vil en økt væskestrøm føre til en lavere δ T over fordamperen, som fører til høyere fordampningstemperatur og dermed høyere COP. Det er derfor verken ønskelig med en for høy eller for lav strømningsmengde.

Varmepumpeaggregatene var ute av drift en tidsperiode 14. november og fra 25. november til 28. november, som forklarer den ujevne væskemengden i figur 5.48 i disse periodene.

5.4.4 Tilbakeføring av varme til brønnparken

Spesielt for brønnparken ved Moholt 50|50 er at det tilbakeføres varme fra tre ulike kilder. Varme fra gråvannsvarmeveksleren, varmegjenvinning fra ventilasjonsluft og varme ra solfangeranlegget leveres tilbake til brønnparken og det termiske energilageret for å kunne bruke varme når varmebehovet er størst. I de varmeste månedene er det mest overskuddsvarme i byggene og størst varmeproduksjon fra solfangerene, og med et termisk energilager kan det være hensiktsmessig å sesonglagre varme. En analyse av varmegjenvinning fra ventilasjonsluft er gjort i kapittel 5.1.8, og det er kun de målte verdiene som vil bli inkludert i denne analysen.

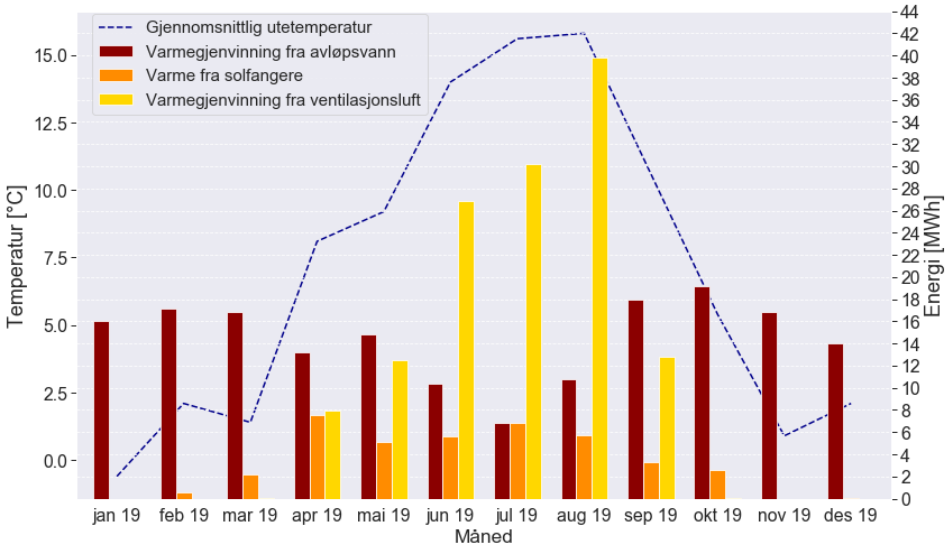
Månedlig fordeling av varmeleveransen levert til brønnparken fra solfangeranlegget og varmegjenvinningen fra avløpsvann og ventilasjonsluft i 2019 er presentert i figur 5.49. Målt månedlig fordeling av varmeleveranse til distribusjonsnettet til brønnparken er presentert i Vedlegg H.6.



Figur 5.49: Målt tilbakeføring av varme fra solfangere, varmegjenvinning fra avløpsvann og varmegjenvinning fra ventilasjonsluft

Tilbakeført varme til brønnparken er totalt **ca. 345 MWh/år** i 2019. Varmeleveransen fra gråvannsvarmeveksleren er ca. 175 MWh/år, mens den måle varmeleveransen fra varmegjenvinning fra ventilasjonsluft er ca. 130 MWh/år. Den laveste varmeleveransen leveres fra solfangeranlegget er på ca. 40 MWh/år.

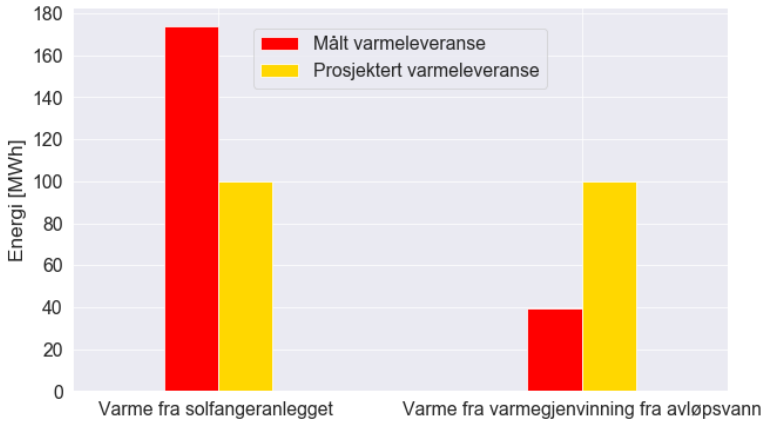
Målt varmeleveranse til brønnparken fra gråvannsvarmevelskeren, varmegjenvinning av ventilasjonsluft og varme fra solfangeranlegget per måned i forhold til månedlig uteluft-temperatur er presentert i figur 5.50.



Figur 5.50: Målt tilbakeføring av varme fra solfangere, varmegjenvinning fra avløpsvann og varmegjenvinning fra ventilasjonsluft

Varme fra varmegjenvinning fra avløpsvann varierer mellom ca. 7-19 MWh/mnd. Det avgis mest varme fra varmegjenvinning i de kaldeste månedene, da temperaturforskjellen mellom avløpsvannet og frostvæsken er størst. Utetemperaturen er høyest i sommermånedene, som gir mer overskuddsvarme i byggene og større varmegjenvinning av varme fra ventilasjonsluft i denne perioden. Varme fra varmegjenvinning fra ventilasjonsluft varierer mellom ca. 0-40 MWh/mnd. Solfangeranlegget produserer relativt jevnt i vår-, sommer- og høstmånedene og varmeleveransen varierer fra 0,5 til 7 MWh/mnd.

Sammenligning av den målte varmeleveransen fra solfangeranlegget og varmegjenvinningen fra avløpsvann og den prosjekterte varmeleveransen er presentert i figur 2.4.



Figur 5.51: Prosjektert varmegjenvinning fra avløpsvann og varme fra solfangeranlegget sammenlignet med målt varmeleveranse

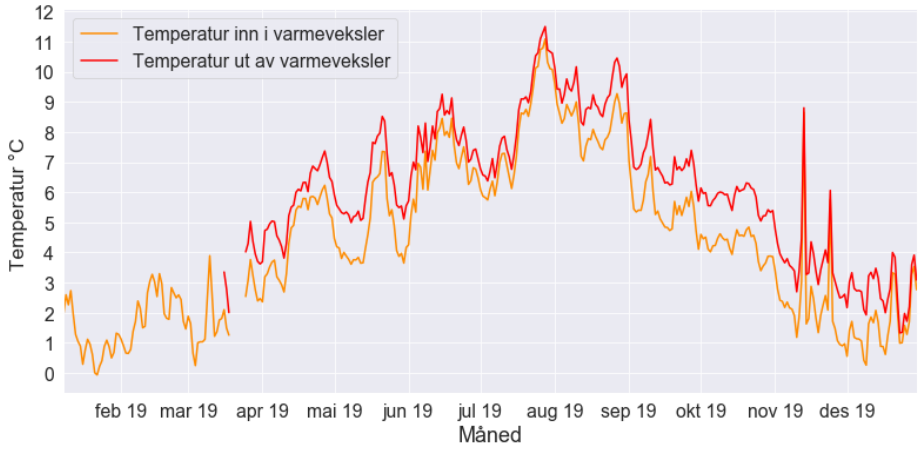
Avviket mellom den prosjekterte varmeleveransen fra solfangeranlegget og varmegjenvinning fra avløpsvann er henholdsvis **ca. 74 % og ca. 61 %**. Total prosjektert varmeleveranse fra solfangeranlegget og varmegjenvinning fra avløpsvann er 200 000 kWh/år og totalt tilbakeført varme til brønnparken i 2019 var 213 315 kWh. Dette gir et **totalt avvik fra prosjektert varmeleveranse på ca. 7 %**. Den totale varmeleveransen til brønnparken er større en prosjektert varmeleveranse, med mer varme fra varmegjenvinning fra avløpsvann og mindre varme fra solfangeranlegget enn prosjekter.

Varmemengden fra solfangeranlegget er relativt liten sammenlignet med gråvannsvarmeveksleren, som har ca. 33 % høyere investeringskostnad, men leverer ca. 80 % mer varme til brønnpark- en i løpet av 2019.

Varmegjenvinning fra avløpsvann

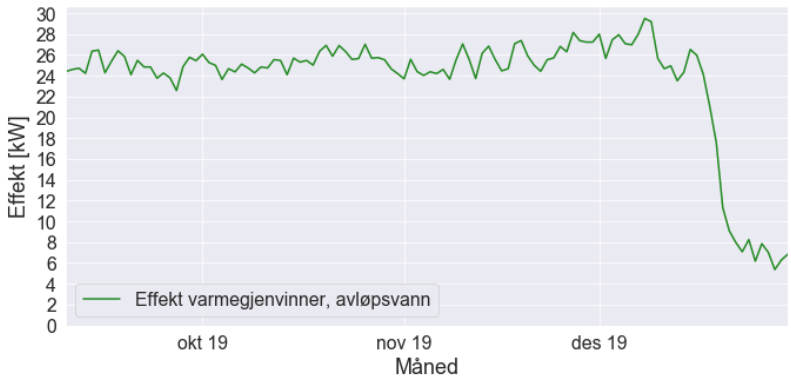
Total varme tilbakeført til brønnparken fra varmegjenvinning av avløpsvann var ca. 460 MWh. Dette gir en gjennomsnittlig varmegjenvinning på ca. 154 MWh per år siden 2017.

Figur 5.52 viser forskjellen på målte temperaturer inn og ut av varmeveksleren for varmegjenvinning fra avløpsvann. Temperaturen er gjennomsnittlig temperatur per dag.



Figur 5.52: Målt gjennomsnittlig temperatur inn og ut av varmeveksleren for varmegjenvinning fra avløpsvann

Gjennomsnittlig målt varmeffekt overført i varmeveksleren fra avløpsvann til frostvæske er presentert i figur 5.53.

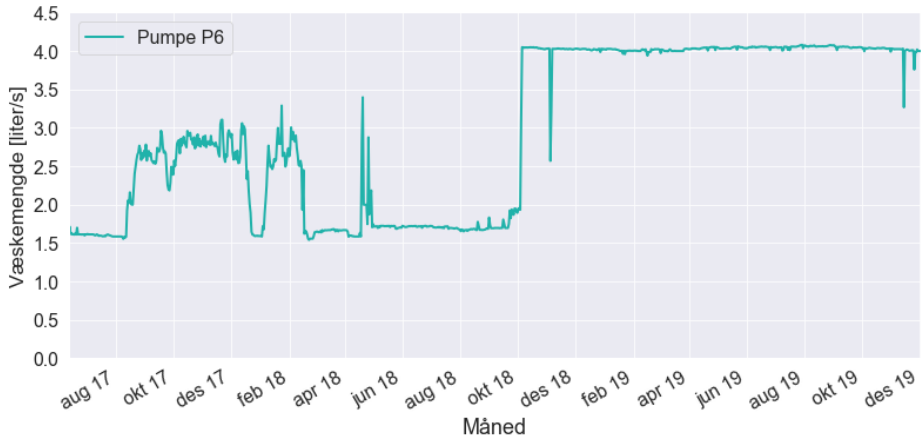


Figur 5.53: Målt effekt vekslet i varmeveksleren for varmegjenvinning fra avløpsvann

Varmeeffekten varierer mellom ca. 22 kW og 30 kW i perioden september til midten av desember 2019. Fra midten av desember reduseres effekten ned til 6 kW. Mange studenter reiser fra studentbyen i juleferien som fører til lavere forbruk av varmtvann, og dermed en lavere temperatur på avløpsvannet. Dette reduserer temperaturforskjellen mellom frostvæsken og avløpsvannet, som fører til mindre varmegjenvinning og lavere varmeeffekt i gråvannsvarmeveksleren.

Figur 5.54 viser målt gjennomsnittlig strømningsmengde per dag for pumpe P6 og gjen-

nom varmeveksleren for varmegjenvinning av avløpsvann. Strømningsmengden er gjennomsnittlig strømningsmengde per dag.



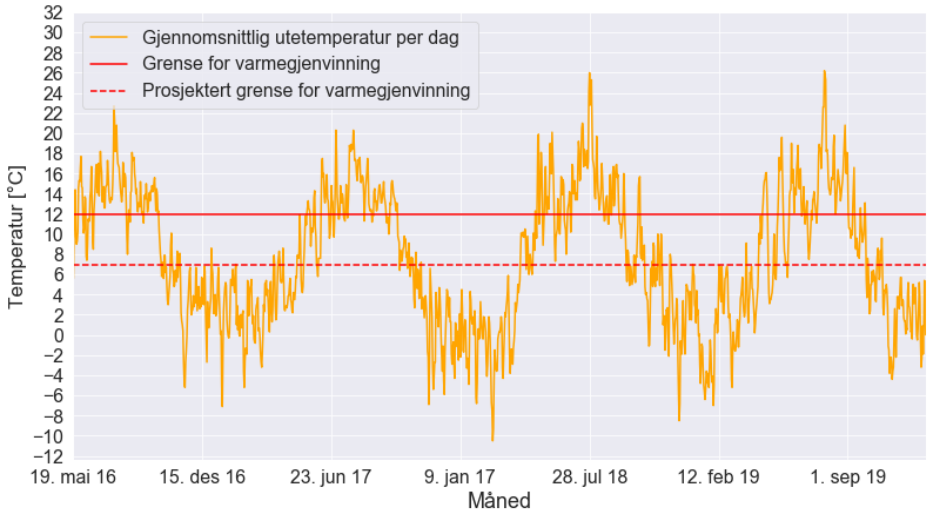
Figur 5.54: Målt gjennomsnittlig strømningsmengde per dag gjennom pumpe P6 for varmegjenvinning fra avløpsvann

Det er en betydelig forskjell på strømningsmengden fra pumpe P6 før og etter november 2019. Den gjennomsnittlige strømningsmengden øker fra ca. 1,7 liter/s til ca. 4,0 liter/s. I løpet av 2018 ble det oppdaget at pumpen i perioder hadde en konstant strømningsmengde på ca. 1,7 liter, i stedet for å variere etter temperaturdifferanse mellom avløpsvannet og frostvæsken (Arnevik et al., 2018). Denne feilen ble rette opp og er høyst sannsynlig årsaken til de lave strømningsmengdene i perioder fram til november 2018.

Varmeeffekten fra gråvannsvarmeveksleren avhenger av strømningsmengde på avløpsvannet, strømningsmengde på frostvæsken og temperaturforskjell mellom frostvæsken og avløpsvannet.

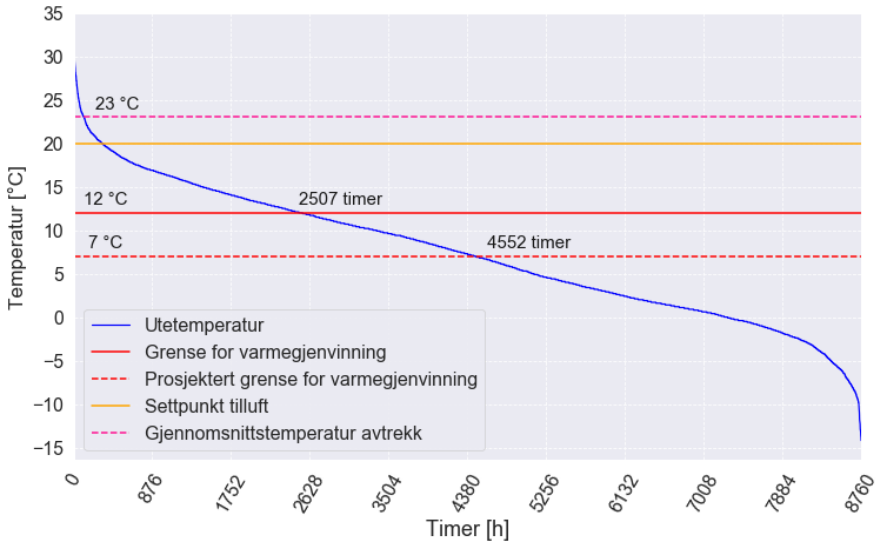
Varmegjenvinning fra ventilasjonsluft

Målt gjennomsnittlig utetemperaturen fra mai 2016 til og med desember 2019 med temperaturgrense for varmegjenvinning er presentert i figur 5.55.



Figur 5.55: Målt gjennomsnittlig utetemperatur per dag ved Moholt 50|50 med temperaturgrenser for varmegjenvinning fra ventilasjonsluft

Temperatur varighetskurve for 2018 med prosjektert og levert temperaturgrense for varmegjenvinning, samt målt tilluft- og avtrekkstemperatur er presentert i figur 5.56.



Figur 5.56: Temperatur varighetskurve for utelufttemperaturen for 2018 med grenser for varmegjenvinning fra ventilasjonsluft.

Med leverte ventilasjonsaggregater som stopper varmegjenvinningen fra ventilasjonsluft ved en utetemperatur under 12 °C vil anlegget tape ca. 2045 timer hvor varmegjenvinneren kunne vært i drift. Dette er gjør at kun ca. 45 % av antall mulige timer utnyttes av varmegjenvinneren.

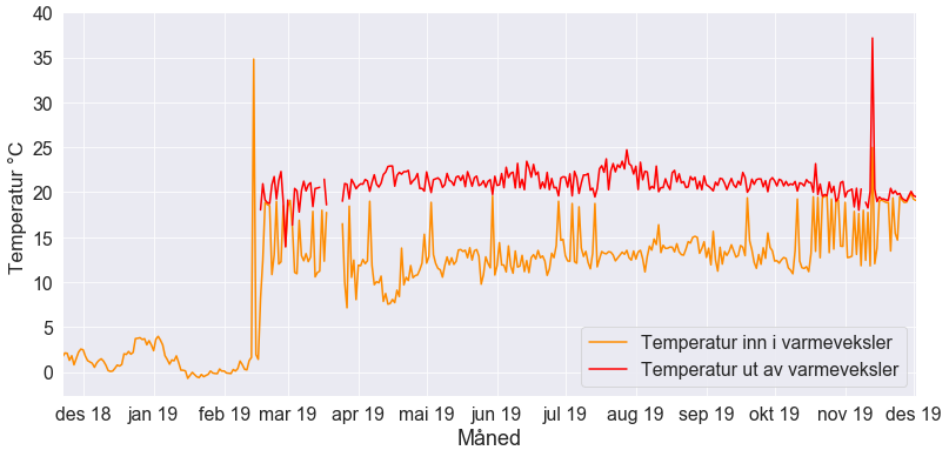
Ønsket tilluftstemperatur for boligtårnene er målt til å være ca. 20 °C, mens målt gjennomsnittlig avtrekkstemperatur fra boligtårnene er ca. 23 °C. Prosjektert virkningsgrad på varmegjenvinneren er 84 %, mens reell virkningsgrad er gjennomsnittlig omtrent 75-80 % for 2018. Med prosjektert luftmengde på 6000 m^3/h, vil beregnet tapt energimengde med installerte ventilasjonsaggregat være ca. 55 MWh/år per ventilasjonsaggregat til hybelarealene i boligtårnene. Temperaturen vil variere gjennom døgnet og det vil være ugunstig for varmebatteriet å bytte mellom varme- og kjølemodus flere ganger i løpet av en dag. Den tapte varmeleveransen til brønnparken vil derfor trolig være lavere en del lavere enn 55 ca. MWh/år per ventilasjonsaggregat til hybelarealene i boligtårnene.

Beregnet varmeleveranse fra varmegjenvinning fra ventilasjonsluft for 2018 er ca. 80 MWh/år. Dette er noe lavere enn målt varmeleveranse til boligtårn E.

Varme fra solfangerene

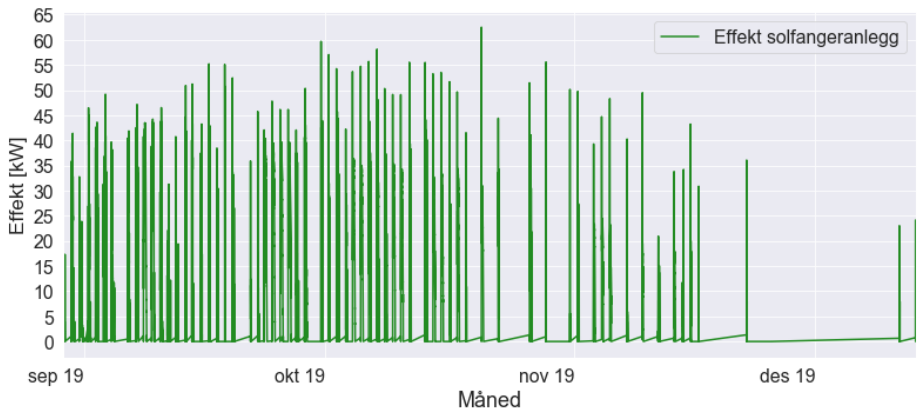
Total varmeleveranse til brønnparken fra solfangererene er 130 MWh. Dette gir en gjennomsnittlig varmeproduksjon på 43 MWh per år.

Figur 5.57 viser målt gjennomsnittlig temperatur inn og ut av varmeveksleren som avgir varme fra solfangeranlegget til froskvæske.



Figur 5.57: Målt gjennomsnittlig temperatur per dag inn og ut av varmeveksleren for overføring av varme fra solfangerne

Målt avgitt varmeeffekt fra varmeveksleren til solfangeranlegget er presentert i figur 5.58. Alle feilmålinger med effekter under 0 kW er fjernet i denne fremstillingen.

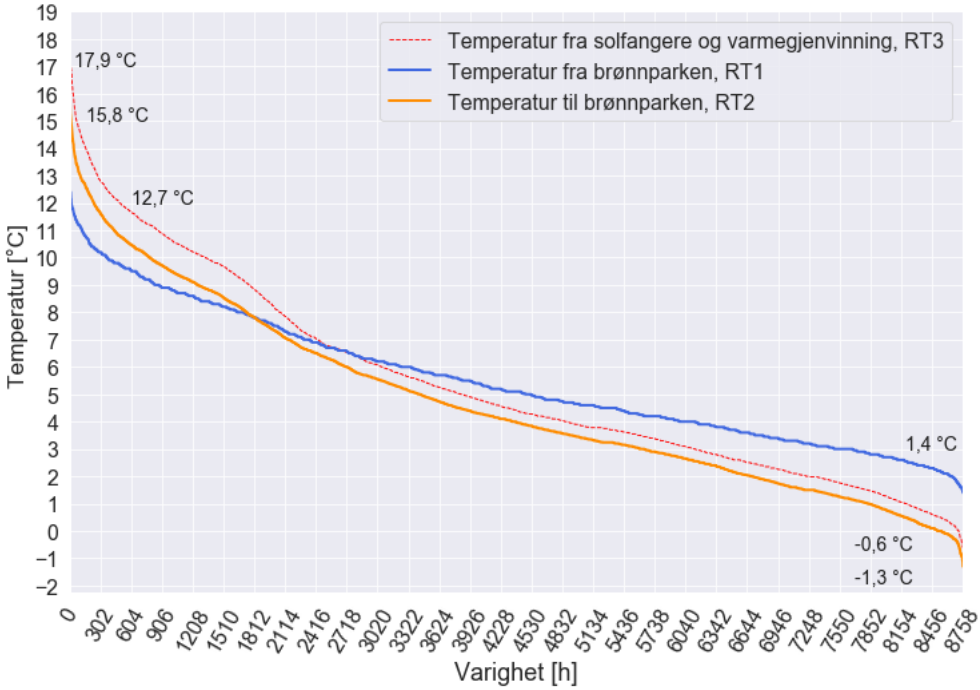


Figur 5.58: Målt avgitt varmeeffekt vekslet i varmeveksleren for solfangeranlegget

Det overføres mest effekt i varmeveksleren for solfangeranlegget i september 2019. Detetter blir det gradvis færre effekttopper. Temperaturen i solfangerkretsen må være over 20 °C for at pumpen i solstasjonen starter og varmen fra solfangerne overføres til frostvæsken. Effekten i solfangeranlegget er størst i sommermånedene og mist i om vinteren.

5.4.5 Temperaturanalyse

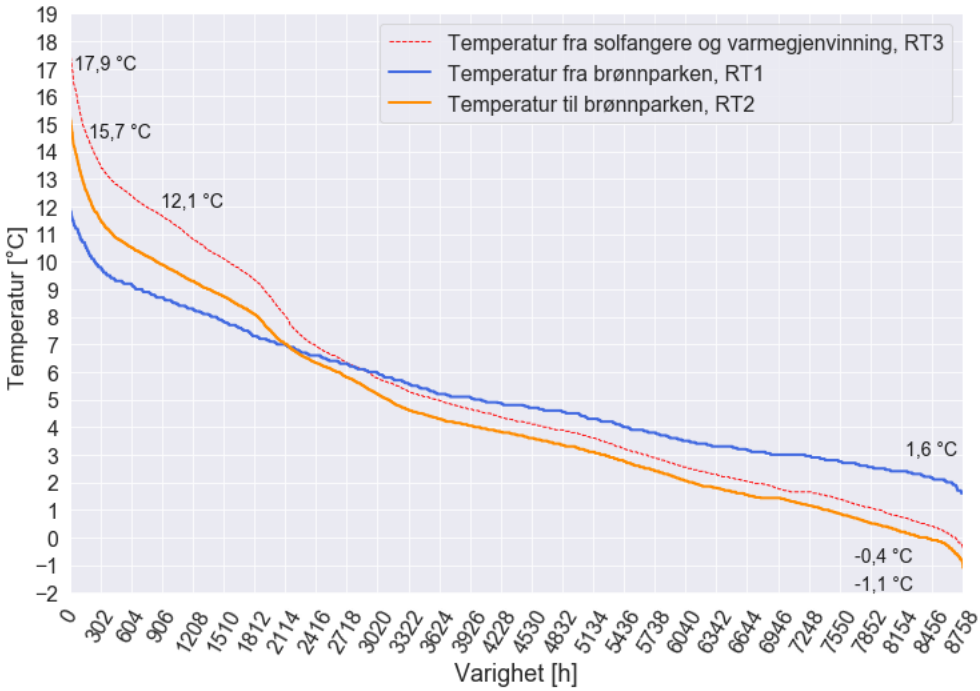
Temperatur varighetskurven for tur- og returtemperaturen i brønnparken i 2018 er presentert i figur 5.59. Det er ingen korrelasjon mellom tur- og returtemperaturene, som er sortert etter fra maksimal til minimal verdi.



Figur 5.59: Temperatur-varighetskurve for tur- og returtemperaturen i brønnparken i 2018

Returtemperaturen til brønnparken, RT2, har temperaturer fra -1,3 °C til 12,7 °C, mens turtemperaturen varierer fra 1,4 °C til 15,8 °C. Returtemperaturen fra solfangerene, varmegjenvinningen fra avløpsvann og ventilasjonsluft ligger i temperaturområdet -0,6°C til 17,9 °C. Temperaturene ligger dermed innenfor temperaturgrensene til HX i-24 som er 20-25 °C.

Temperatur varighetskurven for tur- og returtemperaturen til brønnparken i 2019 er presentert i figur 5.60.



Figur 5.60: Temperatur-varighetskurve for tur- og returtemperaturen til brønnparken i 2019

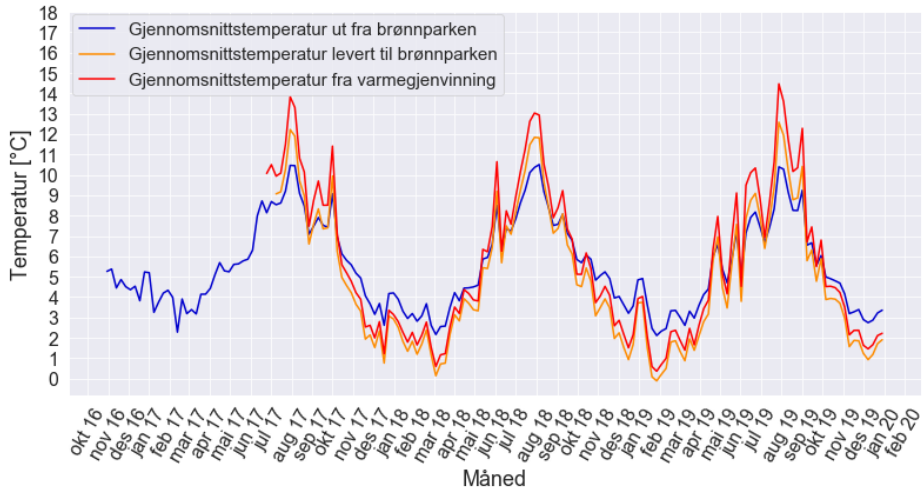
Turtemperaturen fra brønnparken, RT1, er mellom 1,6 °C og 15,7 °C. Laveste turtemperatur er høyere enn i 2018, mens høyeste turtemperatur er lavere enn i 2018. Returtemperaturen til brønnparken, RT2, går fra -1,1 °C til 12,1 °C. Laveste returtemperatur er høyere og høyeste returtemperatur lavere enn tilsvarende temperaturer i 2018. Temperaturen fra solfangerene, varmegjenvinning fra avløpsvann og ventilasjon har en maksimal temperatur på 17,9 °C og har ikke endret seg fra 2018. Den laveste temperaturen er 1,6 °C som er 0,2 °C høyere enn i 2018.

Det er ikke anbefalt en høyere returtemperatur fra brønnparken enn ca. 15 °C. Høy frostvæsketemperatur øker massestrømmen, som igjen fører til øket tilført effekt til kompressorene. For de fleste væske/vann-aggeregater er ikke motoren dimensjonert for høyere varmekildetemperaturer enn 15-20 °C. Ved temperaturer over 15 °C vil motoren kunne slå seg av på motorvernet, grunnet for høy massestrøm. Den høyeste målte temperaturen for 2018 var 12,7 °C.

5.4.6 Temperaturutvikling i brønnparken

Den gjennomsnittlige temperaturen til frostvæsken i brønnparken viser temperaturutviklingen i det termiske energilageret. Samtidig vil den gjennomsnittlige temperaturen fra solfangerne og varmegjenvinning fra avløpsvann og ventilasjonsluft samt gjennomsnittstemperaturen til brønnparken indikere hvor mye varme som tilbakeføres til energilageret.

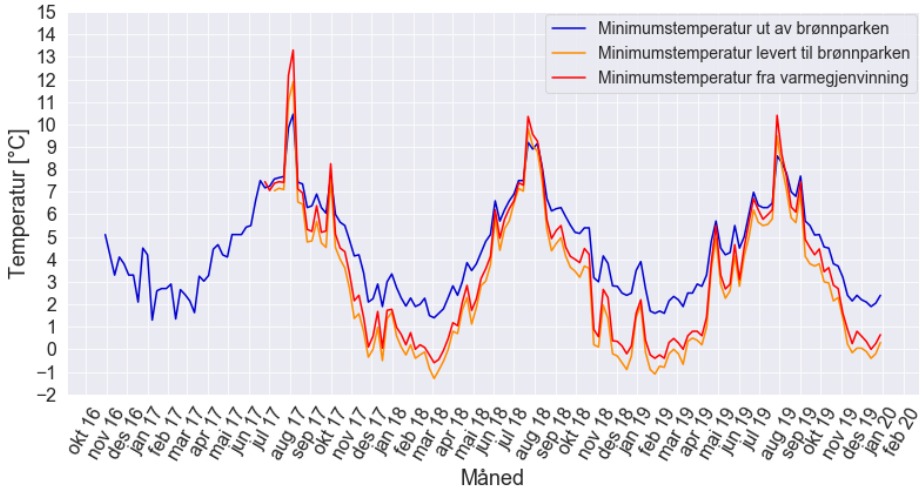
Målt ukentlig temperaturgjennomsnitt for frostvæsken levert til brønnparken, fra brønnparken og levert for frostvæsken levert fra distribusjonsnettet til brønnparken er presentert i figur 5.61. Temperaturen til frostvæsken i distribusjonsnettet levert til brønnparken er temperaturen fra varmegjenvinning fra avløpsvann, varmegjenvinning fra ventilasjonsluft og varme fra solfangeranlegget. Det er valgt å ta et gjennomsnitt per uke for å best mulig kunne presentere resultatene.



Figur 5.61: Målt ukentlig temperaturgjennomsnitt for frostvæsken levert til brønnparken, for frostvæsken fra brønnparken og for frostvæsken levert fra distribusjonsnettet til brønnparken (varmegjenvinning)

Målt gjennomsnittstemperatur ut fra energibrønnene varierer fra ca. 2-11 °C i perioden 2016 til 2019. Varme fra varmegjenvinning og solfangerne har en temperatur mellom ca. 1 °C og 15 °C. I den samme perioden ligger temperaturen på frostvæsken til brønnparken mellom ca. 0-13 °C.

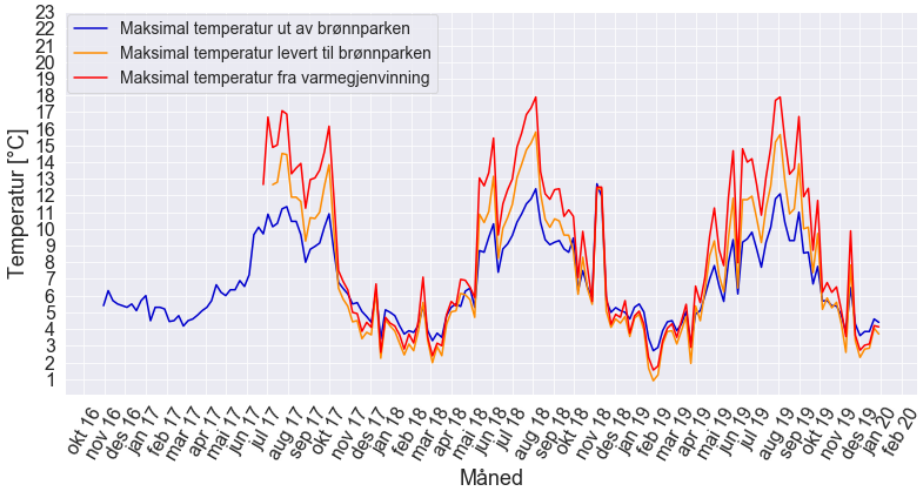
Laveste målte temperatur per uke for frostvæsken til brønnparken, for frostvæsken fra brønnparken og for frostvæsken fra distribusjonsnettet til brønnparken er presentert i figur 5.62.



Figur 5.62: Minste målte temperatur per uke for frostvæsken levert til brønnparken, for frostvæsken fra brønnparken og for frostvæsken levert fra distribusjonsnettet til brønnparken (varmegjenvinning)

Når de laveste temperaturene er plottet, varierer temperaturen ut fra brønnparken fra ca. 1 °C til ca. 11 °C, ikke vesentlig lavere enn gjennomsnittstemperaturen. For varme levert fra varmegjenvinning og solfangerne alternerer temperaturen mellom ca. -1 °C og ca. 13 °C for 2017, og ca. 11 for 2018 og 2019. Varme levert til brønnparken har laveste temperatur på -1 °C og høyeste temperatur på ca. 12 °C for 2017 og ca. 11 °C for 2018 og 2019.

Høyeste temperatur per uke for frostvæsken til brønnparken, frostvæsken fra brønnparken og frostvæsken fra distribusjonsnettet til brønnparken er presentert i figur 5.63.



Figur 5.63: Målt maksimal temperatur per uke for frostvæsken til brønnparken, frostvæsken fra brønnparken og frostvæsken fra distribusjonsnettet til brønnparken (varmegjenvinning)

Den maksimale temperaturen på frostvæsken ut av brønnparken, levert til brønnparken og distribusjonsnettet til brønnparken er henholdsvis ca. 3-13 °C, 1-16 °C og 2-18 °C.

Temperaturen fra varmegjenvinning av avløpsvann, ventilasjonsluft og varme fra solfangerne er høyest i sommermånedene. Det vil være mer varmegjenvinning fra ventilasjonsluft og mer varme produsert av solfangeranlegget i denne perioden sammenlignet vintermånedene, hvor utetemperaturen er lavest. Varme fra varmegjenvinning av ventilasjonsluft og solfangerne vil avhenge av utetemperatur og solforhold. Dette er forhold som vil kunne variere fra år til år.

Distribusjonsnettet til brønnparken kobler seg til varmeopptaksnettet, slik at frostvæsken fra varmepumpeanlegget og frostvæsken fra distribusjonsnettet blandes. Temperaturen til frostvæsken levert til brønnparken vil derfor følge temperaturen distribusjonsnettet til brønnparken, som er temperaturen på frostvæsken fra gråvannsvarmeveksler, varmegjenvinning fra ventilasjonsluft og varme fra solfangeranlegget. Returtemperaturen fra fordamperen er lavere enn temperaturen fra varmegjenvinningen og solfangeranlegget, som fører til en lavere levert temperatur til brønnparken.

I figur 5.61, 5.62 og 5.63 er temperaturene relativt stabile fra år til år, både når det kommer til gjennomsnittstemperaturene og laveste/ høyeste temperatur inn og ut av brønnparken.

Målt gjennomsnittstemperatur for frostvæsken ut fra brønnparken er **ca. 5,8 °C, 5,5 °C og 5,2 °C** for henholdsvis 2017, 2018 og 2019. Målt gjennomsnittstemperatur på frostvæsken levert til brønnparken er **ca. 4,7 °C og 4,5 °C** for henholdsvis 2018 og 2019. Den gjennomsnittlige målte temperaturen på frostvæsken fra distribusjonsnettet til brønnparken eller fra

varmegjenvinning fra avløpsvann, ventilasjon og varme fra solfangerne er **ca. 5,4 °C og 5,3 °C** for henholdsvis 2018 og 2019. Målt månedlig temperaturgjennomsnitt for frostvæsken fra brønnparken, frostvæsken til brønnparken og frostvæsken til distribusjonsnettet er presentert i Vedlegg K.

Målt gjennomsnittlig temperatur per måned viser at temperaturen på frostvæsken fra brønnparken sank med 0,3 °C fra 2017 til 2018 og 0,3 °C fra 2018 til 2019. Fra 2018 til 2019 ble den gjennomsnittlige temperaturen for frostvæsken levert til brønnparken og fra distribusjonsnettet til brønnparken redusert med 0,1 °C hver. Dette indikerer en svakt synkende temperatur i brønnparken og levert varmemengde til brønnparken.

5.4.7 Simuleringer i Earth Energy Designer (EED)

For å gjøre en videre analyse av temperaturutviklingen i energibrønnene, er brønnparken simulert i Earth Energy Designer (EED). EED er et dataprogram designet for analyse av varmeutveksling og temperaturutvikling i vertikale borehull i fjell (Blocon AB, 2019).

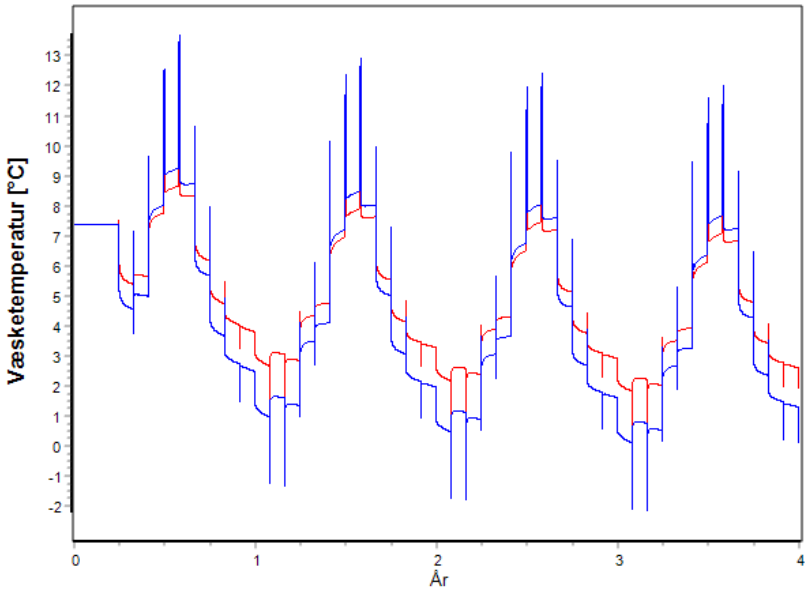
Energibrønnenes temperaturutvikling med ulike verdier for varmeleveranse og verdier for tilbakeføring av varme til brønnparken er viktig for å se om temperaturen i brønnparken synker under temperaturkravet for frostvæsken (HX i-24) på - 10 °C. Samtidig vil en lavere temperatur fra brønnparken gi et høyere temperaturløft og resulterende lavere gjennomsnittlig effektfaktor.

Målte verdier for varmeleveranse og tilført varmeleveranse fra henholdsvis 2018 og 2019 er brukt som inndata i den første simuleringene i EED. Da det er usikkerhet i faktisk tilbakeført varme til brønnparken er det gjort simuleringer med estimerte verdier for kjøleleveransen. Dette øker tilbakeført varme til brønnparken fra ca. 340 MWh i året til ca. 510 MWh i året. Grunn- og topplast er beregnet og estimert fra målinger fra varmeleveranse, tilført varmeleveranse til brønnparken fra varmegjenvinning fra avløpsvann, ventilasjonsluft og varme fra solfangeranlegget. Varmeuttaket fra brønnparken er basert på varmeleveranse fra varmepumpeanlegget for 2019 og er ca. 1050 MWh/år.

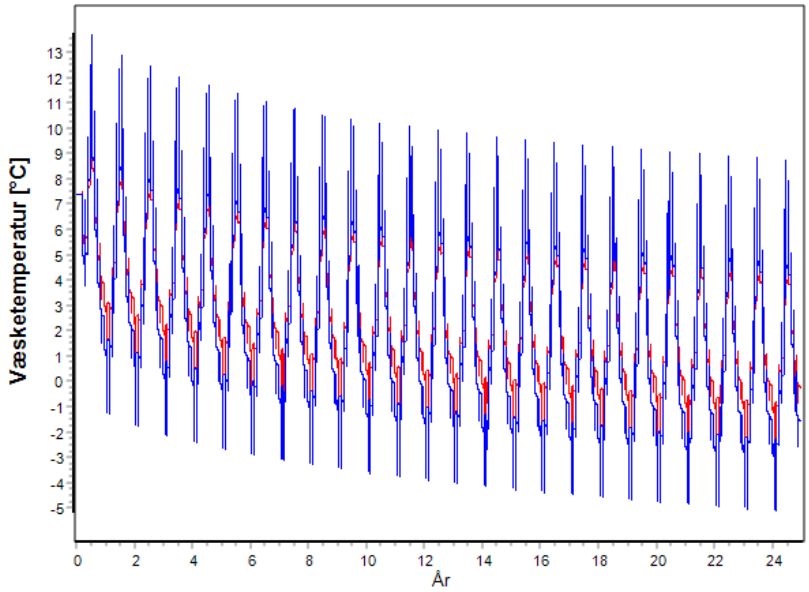
Vedlegg R presenterer brønnparkens berggrunn, borehullkonfigurasjon og inndata for de ulike simuleringene gjort i dette kapittelet.

Simuleringer med målt tilbakeføring av varme til brønnparken

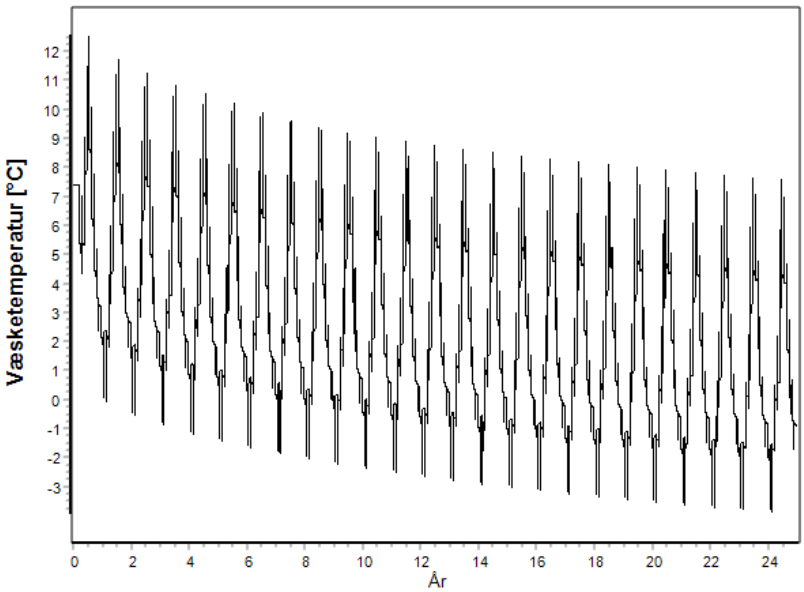
Temperaturutviklingen i brønnparken for en 4 års periode med bruk av målte verdier for varmeleveranse og målte verdier for tilført varmeleveranse til brønnparken, er presentert i figur 5.64. For en simuleringsperiode på 25 år er minimal- og maksimalt og gjennomsnittlig temperaturutvikling presentert i henholdsvis figur 5.65 og 5.66.



Figur 5.64: Temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 4 år. I simuleringen er det brukt målte inndata for kjøleleveransen.



Figur 5.65: Temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 25 år. I simuleringen er det brukt målte inndata for kjøleleveransen.

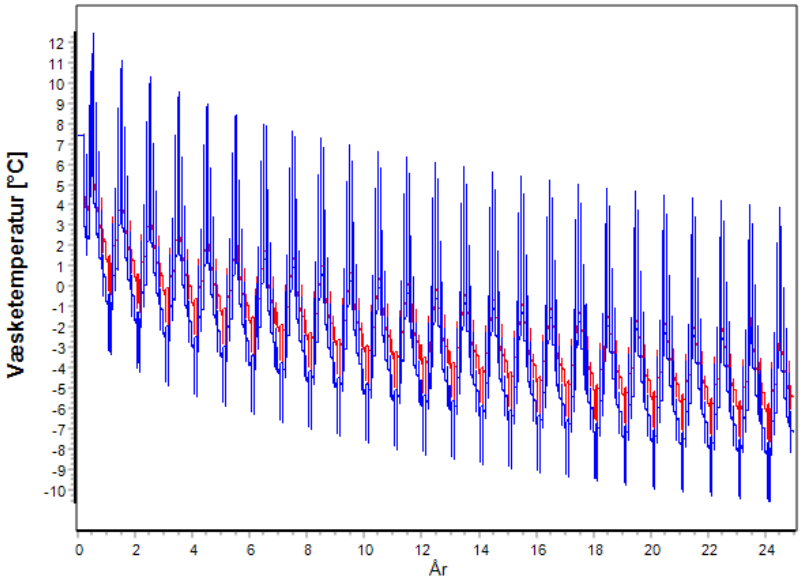


Figur 5.66: Gjennomsnittlig temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 25 år. I simuleringen er det brukt målte inndata for tilbakeføring av varme.

Simuleringen for en 4-års periode med målte verdier for tilført varmeleveranse viser en lavere minimumstemperatur enn målinger av den gjennomsnittlige brønnparktemperaturen presentert i kapittel 5.4.6. Maksimal temperatur i målingen er ca. 14 °C, mens den gjennomsnittlige temperaturen fra brønnparken er ca. 13 °C. Avviket på minimal- og maksimaltemperaturene mellom simulering og måling er på henholdsvis ca. 2 °og ca. 1 °C. Målte verdier er gjennomsnittlig temperatur per uke.

Ved simulering av temperaturutviklingen for en periode på 25 år synker den maksimale og minimale temperaturen med ca. 4 °C, som gir en minimaltemperatur på ca. -5 °C. Gjennomsnittlig temperaturutvikling for brønnparken over en 25 års periode viser en reduksjon i gjennomsnittlig temperatur på ca. 3,5 °C. Dette fører til at laveste gjennomsnittlig temperatur i brønnparken vil være -3,5 °C. Dette er innenfor frostvæskens temperaturbegrensninger.

Figur 5.67 viser temperaturutviklingen uten tilbakeført varme til brønnparken.



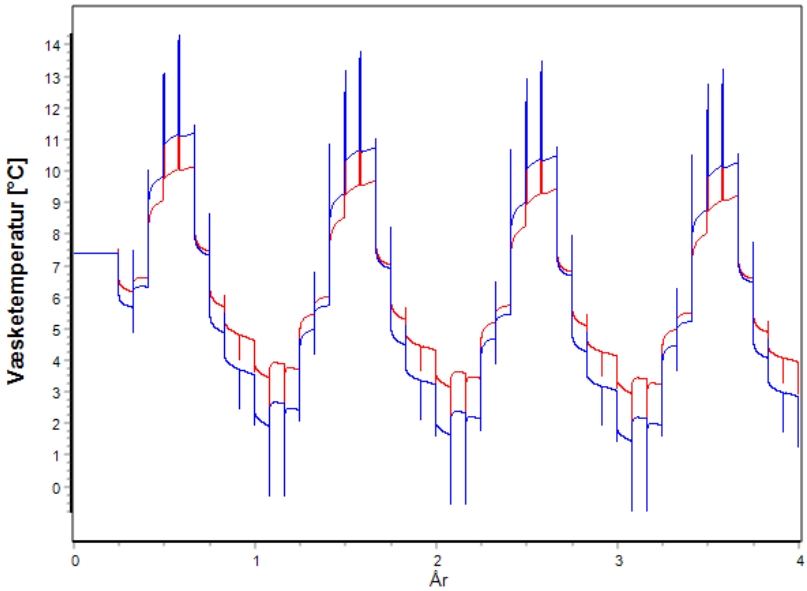
Figur 5.67: Temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 25 år uten tilbakeføring av varme til brønnparken

Uten tilbakeføring av varme til brønnparken vil laveste temperatur i energibrønnene synke til ca. -10 °C. Dette er under laveste anbefalte temperatur for denaturert etanol med 24%-blanding. Samtidig vil det føre til et høyere temperaturløft for varmepumpeaggregatene, og derfor en lavere gjennomsnittlig effektfaktor. Ved å øke antall energibrønner i brønnparken vil brønnparken få en mindre synkende temperaturutvikling. Simuleringen viser derfor fordelen ved tilbakeføring av varme til energibrønnene.

Simuleringer med estimert tilbakeføring av varme til brønnparken

Total varmeleveranse fra varmegjenvinning fra ventilasjonsluft er usikker, da det bare er gjort målinger på boligtårn E. Simuleringer med estimert varmeleveranse for varmegjenvinning av ventilasjonsluft er gjort for å se potensiell temperaturutvikling i brønnparken ved det som er estimert varmeleveranse til brønnparken.

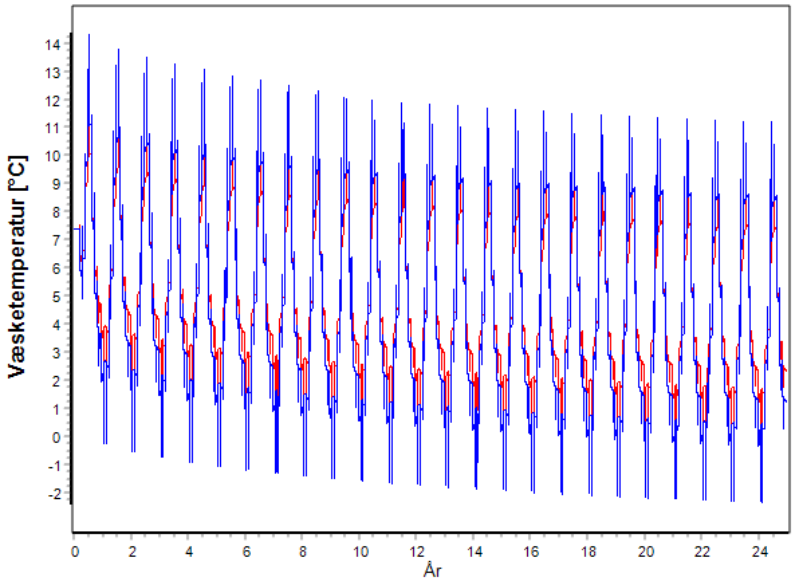
Simulert temperaturutvikling i brønnparken i løpet av 4 år for estimerte verdier for tilbakeføring av varme til brønnparken er presentert i figur 5.68.



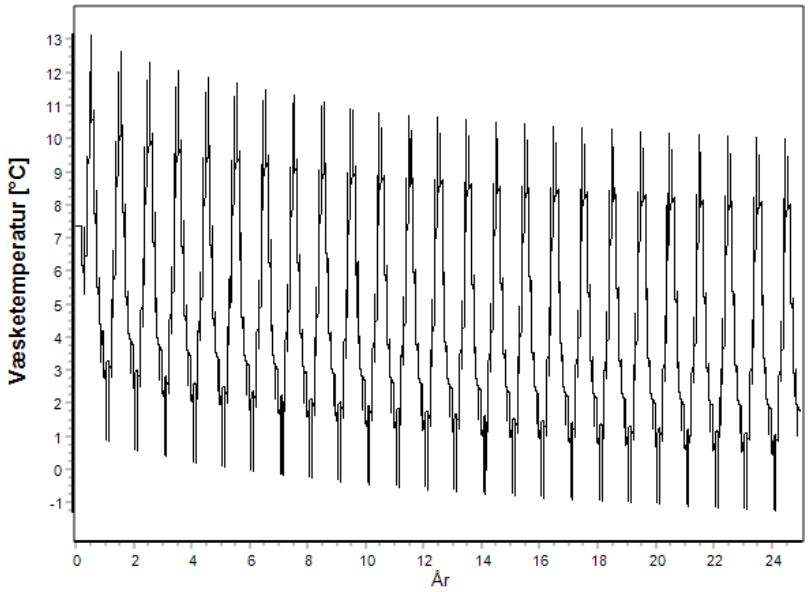
Figur 5.68: Temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 4 år. I simuleringen er det brukt estimerte inndata for tilbakeføring av varme.

Simulert temperaturutvikling for en 4 år med estimerte verdier for tilført varme til brønnparken viser en høyere minimal- og maksimaltemperatur sammenlignet med temperaturutviklingen med målte verdier for tilført varme.

Den simulerte temperaturutviklingen for en 25 års periode er presentert i figur 5.69 og den gjennomsnittlige temperaturutviklingen i figur 5.70.



Figur 5.69: Temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 25 år. I simuleringen er det brukt estimerte inndata for tilbakeføring av varme.



Figur 5.70: Gjennomsnittlig temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 25 år. I simuleringen er det brukt estimerte inndata for tilbakeføring av varme.

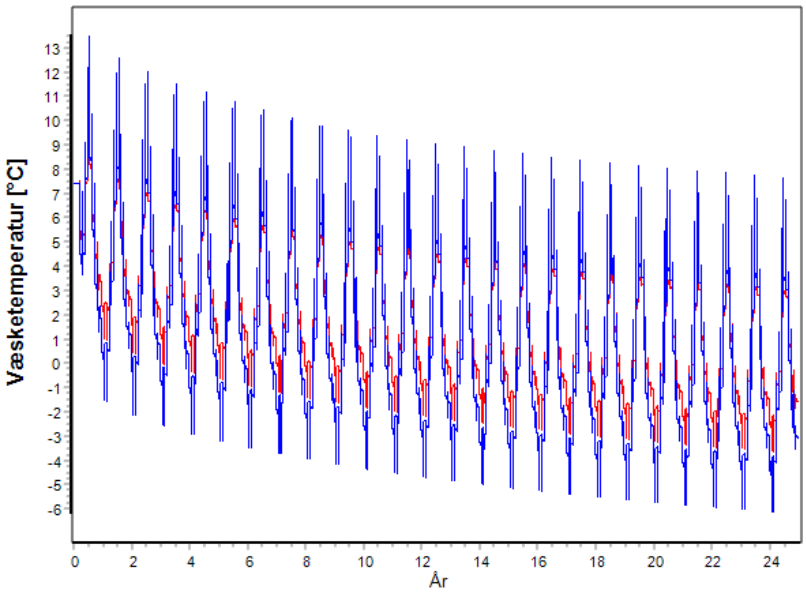
Den maksimale temperaturen er ca. 14 °C og synker til omtrent 12 °C, mens den minimale temperaturen er omtrent 0 °C og synker til omtrent -2 °C. Det tilbakeføres mer varme til brønnparken for den estimerte varmeleveransen og temperaturutviklingen er derned mindre avtagende enn for den målte tilbakeføringen. Middeltemperaturen synker med omtrent 2 °C.

Estimerte verdier for tilbakeføring av varme til brønnparken har relativt liten temperaturutvikling i løpet av 25 åt. Den lavere temperaturreduksjonen i brønnparken gir et mindre temperaturløft for varmepumpeaggregatene, og dermed en bedre gjennomsnittlig effektfaktor, sammenlignet med målte verdier for tilbakeføring.

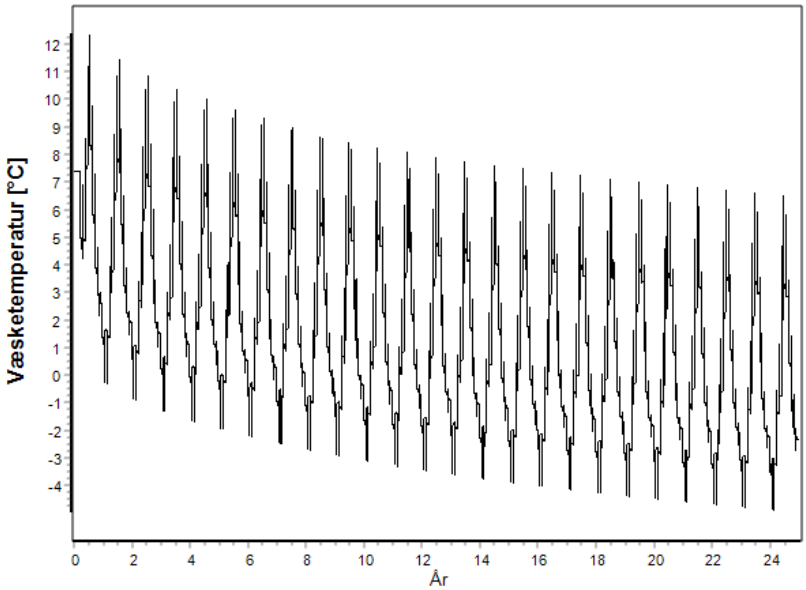
Simuleringer med stipulert varmeleveranse til HK21

Varmeleveransen til forvarming av varmt tappevann til HK21 er stipulert til å være 230 MWh/år. I 2019 var varmeleveransen til forvarming av tappevann kun 125 MWh/år. Total varmeleveranse fra varmesentralen vil derfor høyst sannsynlig øke fra ca. 1050 MWh/år til ca. 1160 MWh/år i fremtidig drift. Det er derfor simulert med verdier for forventet varmeuttak for brønnparken for å se temperaturutviklingen.

Temperaturutviklingen i brønnparken med grunnlast på 1160 MWh/år og målt tilbakeføring av varme på 340 MWh/år for 25 år er presentert i figur 5.71. Gjennomsnittlig temperaturutvikling for en 25 års periode er presentert i figur 5.72.



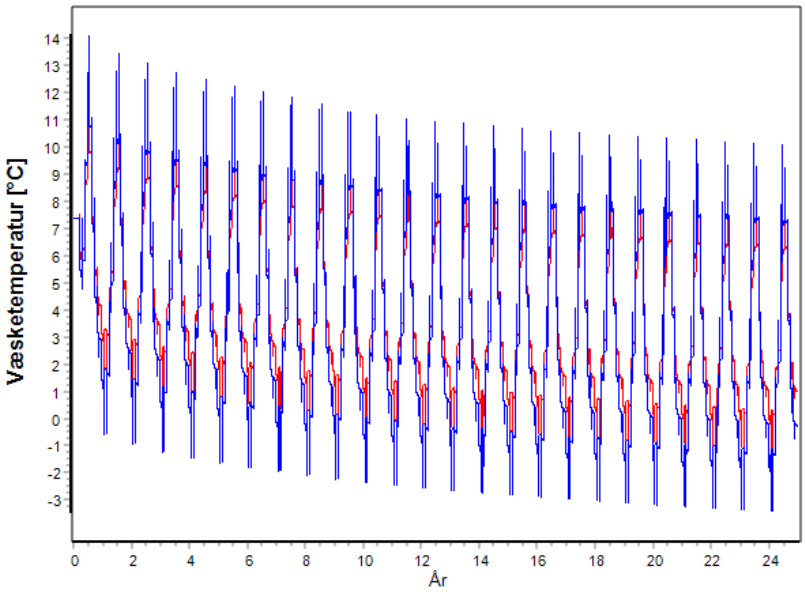
Figur 5.71: Temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 25 år. I simuleringen er det brukt målte inndata for tilbakeføring av varme og stipulert varmeleveranse til HK21 .



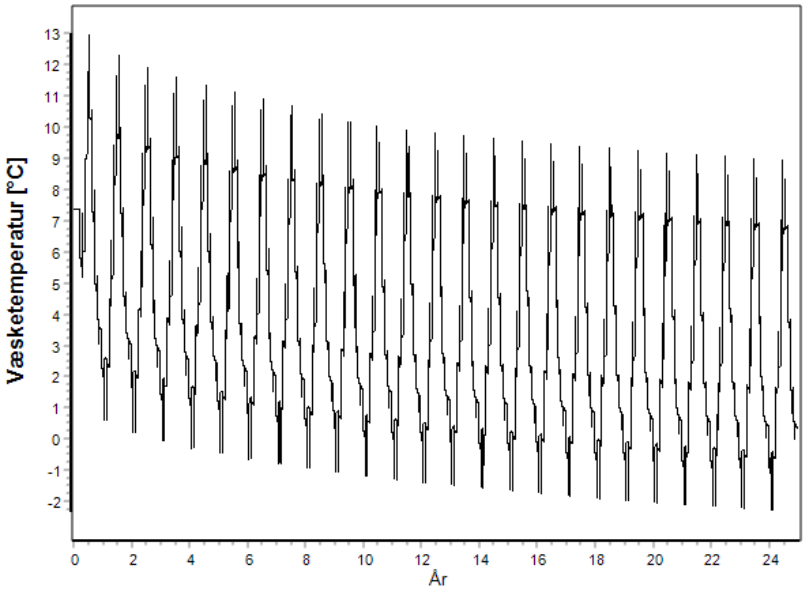
Figur 5.72: Gjennomsnittlig temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 25 år. I simuleringen er det brukt målte inndata for tilbakeføring av varme og stipulert varmeleveranse til HK21.

Simuleringer med stipulert varmeleveranse til HK21 fører til et større varmeuttak og en lavere temperatur i brønnparken. Temperaturen synker med ca. 5,5 °C, med en minimal temperatur på -6 °C etter 25 år. Den gjennomsnittlige temperaturen synker fra ca. 12 °C og ca. 0 °C til henholdsvis ca. 6,5 °C og ca. -4,5 °C.

Temperaturutviklingen i brønnparken med en grunnlast på 1160 MWH/år og ved estimert tilbakeføring på 510 MWh/år for 25 år er presentert i figur 5.73. Gjennomsnittlig temperaturutvikling for en 25 års periode er presentert i figur 5.74.



Figur 5.73: Temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 4 år. I simuleringen er det brukt estimerte inndata for tilbakeføring av varme og stipulert varmeleveranse til HK21.



Figur 5.74: Gjennomsnittlig temperaturutviklingen for brønnparken i løpet av 25 år. I simuleringen er det brukt målte inndata for tilbakeføring av varme og stipulert varmeleveranse til HK21.

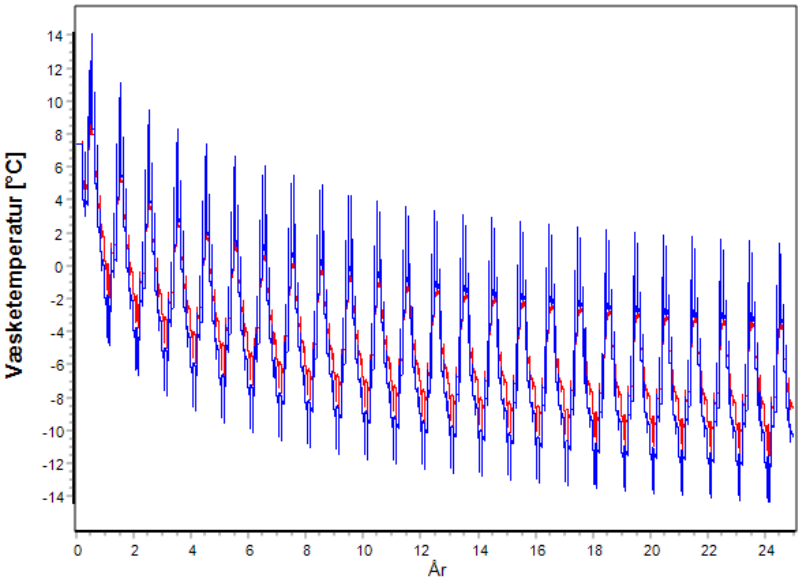
Temperaturen i brønnparken etter 25 år synker i mindre grad med estimerte verdier for tilbakeføring av varme til brønnparken enn ved målt varmeleveranse. Dette fører til en høyere min. og maks. temperatur, på henholdsvis -3 °og 10 °C. Middeltemperaturen synker omtrent 2,5 °C, til -2 °C.

Ved økt varmeuttak fra brønnparken vil temperaturen i brønnparken synke med ca. 5,5 °C og ca. 2,5 °C for henholdsvis målt og estimert tilbakeføring av varme til brønnparken. Temperaturen er likevel ikke under eller temperaturgrensene for denaturert etanol (HX i-24). Men ved en lavere temperatur i brønnparken vil den gjennomsnittlige effektfaktoren synke.

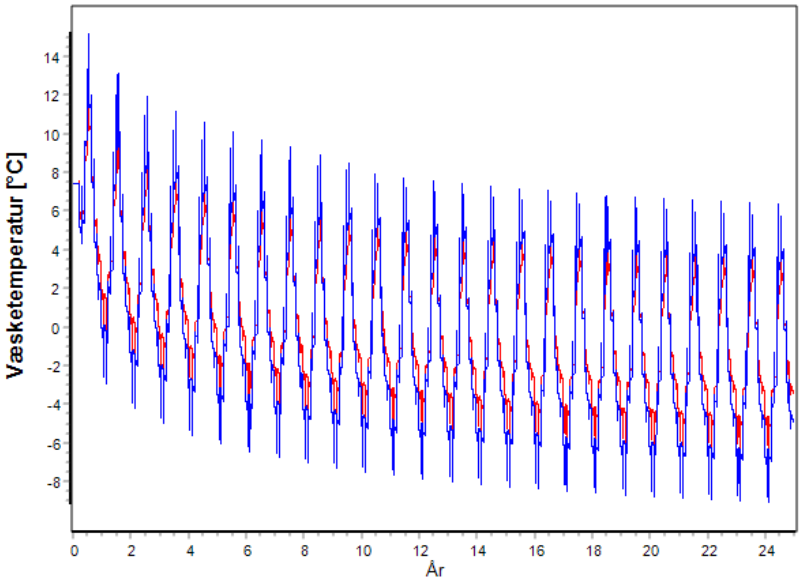
Simuleringer med en kompakt borehullkonfigurasjon

Brønnparken for det termiske energisystemet er et termisk lager med en relativt utstrakt borehullkonfigurasjon. I denne simuleringen er borehullkonfigurasjonen endret til en mer kompakt rektangulær konfigurasjon for å undersøke om antall energibrønner kan reduseres. Det er kun mulig å bruke forhåndsdefinerte mønstre i EED og valgt konfigurasjon med 20 borehull på ca. 250 meter i 4 x 5 rekker. Avstanden mellom hvert borehull er 5 meter, og er den minste borehullavstanden i EED.

Grunnlasten for varmeleveranse er satt til 1160 MWh/år og tilbakeført varme til brønnparken er 340 MWh/år for målte verdier og 510 MWh/år for estimerte verdier. Temperaturutviklingen i brønnparken for 25 år for målte verdier og estimerte verdier er presentert i henholdsvis figur 5.75 og 5.76.



Figur 5.75: Temperaturutvikling i løpet av 25 år for en kompakt brønnpark med målt tilbakeføring av varme



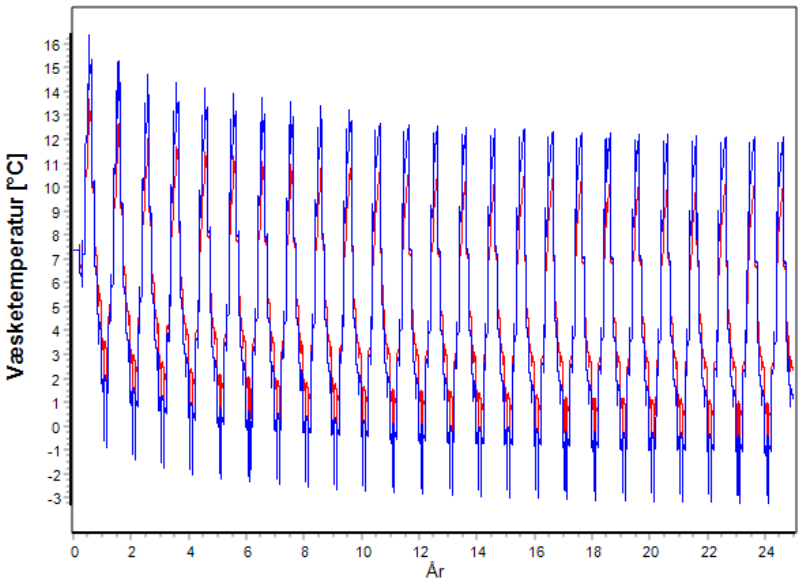
Figur 5.76: Temperaturutvikling i løpet av 25 år for en kompakt brønnpark med estimert tilbakeføring av varme.

Temperaturutviklingen for målte verdier for tilbakeføring av varme synker ca. -9 °C, fra ca. -2 °C til ca. -14 °C. Høyeste temperatur synker fra ca. 14 °C og synker til ca. 3 °C. Anbefalt temperaturgrense for denaturert etanol (HX i-24) er -10 °C, da dette er frysepunktet for frostvæsken. Simuleringen med estimerte verdier for tilbakeføring av varme til brønnparken viser at temperaturen synker i mindre grad enn for simuleringen med målte og lavere varmeleveranse til brønnparken. Temperaturen synker fra ca. -2 °C til ca. -8 °C.

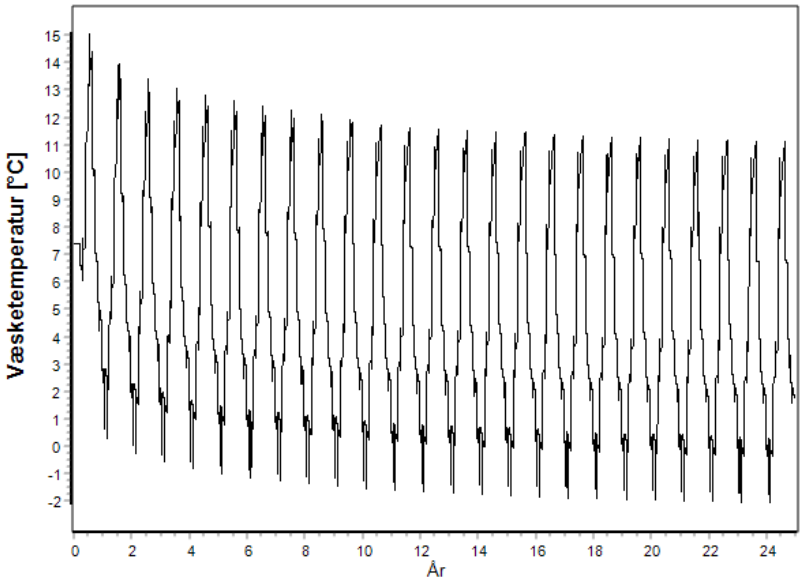
EED-simuleringen viser at en mer kompakt brønnpark ikke vil være hensiktsmessig ved dagens totale varmebehov og totale varmeleveranse tilbake til brønnparken, da temperaturutviklingen er sterkt negativ både for målte og estimerte verdier av tilbakeført varme. Dette er høyst sannsynlig fordi det tilbakeføres for lite varme til energibrønnene, som fører til at varmeuttaket blir høyere enn varmeoverføringen fra omkringliggende fjell.

Hvis varmeuttaket er for høyt og det er for lite varmeoverføring fra omkringliggende fjell, kan økt varmeleveranse tilbake til brønnparken føre til en bedre temperaturutvikling i energibrønnene. Med prosjekterte verdier for varme fra solfangere og ventilasjonsaggregater med temperaturgrense på 7 °C ville en større andel varme blitt tilført brønnparken. Ved å estimere en økt varmeleveranse til brønnparken på ca. 200 MWh/år, ville den totale tilbakeføringen vært ca. 700 MWh/år.

Temperaturutviklingen i den kompakte borehullkonfigurasjonen med 700 MWh/år tilført varme til brønnparken er presentert i figur 5.77. Middeltemperaturen er presentert i figur 5.78.



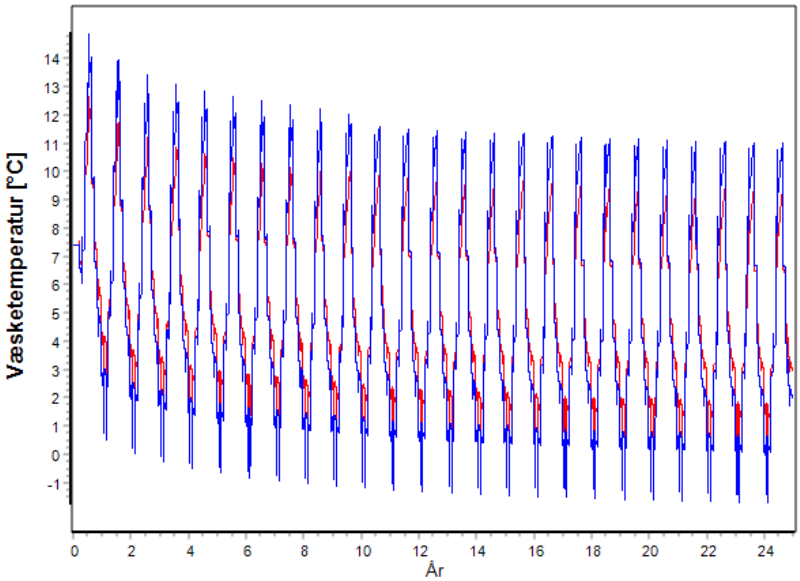
Figur 5.77: Temperaturutvikling i løpet av 25 år for en kompakt brønnpark med mer tilbakeføring av varme.



Figur 5.78: Gjennomsnittlig temperaturutvikling i løpet av 25 år for en kompakt brønnpark med mer tilbakeføring av varme.

Med en tilbakeføring av varme på ca. 700 MWh/år er temperaturutviklingen i det kompakte termiske energilageret stabil, hvor temperaturen synker omtrent 3 °C i løpet av 25 år. Laveste temperatur i brønnparken etter 25 år er -3 °C og høyeste temperatur er 13 °C. Middeltemperaturen synker omtrent 2 °C, med laveste temperatur på -2 °C etter 25 år. Høyeste temperatur i brønnparken er anbefalt til å være under 15 °C. I de første årene av simuleringen er temperaturen over 15 °C.

Simuleringen viser at for en brønnpark med like forhold som Moholt 50|50 vil en mer kompakt borehullkonfigurasjon med 3 færre energibrønner føre til lavere temperaturforhold enn ved dagens borehullkonfigurasjon. Simuleringer med samme rektangulære borehullkonfigurasjon med 24 energibrønner er presentert i figur 5.79. En slik konfigurasjon med 23 borehull er ikke definert i EEDs predefinerte borehullskonfigurasjonsliste.



Figur 5.79: Temperaturutvikling i løpet av 25 år for en kompakt brønnpark med 24 borehull og mer tilbakeføring av varme.

Ved flere antall energibrønner viser simuleringen en relativt stabil temperaturutvikling for brønnparken. Temperaturen synker med omtrent 1,5 °C og gir like driftsforhold for varmepumpeanlegget som ved varmeuttak for 2019 og estimert varmeleveranse. Ved en mer kompakt brønnparkkonfigurasjon må det tilbakeføres mer varme for å holde en relativt stabil temperatur i brønnparken.

Kapittel 6

Konklusjon

I dette kapittelet vil målinger og analyser sammenfattes for å trekke en felles konklusjon basert på individuelle funn i måle- og analysedelen. Valgt systemutforming med alle komponenter og delsystemer i det termiske energisystemet vil påvirke hverandre og hvordan energisystemet fungerer i drift.

Systemløsningen med varmepumpeanlegg som bruker energibrønner i fjell som varmekilde, samtidig som det tilbakeføres varme fra tre ulike kilder er en god og innovativ løsning da dette reduserer antall energibrønner i brønnparken. Solfangeranlegget bidrar med lite tilbakeføring av varme til brønnparken, sammenlignet med gråvannsvarmeveksleren og varmegjenvinning av ventilasjonsluft. Totalt er varmeleveransen fra både gråvannsvarmeveksleren og solfangeranlegget ca. 7 % høyere enn prosjektert. Varmeleveranse fra varmegjenvinning av ventilasjonsluft er relativt lav, men estimert varmeleveranse viser mer varme tilbakeført brønnparken.

Den totale varmeleveransen til studentbyen for 2019 avviker kun med ca. 2 % fra prosjektert varmebehov som er basert på verdier fra lignende anlegg. Varmebehovet til varmtvannsberedning er den største posten og har et lavt gjennomsnittlig avvik på ca. 10% fra prosjekterte verdier. Dette viser fordelen ved å bruke måledata fra lignende anlegg til å prosjektere varmebehov. Varmeleveransen til oppvarming av ventilasjonsluft og snøsmelting har store avvik fra prosjekterte verdier, mens det totale avviket blir svært lavt på grunn av varmeleveransen til forvarming av varmt tappevann for HK21.

Brønnparken har en utstrakt borehullkonfigurasjon med en lavt synkende temperaturutvikling ved estimerte verdier for tilbakeføring av varme fra ventilasjonsluft. Simuleringer av temperaturutviklingen i brønnparken viser at temperaturen vil synke omtrent 2 °C i løpet av 25 år. Varmeleveransen til HK21 ved stipulerte verdier vil føre til et større varmeuttak enn for 2019, og vil føre til at temperaturen synker ytteligere i brønnparken. En mer

kompakt brønnpark fører til at varmeuttaket tas fra et mer konsentrert område, og for å oppnå stabile forhold i energibrønnene er det nødvendig med mer tilbakeføring av varme til brønnparken.

Mange start/stopp og to kompressorhavari, samt bytte av alle 6 kompressorene i varmepumpeaggregatene i løpet av 2019 har ført til en lav SCOP-verdi på 2,8 for varmeleveranse og 3,4 inkludert kjøleleveranse. Disse verdiene inkluderer energiforbruk til kompressorene, samt brønn- og sirkulasjonspumpene. Dette fører til en energisparing på ca 65 % for kun varmeleveranse. Kompressorhavariene og kompressorbyttet førte også til en lavere energidekningsgrad til varmepumpeanlegget, som var 98 % i 2019.

Kompressorene i varmepumpeaggregatene er scrollkompressorer med på/av-regulering. Hver kompressor har mange start/stopp per time som fører til økt slitasje og redusert levetid. Turtallsregulerte kompressorer (VSD-regulering) har svært høy virkningsgrad og reguleres fra ca. 15 % til 100 % som reduserer antall start/stopp og fører til en jevnere drift og økt levetid for kompressorene.

Kollektorslangene i energibrønnene er glattrørskollektorer. Turbokollektorer er en økonomisk dyrere investering, men gir langt bedre varmeoverføring og lavere trykktap som vil redusere pumpearbeidet for brønnpumpen. Dette bidrar til en høyere SCOP-verdi og turbokollektorer ville vært et bedre valg med tanke på investeringskostnader.

Boligtårnene og barnehagen har dårlig akkumulering til varmtvannsberederene med varierende temperaturer i varmeste tank og nær nettvannstemperatur i kaldeste tank i flere perioder. I barnehagen slår elkolben inn opp til flere ganger hver dag for å heve temperaturen i siste tank til nær settpunkt. Boligtårn D har en bedre akkumulering og en jevnere temperatur i første og siste varmtvannstank, samtidig er det den eneste undersentralen i det termiske energisystemet som har installert to motorstyrte ventiler for regulering av akkumulering og temperaturnivå. En temperaturføler burde vært installert i varmedistribusjonsnettet ut til bygningene for å vite nøyaktig temperatur på varmeleveransen ut av undersentralen. Dette ville forsikret at det leveres varme på omtrent 50 °C.

Kapittel 7

Videre arbeid

I dette kapittelet er forlag til videre arbeid presentert:

- **Analyse av luftmengder og varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft**
  Undersøke årsaken til den lave varmeleveransen til oppvarming av ventilasjonsluft, samt variasjonene i luftmengde levert til hybelarealene i de ulike boligtårnene. Dette vil være interessant for å få avdekket årsaken til de lave varmeleveransene til oppvarming av ventilasjonsluft og potensiell nytteverdi til prosjektering av lignende systemer i fremtiden.

- **Undersøke SCOP-verdi i et normalt driftsår**
  Undersøke SCOP-verdiene til varmepumpeanlegget i et driftsår uten kompressorhavari, kompressorbytte eller andre tekniske problemer. Dette er interessant for å se om den relativt lave SCOP-verdien skyldes driftsproblemer eller avdekke andre årsaker.

- **Undersøke akkumuleringen til varmtvannsberederne**
  Å lære mer om tekniske anlegg og nytteverdien ved prosjektering av lignende systemer vil det være interessant å få avdekke årsak eller hvordan akkumuleringsproblemene kan løses. Det anbefales derfor å gjøre en videre undersøkelse av akkumuleringen til varmtvannsberederene.

- **Andre systemløsninger**
  Det anbefales å undersøke valg av andre systemløsninger, som for eksempel CO_2-varmepumper i hvert boligtårn for varmeleveranse til varmtvannsberedning. Ytelse av et slikt varmepumpeanlegg og kostnadsanalyse sammenlignet med det termsike energisystemet ved Moholt 50|50 vil være interessante tema for videre analyse.

Bibliografi

AF Gruppen, 2015a. Energibrønner og rørnett ved Moholt 50—50.

AF Gruppen, 2015b. Prosjektert varmeleveranse til brønnparken.

AF Gruppen, 2015c. Utvendig rørnett, Moholt 50—50. Tech. rep.

AF Gruppen, 2016. Funksjonsbeskrivelse Moholt 50—50. Tech. rep.

Amble, A. K., Hammer Harald, Stene, J., Schmedling, P. F., 2018. 2018 - Sporveien. Ryen Verksted energiutredning, konseptutredning mht. termisk og elektrisk energi. Tech. rep., COWI.

Andersson, O., Rydell, L., Algotsoon, T., 2009. Efficient usage of waste heat by applying a seasonal energy storage (BTES) at ITT Water & Wastewater AB, Emmaboda, Sweden. EffStock Conference.
URL http://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_11_1_Case%20studies_Overviews/101.pdf

Apurgo AS, 2019a. Apurgo M3-system.
URL https://apurgo.no/apurgo%5C-m3/

Apurgo AS, 2019b. Apurgo M3-system.
URL https://apurgo.no/apurgo%5C-m3/

Arnevik, S., Rasalingam, I., Kjos-Hanssen, H., 2018. Varmegjenvinning fra avløspvann på Moholt studentby.

Axis Industries, 2019. Ultrasonic heat meater SKU-4.
URL http://www.tepso.ee/failid/File/2013/SKU%204%20-%20MID.pdf

Båsum Boring AS, 2019. En miljøvennlig etanolbasert kuldebærer for varmepumper.
URL https://basum.no/wp-content/uploads/HX_brosjyreark-1.pdf

Badger Meter Europe, 2019. Electromagnetic amplifier type ModMAG M1000 for all detectors.

Bauer, D., Marx, R., Nußbicker-Lux, J., Ochs, F., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H., 2010. German central solar heating plants with seasonal heat storage. Solar Energy 84 (4), 612–623.

Blocon AB, 2019. EED – Earth Energy Designer.
URL https://buildingphysics.com/eed-2/#

Carrier, 2012. 61WG/30WG 020-090 Pro-Dialog+ Control.
URL https://geoconcept.hu/wp-content/uploads/2015/09/30wg_61wg_CONTROL_02_2012.pdf

Carrier, 2013. AquaSnapTM Water to Water Scroll Heat Machine. Tech. rep.

Drammen Eiendom KF, 2019. Fjell 2020 - Geo Termos.
URL http://cger.no/doc/pdf/presentations%20GeoEnergi2019/5%20februar/05-Foredrag%20%20GeoTermos%2006.02.19%20%20Bergen%20.pdf

Drammen Kommune, 2019. 1. tertialrapport 2019 Drammen Kommune.
URL https://www.drammen.kommune.no/globalassets/dokumenter/om-drammen-kommune/tertialrapporter/1.-tertial-2019/1-tertialrapport-2019.pdf

Eggen, G., 2019. Måledata Trondheim. Tech. rep., COWI.

Enova, 2008. Energieffektiv belysning i yrkesbygg Innhold.
URL https://www.enova.no/upload_images/E7734DE6D3B047B6AF1E2B4656ADE508.pdf

Enova, 2015. Innovative nybygg og fornybar energi til Moholt studentby.
URL https://www.enova.no/om%5C-enova/om%5C-organisasjonen/teknologi%5C%5Cportefoljen/innovative/-nybygg%5C-og%5C-fornybar%5C-energi%5C-til%5C-moholt%5C-studentby/

Enova SF, 2017. Enovas Byggstatistikk 2017.

Enova SF, 2018. Graddagstall 2018.
URL http://presse.enova.no/news/ny-byggstatistikk-og-nye\-graddagstall-er-ute-358849

Entro Energi AS, 2000. Måledata Trondheim. Tech. rep.

IPU, 2019. CoolPack.
URL https://www.ipu.dk/products/coolpack/

IWMAC AS, 2019a. SD-Anlegg.
URL https://www.iwmac.net/operation-center/

IWMAC AS, 2019b. Toppsystem.
URL https://www.iwmac.com/no/product/toppsystem/

Kampstrup, 2019. MULTICAL® 403 MULTICAL® 603 MULTICAL® 803.
URL https://products.kamstrup.com/index.php

Kamstrup, 2014. Datasheet MULTICAL 603.
URL https://assets.smartpowershop.co.uk/assets/files/10/85/51/Kamstrup_Multical_603_-_Data_Sheet.pdf

MDH Arkitekter, 2019. Moholt Student Village Masterplan.
URL https://mdh.no/project/moholt-student-village/

Meisler, A., 2019. Analyse av det termiske energisystemet ved Moholt 50—50. Tech. rep., NTNU.

NGU, 2019a. Berggrunn - Nasjonal berggrunnsdatabase.
URL http://geo.ngu.no/kart/berggrunn_mobil/?map=Berggrunn.N250&extent=271868,7039374,272127,7039515

NGU, 2019b. Berggrunn N250.
URL http://geo.ngu.no/kart/minkommune/

NGU, 2019c. GRANADA - Nasjonal grunnvannsdatabase.
URL https://geo.ngu.no/kart/granada_mobil/

Nilsson, E., Rohdin, P., 2019. Performance evaluation of an industrial borehole thermal energy storage (BTES) project – Experiences from the first seven years of operation. Renewable Energy 143, 1022–1034.
URL https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.020

Nordell, B., Andersson, O., Rydell, L., Liuzzo-scorpo, A., 2015. Long-term Performance of the HT-BTES in Emmaboda, Sweden.
URL https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1005848/FULLTEXT01.pdf

Nordell, B., Scorpo, A. L., Anderson, O., Rydell, L., 2014. The HT BTES plant in Emmaboda – Report from the first three years of operation 2010-2013., 3–36.
URL https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:997525/FULLTEXT01.pdf

NOVAP, 2018. Varmepumpeteknologi.
URL https://www.novap.no/artikler/varmepumpeteknologi

OSO Hotwater, 2018. Maxi Standard - MS.
URL https://www.osohotwater.no/no-nb/commercial/maxi-standard

PAW GmbH & Co. KG, 2016. Product range Solex Technical data and dimensioning.
URL https://www.paw.eu/wp%5C-content/uploads/2016/11/Solex%5C_2016%5C_en.pdf

Pöyry Management Consulting AS, 2014. Evaluering av modeller for klimajustering av energibruk. Tech. rep.
URL http://webby.nve.no/publikasjoner/rapport/2014/rapport2014_07.pdf

Rabtherm Energy Systems, 2019a. Anti-fouling-System with copperstripes (AFS) Measurements, expertise and conclusions.
URL www.rabtherm.com

Rabtherm Energy Systems, 2019b. Products.
URL http://www.rabtherm.com/en/produkte.html

Ramstad, R. K., 2017. Drammen Eiendom KF, Sluttrapport Fjell2020 konseptutredning miljøløsninger. Tech. rep., Asplan Viak.

Regjeringen, 2018. Statsbudsjettet 2018 - Eit mål om 10 TWh redusert energibruk i eksisterande bygg.
URL https://www.statsbudsjettet.no/Statsbudsjettet-2018/Dokumenter/Fagdepartementenes-proposisjoner/Olje-og-energidepartementet-OED/Prop-1-S-/Del-3-Omtale-av-sarskilde-tema-/14-Eit-mal-om-10-TWh-redusert-energib

Rydell, L., 2019. Geoenergidagarna 2019 - Integration av kylvärmepumpar och borrhålslager i industrisystem.
URL http://cger.no/doc/pdf/presentations%20GeoEnergi2019/5%20februar/04-Norge.pdf

SGP, 2019. Flat solfanger Pro C250 V - Pro C250 H.
URL https://wpstatic.idium.no/sgp.no/2017/07/Pro%5C-C250V%5C-og%5C-Pro%5C-C250H.pdf

Siemens, 2018. Ultrasonic compact heat and heat/cooling energy meters WSx5.., WSx6..
URL https://www.automatizari-cladiri.ro/fise-tehnice/WSM5xx-xx%20&%20WSM6xx-xx_en.pdf

Siemens Building Technologies, 2013. Ultrasonic compact heat and heat cooling energy meters UH50. Tech. rep.

SINTEF Byggforsk, 2015. 553.121 Elektrisk oppvarmede varmtvannsberedere.
URL https://www.byggforsk.no/dokument/550/elektrisk_oppvarmede_varmtvannsberedere

Sit, 2019. Pågang.

Skarphagen, H., Banks, D., Frengstad, B. S., Gether, H., 4 2019a. Design Considerations for Borehole Thermal Energy Storage (BTES): A Review with Emphasis on Convective Heat Transfer. Geofluids 2019, 1–26.

Skarphagen, H., Banks, D., Frengstad, B. S., Gether, H., 4 2019b. Design Considerations for Borehole Thermal Energy Storage (BTES): A Review with Emphasis on Convective Heat Transfer. Geofluids 2019, 1–26.

S+S Regeltechnik, 2018. Thermasgard ® TM 54.
URL https://www.elit.ee/docs/spluss/TM-54__GB-safe.pdf

S+S Regeltechnik, 2019. PREMSGARD SHD-LC including DIN plug connector.
URL https://descargas.futurasmus-knxgroup.org/DOC/GB/Arcus/10840/shd-lc__overview_.pdf

Standard Norge, 2013a. NS 3700:2013 Kriterier for passivhus og lavenergibygninger - Boligbygninger.
URL https://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=ns+3700&subscr=1

Standard Norge, 2013b. NS 3700:2013 Kriterier for passivhus og lavenergibygninger Boligbygninger. Tech. rep.
URL https://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=passivhusstandard

Standard Norge, 2016. SN/TS 3031 Bygningers energiytelse. Beregning av energibehov og energiforsyning.
URL https://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=ns+3031&subscr=1

Stene, J., 2018a. Arbeidsmedier (kuldemedier) for varmepumpeprosessen. TEP4260 Varmepumper for bygningsklimatisering.

Stene, J., 2018b. Komponenter for varmepumpeaggregater. TEP4260 Varmepumper for bygningsklimatisering.

Stene, J., 2018c. Komponenter for varmepumpeaggregater. TEP4260 Varmepumper for bygningsklimatisering.

Stene, J., 2018d. Optimal integrering av varmepumper og kjøleanlegg i bygninger. TEP4260 Varmepumper for bygningsklimatisering.

Stene, J., 2018e. Varmekilder for varmepumper. TEP4260 Varmepumper for bygningsklimatisering.

Stene, J., 2019. Vurdering av frostvæsker (kuldebærere). Tech. rep., COWI.

Studer, U., 2009. Waste water is gold under our feet. Clean Technology and Sustainable Industries Organization.

Swegon, 2015. Teknisk spesifikasjon GOLD RX. Tech. rep.

Tempero AS, 2015. Energi Effekt Moholt 50—50. Tech. rep.

Torp, A. L., 2016. Moholt 50—50, Årssimulering, hybeltårn og Barnehage. Tech. rep., ITECH A.S.

Trondheim Kommune, 2017. Energispareprisen 2017. Tech. rep.
URL www.trondheim.kommune.no/energispareprisen

Tronheim Kommune, 2017. Energispareprisen 2017. Tech. rep.
URL www.trondheim.kommune.no/energispareprisen

Variant VVS, 2018. Produktdatablad Maxi Standard.
URL https://www.variantvvs.no/index.php/tanker

Varmeteknikk, 2018. Installation - operating - servicing SB - boilers.

Wilo, 2019. General Overview 2019.
URL https://cms.media.wilo.com/dcidocpfinder/wilo247974/3328883/wilo247974.pdf

Zottl, A., Nordman, R., Coevoet, M., Riviere, P., Miara, A. M., Frauenhofer, I., Benou, A., Riederer, P., Andersson, K., Lindahl, M., 2011. D4.1. / D2.3. Guideline for heat pump field measurements for hydronic heating systems.
URL https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/sepemo-build_guideline_for_hp_field_measurements_hydro_heating_en.pdf

Vedlegg

A Studentbyens areal og antall personer i hver bygning

Antall studenter i hvert boligtårn og antall barn i barnehagen er presentert i figur 1.

Bygg	Antall personer
Tårn A	120
Tårn B	120
Tårn C	129
Tårn D	125
Tårn E	129
Totalt	**623**
Barnehage	171

Tabell 1: Antall studenter per boligtårn og antall barn i barnehagen 50|50

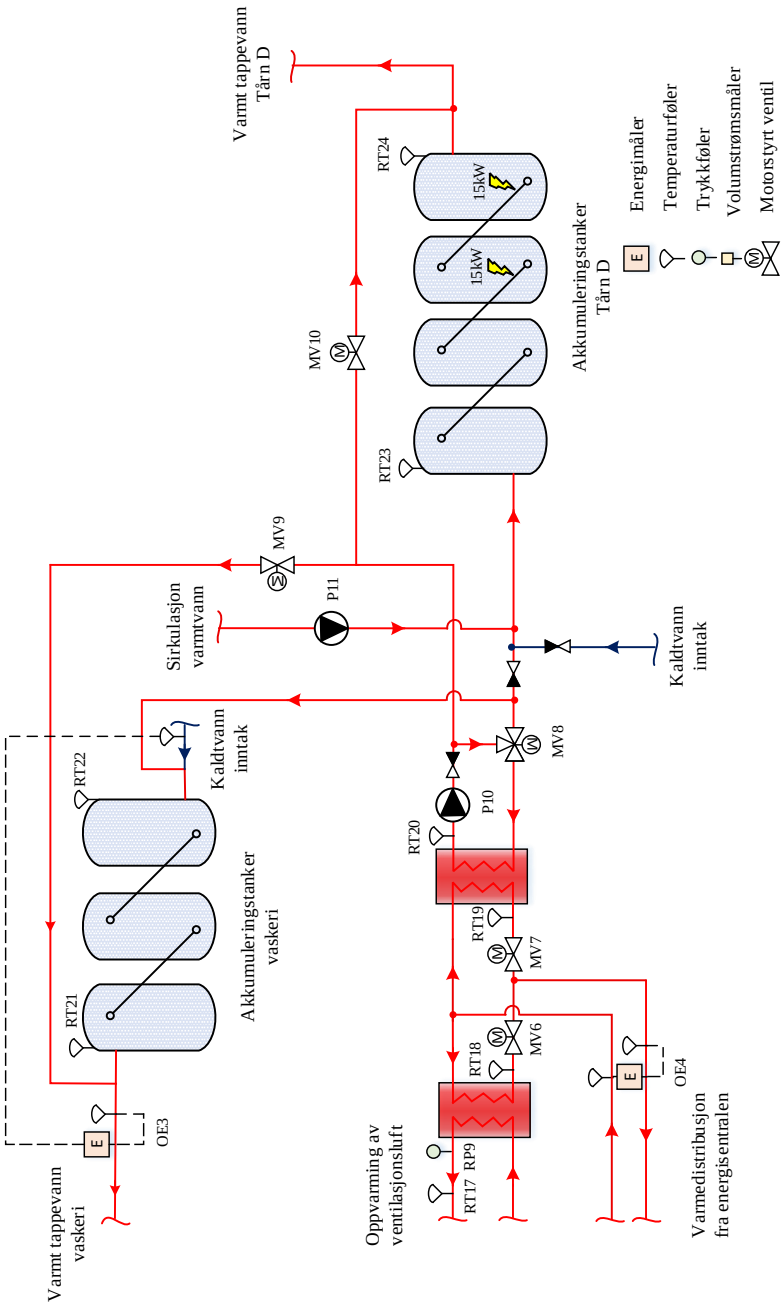
Arealet til studenthyblene og næringsdelen i boligtårnene, arealet i barnehagen og biblioteksbygningen er presentert i tabell 2. Noen boligtårn har større hybelarealer og mindre næringsarealer eller motsatt.

Prosjektert varmebehov for varmtvannsberedning, oppvarming av ventilasjonsluft og snøsmelting har brukt prosjektert areal i tabellen. For målinger av varmeleveranse til de ulike bygningene og arealene er reelt areal brukt.

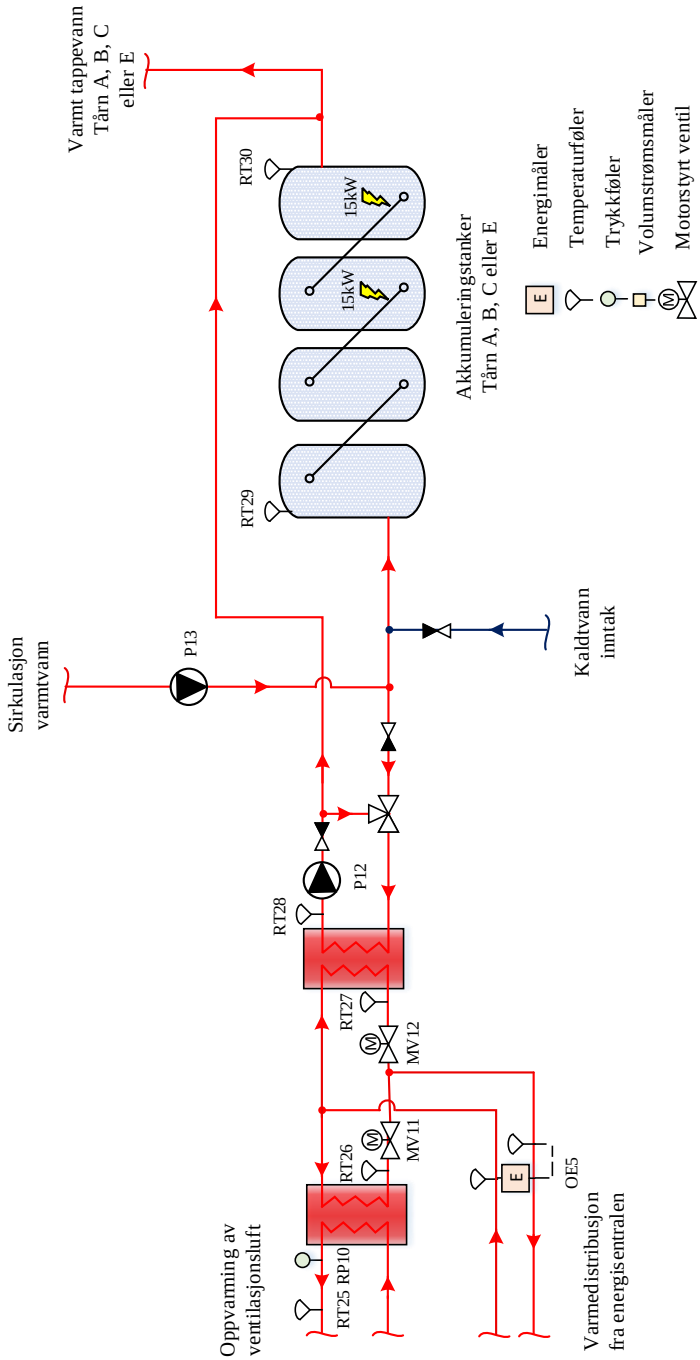
Bygg	Reelt areal [m^2]	Prosjektert areal BRA [m^2]
Tårn A	2 920	3 460
Tårn B	2 920	3 460
Tårn C	3 126	3 460
Tårn D	3 031	3 460
Tårn E	3 126	3 460
Totalt	**15 123**	**17 300**
Tårn A, legesenter	304	380
Tårn B, treningssenter	287	380
Tårn C, næring og hybler	93	380
Tårn D, vaskeri og næring	143	380
Tårn E, næring og hybler	143	380
Barnehage	2 228	2242
Bibliotek, kafé og aktivitetssenter	908	1000
Kjellere tårn A-E		1 925
Parkeringskjeller		1 000
Totalt areal Moholt 50|50	**22 154m^2**	**25 367 m^2**

Tabell 2: Areal for de ulike bygningene ved Moholt 50|50

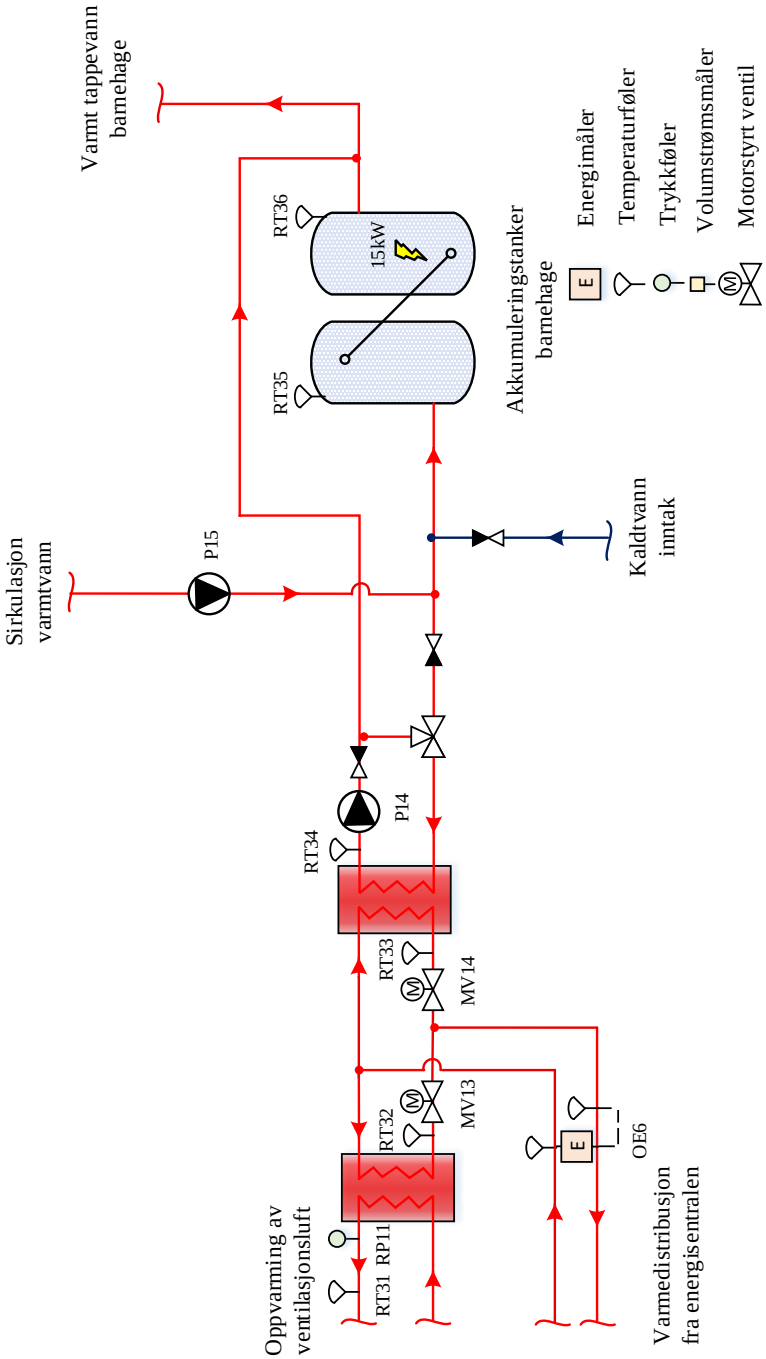
B Systemskisser av det termiske energisystemet



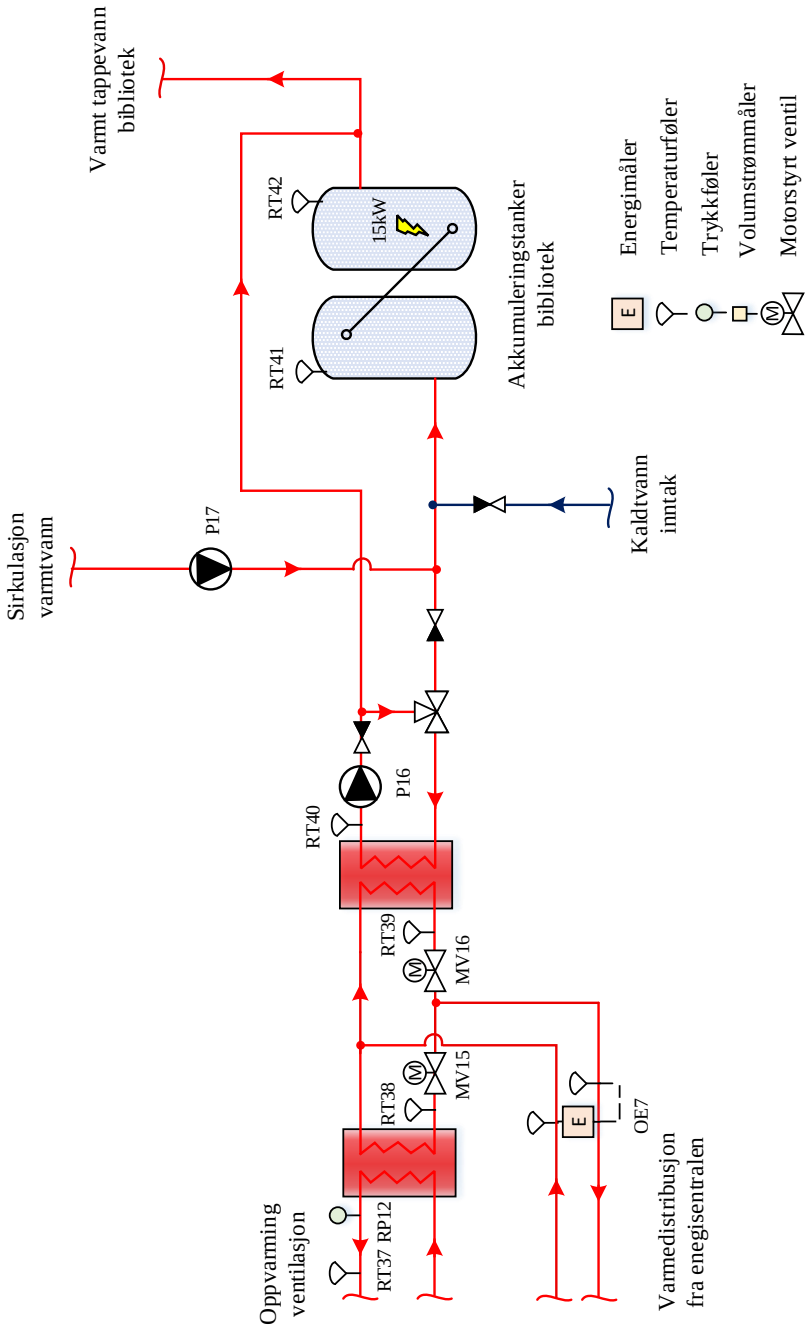
Figur 1: Systemskisse boligtårn D inkludert måleinstrumentering



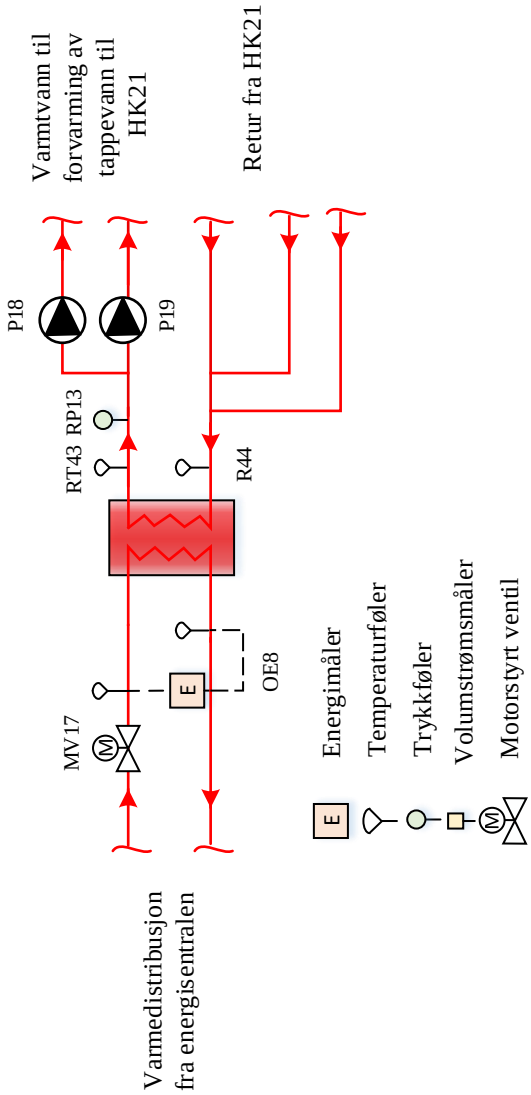
Figur 2: Systemskisse boligtårn A, B, C og E inkludert måleinstrumentering



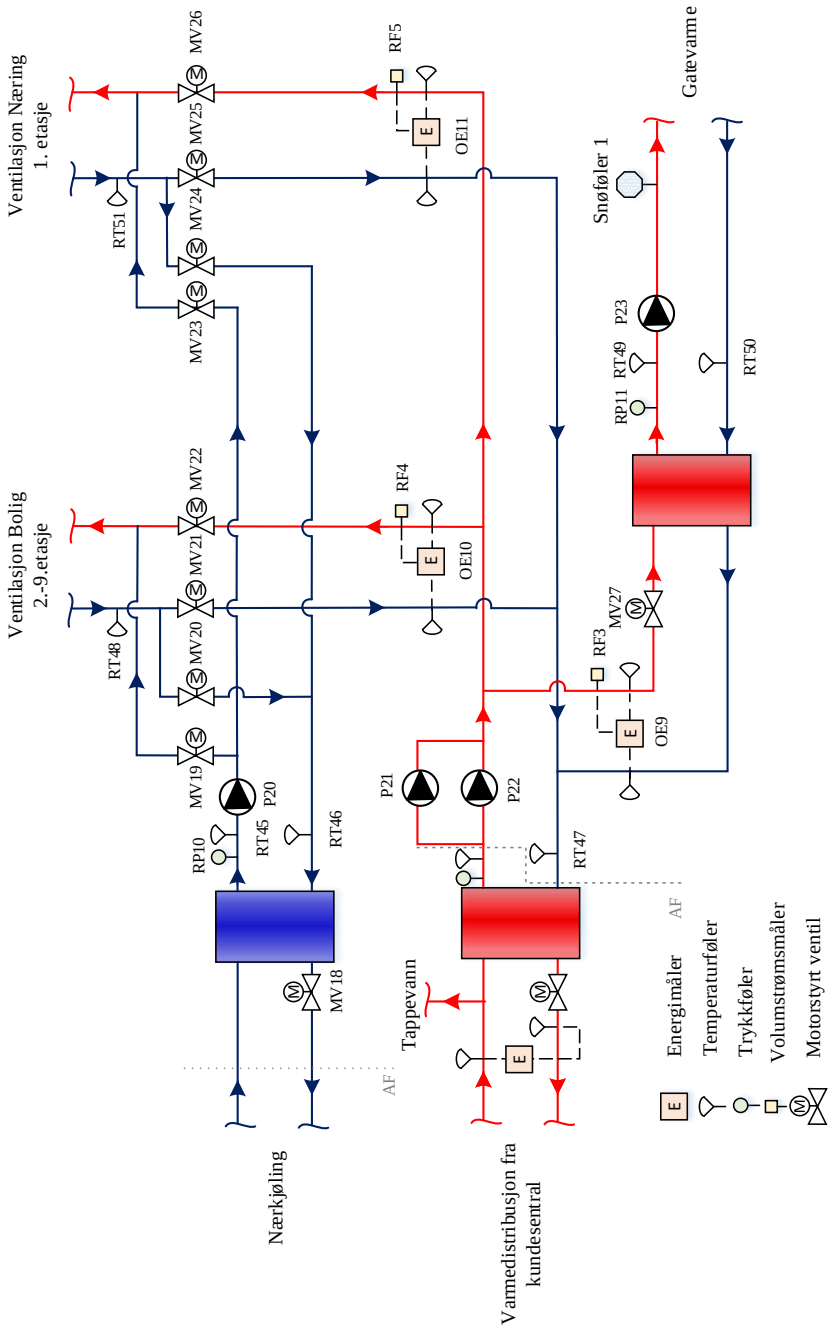
Figur 3: Systemskisse Moholt barnehage inkludert måleinstrumentering



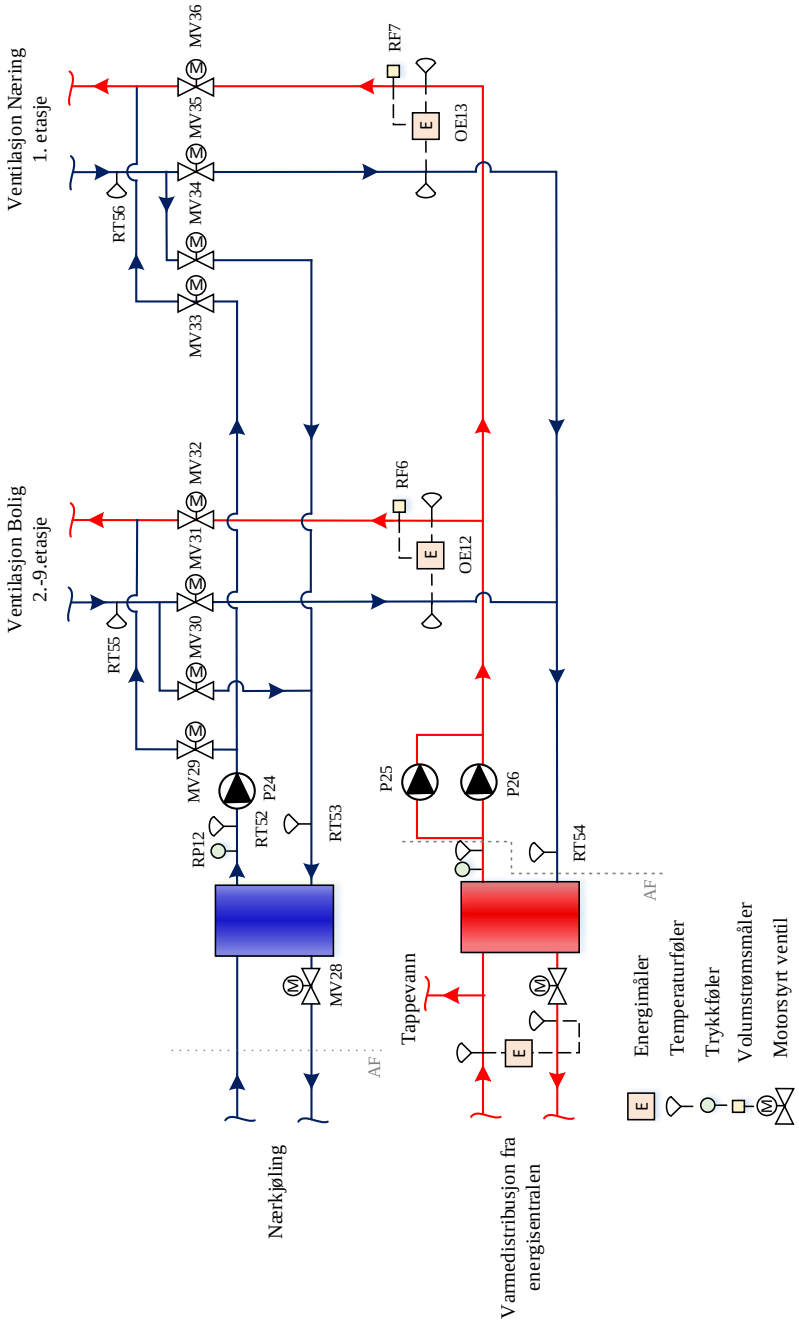
Figur 4: Systemskisse biblioteksbygningen inkludert måleinstrumentering



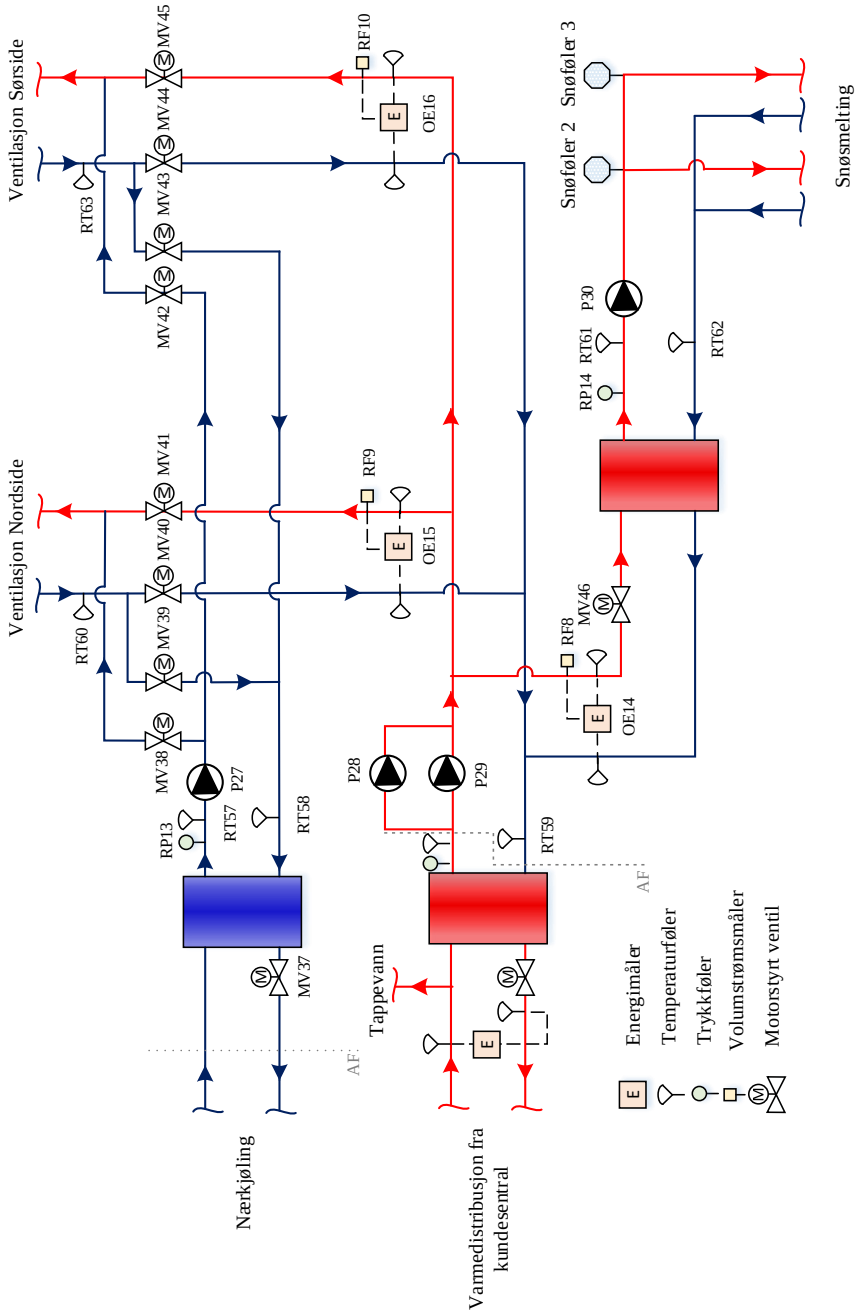
Figur 5: Systemskisse undersentral for forvarming av tappevann til HK21 inkludert måleinstrumentering



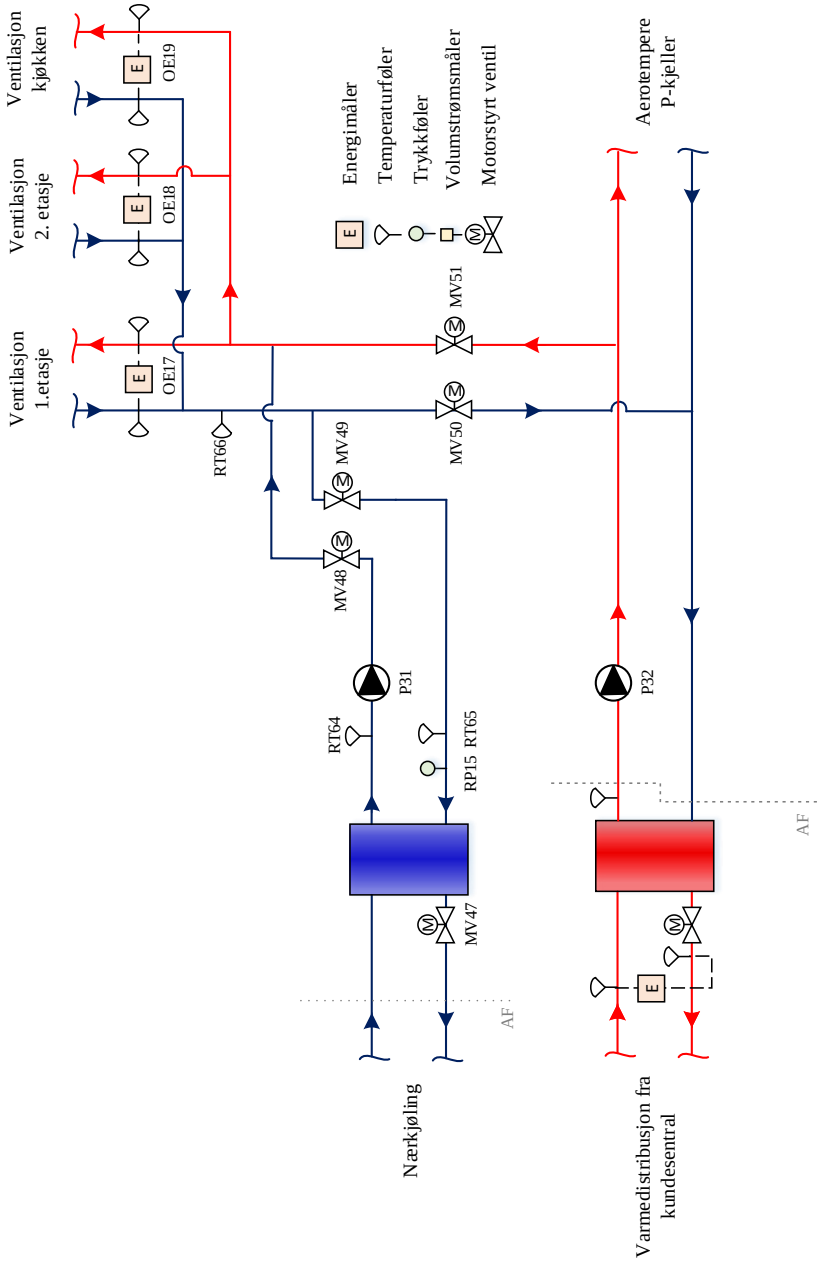
Figur 6: Systemskisse for nærkjøling og ventilasjonsoppvarming av boligtårn A inkludert måleinstrumentering



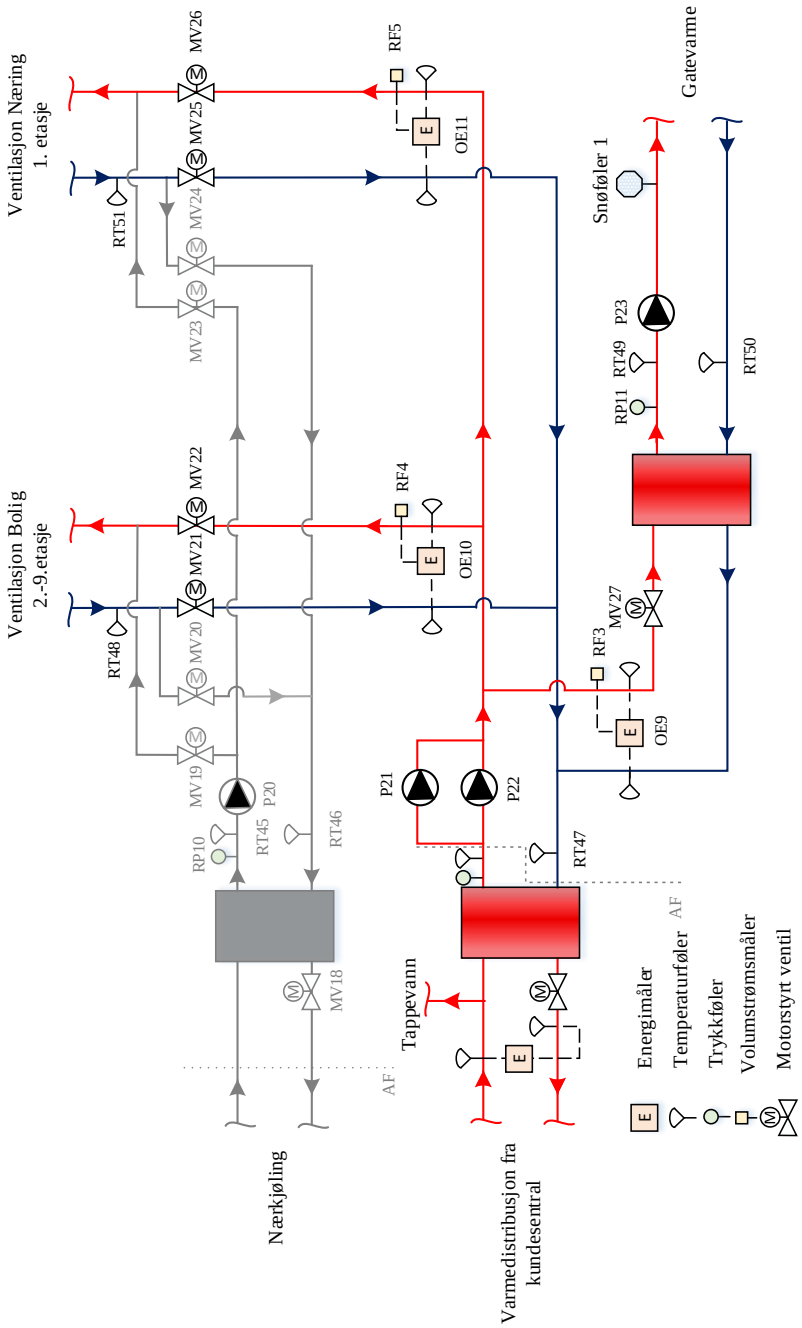
Figur 7: Systemskisse for nærkjøling og ventilasjonsoppvarming av boligtårn D inkludert måleinstrumentering



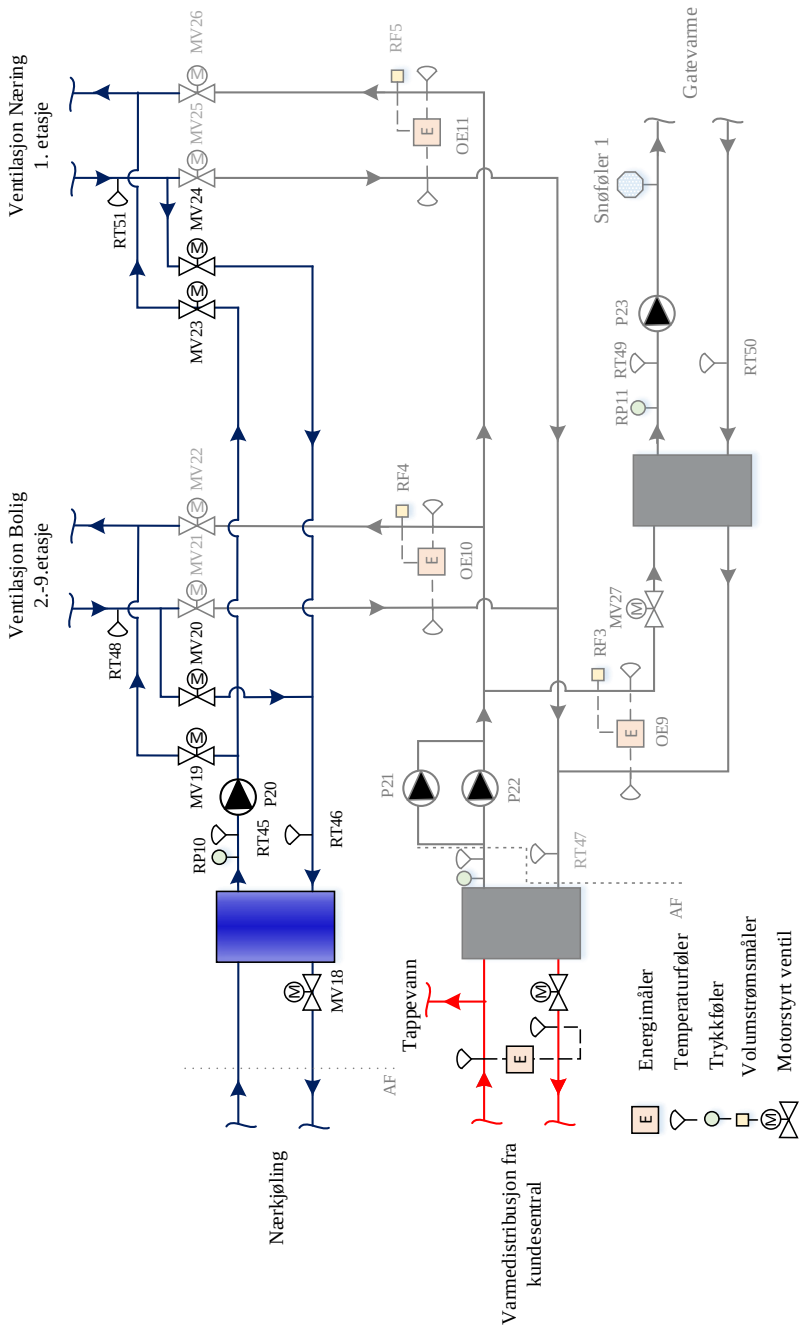
Figur 8: Systemskisse for nærkjøling og ventilasjonsoppvarming av Moholt barnehage inkludert måleinstrumentering



Figur 9: Systemskisse for nærkjøling og ventilasjonsoppvarming av biblioteksbygningen inkludert måleinstrumentering



Figur 10: Systemskisse for oppvarming av ventilasjonsluft og nærkjølesystemet i varmemodus i boligtårn A



Figur 11: Systemskisse for oppvarming av ventilasjonsluft og nærkjølesystemet i modus for kjøledrift i boligtårn A

C Komponentspesifikasjoner

C.1 Brønnpark

Parameter	Beskrivelse
Antall energibrønner	23
Gjennomsnittlig brønndybde	ca. 250 meter
Total boredybde	ca. 5750 meter
Berggrunn	Grønnstein
Stabilt grunnvannssnivå	ca. 20 meter
Borehull diameter	114 mm
Kollektortype	Enkel U-kollektor DN40 (glattrørskollektor)
Fabrikant U-kollektor	Mouvitech
Kollektor materiale	PEM 40/2,4 PN10 SDR17
Kollektorvæske	HX i-24 (denaturert etanol)
Frysepunkt kollektorvæske	ca. - 10 °C

Tabell 3: Spesifikasjoner for brønnparken

C.2 Varmepumpeanlegget

Parameter	Beskrivelse
Produsent	Carrier
Modell	61WG-090-0221-PE
Effekt per aggregat	ca. 84 kW
Antall aggregat i anlegget	3 parallellkoblede aggregater (fordamper- og kondensatorside)
Arbeidsmedium	R410A
Fyllingsmengde per aggregat	10,5 kg (option 272)
Væske fordamperside	HXi24, entaolblanding vol. 24%
Væske kondensatorside	Vann
Kompressor per aggregat	2 scrollkompressorer
Kapasitetsstyring per aggregat	50 % eller 100 %
Dimensjonerende trykktap fordamper	9 kPa
Dimensjonerende trykktap kondensator	22 kPa
COP i varmemodus, full last	2,78 (3 / 55 °C)
Lengde x Bredde x Høyde per aggregat	1474 mm x 880 mm x 901 mm
Driftsvekt per aggregat	547 kg

Tabell 4: Spesifikasjoner for varmepumpeanlegget (Carrier, 2013).

Det har ikke vært mulig å finne informasjon om fordamperen og kondensatorens modell i de tre Carrier varmepumpeaggregatene.

Parameter	Beskrivelse
Kompressor	
Modell	Danfoss SH184A4ACC
Type	Scrollkompressor
Kapasitetsregulering	På/av - regulering
Maks antall start/stopp på en time	6
Fordamper	
Type	Platevarmeveksler
Kondensator	
Type	Platevarmeveksler
Elektronisk ekspansjonsventil	
Merke	Danfoss
Modell	ETS25
Tørkefilter	
Merke	Carly
Modell	BCY 487 S/MMS

Tabell 5: Spesifikasjoner for komponentene i Carrier varmepumpeaggregatet (Carrier, 2013).

Parameter	Beskrivelse
Varmemodus	
Dimensjonerende temperaturer	3/ 55 °C
Temperatur fordamperside	-1,0/ 3,0 °C
Massestrøm fordamperside	3,27 liter/s
Temperatur kondensatorside	50/55 °C
Massestrøm kondensatorside	3,98 liter/s
Nominell varmekapasitet	82,5 kW

Tabell 6: Driftsdata for et varmepumpeaggregat i varmemodus ved dimensjonerende forhold (Carrier, 2013).

C.3 Elektrokjel

Parameter	Beskrivelse
Modell	SB400
Effekt	300 kW
Effektrinn	20 kW/ trinn
Antall effekttrinn	15
Vannmengde	240 liter
Maks/ min arbeidstrykk	1/ 6 bar
Lengde x Bredde x Høyde	670 mm x 108 mm x 160 mm
Vekt	315 kg

Tabell 7: Spesifikasjoner for elektrokjel (Varmeteknikk, 2018).

C.4 Undersentral

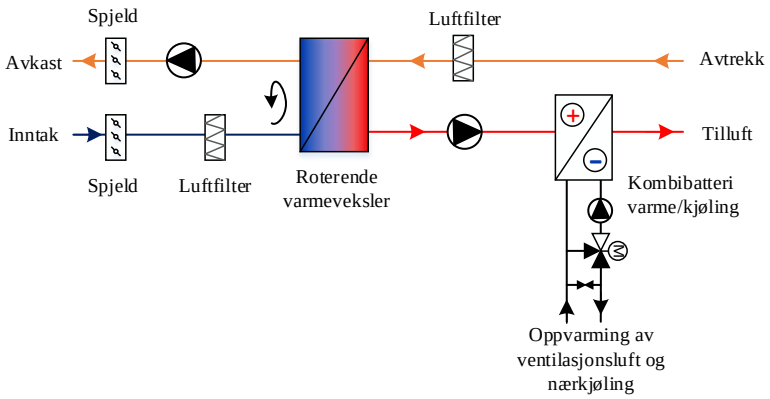
Parameter	Beskrivelse
Merke	Oso Hotwater
Modell	Maxi Standard 17
Akkumuleringstank boligtårn A-E	
Kapasitet	900 liter
Diameter	1000 mm x 2100 mm
Vekt	236 kg
Akkumuleringstank boligtårn D, vaskeri	
Kapasitet	2000 liter
Akkumuleringstank barnehage	
Kapasitet	400 liter
Akkumuleringstank bibliotek	
Kapasitet	1000 liter
Akkumuleringstank med elkolbe	
Modell	Maxi Standard 17 RE
Effekt	15 kW

Tabell 8: Spesifikasjoner for akkumuleringstankene i boligtårnene, barnehagen og biblioteksbygningen (Varmeteknikk, 2018).

Ved bruk av Apurgo M3-systemet kan tappenavannstemperaturen fra det termiske energisystemet senkes fra 70 °C til omtrent 50 °C uten risiko for legionellavekst. Systemet forhinder oppblomstring av legionellabakterier i varmedistribusjonsnettet ved å dosere ladede kobber- og sølvioner ut i distribusjonsnettet. Ved å påsette strøm oppnås elektrolyse, og de positivt ladede ionene vil binde seg til bakterienes negtaivt ladede cellevegg. Cellens DNA ødelegges som forhindrer formering eller fører til celledød. Apurgo-systemet vil også forhindre dannelse av biofilm i rørnettet. (Apurgo AS, 2019a).

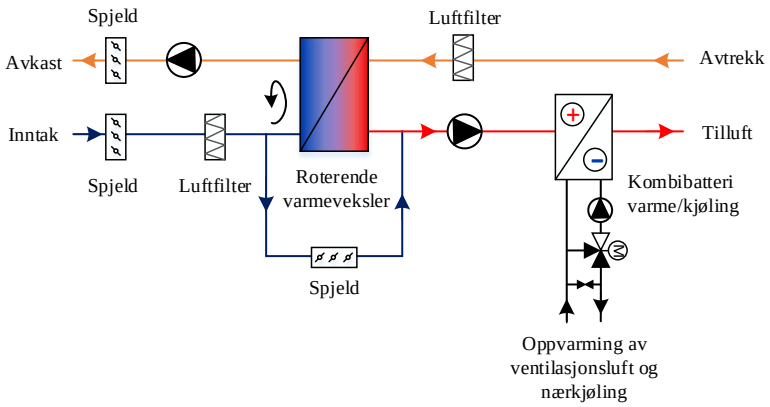
C.5 Systemskisser luftaggregat

Systemskissen for luftaggregatet plassert i undersentralen for oppvarming og kjøling av ventilasjonsluft til næringsarealene i boligtårn A-E og barnehagens nordre del er presentert i figuren under



Figur 12: Systemskise luftaggregat i næringsarealene og nordre del av barnehage

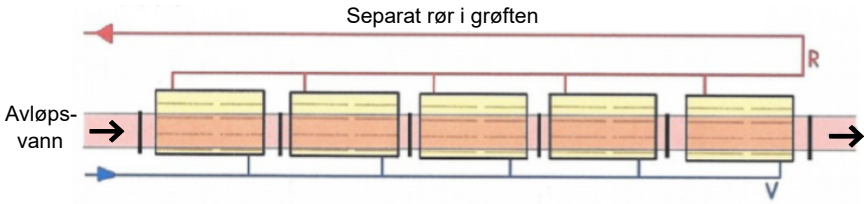
Systemskissen for luftaggregatet plassert i undersentralen for oppvarming og kjøling av ventilasjonsluft til kjøkkenet i biblioteksbygningen er presentert i figuren under



Figur 13: Systemskise luftaggregat i bibliotekbygningens kjøkken

C.6 Varmegjenvinning fra avløpsvann

Gråvannsvarmeveksleren levert av Rabtherm Energy Solutions består av fem motstrømsvarmevekslerene koblet i serie, med krysstrømskobling. Rørvarmevekslerene er koblet med hydraulisk balanse og har derfor likt trykktap over hver varmeveksler (Arnevik et al., 2018). Den hydrauliske installasjonen av rørvarmevekslerene er presentert i figur 14.



Figur 14: Kobling av de konsentriske rørvarmevekslere fra Rabtherm Energy Systems (redigert) (Arnevik et al., 2018)

Avløpsrørene har integrert Rabtherm Anti-fouling system i rørveggen for å forhindre dannelse av biofilm, som er mikroorganismer, bakterier og alger som finnes i avløpsvannet. Systemet består av kobberringer plassert i rørveggene, som avgir små mengder kobberioner som forhindrer oppblomstring av bakterier og biofilm langs avløpsrørene (Rabtherm Energy Systems, 2019a). Avløpsrør med biofilm øker termisk motstand i rørene og fører til lavere varmeoverføringskoeffesient. Reell effekt av av systemet er ikke dokumentert av andre enn produsenten (Studer, 2009).

Spesifikasjoner for rørvarmeveksleren for varmegjenvinning av avløpsvann er presentert i tabell 9.

Parameter	Beskrivelse
Merke	Rabtherm Energy Systems
Produktnavn	Integrert varmeveksler
Materiale	Rustfritt stål
Lengde	25 meter
Minste massestrøm for avløpsvann, (tørr periode)	12 liter/s
Spesifikk varmeuttak per 1 m^2 varmeveksleroverflate	2 - 6 kW
Lavste temperatur for varmegjenvinning	8 °C
Indre rørdiameter	200 mm
Maksimal avstand til undersentral	200 meter
Væske primærside, varmenett	HX-i-24

Tabell 9: Spesifikasjoner for varmeveksler for avløpsvann (Rabtherm Energy Systems, 2019b)

Rørvarmeveksleren er isolert for å minske varmetapene til omkringliggende grunn. En buf-

fertank på 300 liter er montert mellom kjøledistribusjonsnettets tur og retur fra rørvarmeveksleren. Buffertanken mottar nedkjølt frostvæske fra varmesentralen og oppvarmet frostvæske fra varmegjenvinningen fra avløpsvann, og har som hensikt å forhindre at pumpen kommer i konflikt med resten av systemet (Arnevik et al., 2018).

Avløpsrøret består PE100 plastrør og ligger i en grøft 4 meters dybde. Temperaturføleren som måler temperaturen til avløpsvannet er plassert ca. 57 meter før varmeveksleren (Arnevik et al., 2018). Rørvarmevekslerene er vist i figur 2.10.

C.7 Solfangeranlegg

Parameter	Beskrivelse
Merke	De Dietrich
Produktnavn	Pro C250V
Totalt brutto areal per solfanger	2,51 m^2
Trykktap (30 l/hm^2)	75 mbar
Væskeinnhold	2,9 liter
Absorpsjonsfaktor (a)	95 ± 1
Refleksjon (b)	5 ± 1
Optisk virkningsgrad	0,819
Overføringstap (a1)	3,671 W/m^2K
Overføringstap (a1)	0.0129 W/m^2K^2
Vekt	47 kg

Tabell 10: Spesifikasjoner for solfangerne i solfangeranlegget (SGP, 2019)

Solstasjonen en prefabrikkert enhet beregnet for oppvarmingssystemer til varmt tappevann, med varmeveksler, pumper og ventiler integrert i stasjonen. Spesifikasjoner for solstasjonen er presentert i tabell 11. Styringssystemet i solstasjonen er uavhengig fra varmesentralens SD-anlegg.

Parameter	Beskrivelse
Produktnavn	Solex Maxi TW
Varmeveksler	2 x 50 platevarmeveksler, type XB37M
Driftsmodus	15 liter/(m^2xh) - 40 liter/(m^2xh)
Maksimal kollektoroverflate	200 m^2
Effekt	100 kW
Temperaturforskjell	33 K
Maksimum driftstemperatur primær/ sekundær	120°C/ 95°C
Maksimalt trykk primær/ sekundær	6 bar/ 10 bar
Maksimal volumstrøm	0,83 liter/s
Dimensjoner lengde x høyde x bredde	1 672 mm x 1 890 mm x 870mm
Primærpumpe	Grundfos Solar PM2 15-145 høyeffektiv pumpe, PWM signal
Sekundærpumpe	Grundfos Solar PM2 15-65 høyeffektiv pumpe, PWM signal

Tabell 11: Spesifikasjoner for solstasjonen i solfangeranlegget (PAW GmbH & Co. KG, 2016)

C.8 Pumper

Sensor	Plassering	Spesifikasjon
Pumper i undersentralene		
Grundfos Magna 3 25-60-180	Ventilasjon næring	
Grundfos Magna 3 25-100-180	Ventilasjon bolig	
Grundfos Magna 3 25-100-180	Varme ventilasjon	
Grundfos Magna 3 25-100-180	Varme ventilasjon	
Grundfos Magna 3 25-100-180	Kjøleveksler	
Grundfos Magna 3 25-60N-180	Tappevann	
Grundfos Alpha A	Sirkulasjon	
Grundfos Magna 3 40-120F-250	Avløpsgjenvinning	
Grundfos	Vaskeri	
Grundfos	Solcelle	
Pumper i varmsentral		
Wilo IPE-E 40/130-2,2/2	Tur varme	-20 - 120 °C
Wilo VeroLine-IP-E 65/115-1,5/2	Retur varme	-20 - 140 °C
Wilo Cronoline-IL E 65/160-7,5/2-R1	Fra energibrønn	-20 - 140 °C
Wilo VeroLine-IP-E 65/115-1,5/2	Til energibrønn	-20 - 140 °C
Wilo yonos PICO	Til fancoil	-10 - 95 °C

Tabell 12: Spesifikasjoner for installerte pumper i det termiske energisystemet ved Moholt 50|50

D Måleinstrumentering i det termiske energisystemet (Wilo, 2019)

Plassering	**Måling**
Termisk energimålere	
Varmeopptaksnett og energisentral	
OE1 OE2	Varmegjenvinning avløpsvann Varme fra varmepumpeaggregatene
Tårn D	
OE3 OE4	Varmeveksler varmtvann og oppvarming av ventilasjonsluft Varmt varmtvann vaskeri
Tårn A, B, C eller E	
OE5	Varmeveksler varmtvann og oppvarming av ventilasjonsluft
Bibliotek og parkeringskjeller	
OE6	Varmeveksler tappevann og oppvarming av ventilasjonsluft
Bibliotek og parkeringskjeller	
OE7	Varmeveksler tappevann og oppvarming av ventilasjonsluft
HK21	
OE8	Varmeveksler forvarming av varmtvann
Temperaturfølere	
Varmeopptaksnett og energisentral	
RT1 og RT2 RT3 RT4 og RT6 RT5 RT7 RT8 RT9 og RT11	Tur/ retur frostvæske brønnpark Retur varmeleveranse fra solfangere, varmegjenvinning fra avløpsvann og ventilasjonsluft Tur/ retur propylenglykol fra solfangerene Retur frostvæske fra solstasjonen til brønnparken Solfangere varm side Retur frostvæske fordamperside Tur/Retur varmeveksler for varmegjenvinning fra avløpsvann etter akkumuleringstank
Varmeopptaksnett og energisentral	
RT10 og RT12 RT13 RT14 RT15 RT16	Tur/ retur varmeveksler for varmegjenvinning fra avløpsvann før akkumuleringstank Retur før kondensator Tur undersentralene, før elkjel Tur elektrokjel Tur undersentraler

Tabell 13: Oversikt over termiske energimålere og temperaturfølere ved Moholt 50|50

Plassering	**Måling**
Temperaturfølere	
Tårn D	
RT17	Tur varmeveksler oppvarming av ventilasjonsluft
RT18	Retur varmeveksler oppvarming av ventilasjonsluft
RT19	Retur varmeveksler, varmtvann
RT20	Tur varmeveksler, varmtvann
RT21	Toppføler i første akkumuleringstank, vaskeri
RT22	Toppføler i tredje akkumuleringstank, vaskeri
RT23	Toppføler i første akkumuleringstank, varmtvann
RT24	Toppføler i tredje akkumuleringstank, varmtvann
Tårn A, B, C og E	
RT25	Tur varmeveksler oppvarming av ventilasjonsluft
RT26	Retur varmeveksler oppvarming av ventilasjonsluft
RT27	Retur varmeveksler, varmtvann
RT28	Tur varmeveksler, varmtvann
RT29	Toppføler første akkumuleringstank, varmtvann
RT30	Toppføler tredje akkumuleringstank, varmtvann
Barnehage	
RT31	Tur varmeveksler oppvarming av ventilasjonsluft
RT32	Retur varmeveksler oppvarming av ventilasjonsluft
RT33	Retur varmeveksler, varmtvann
RT34	Tur varmeveksler, varmtvann
RT35	Toppføler i første akkumuleringstank, varmtvann
RT36	Toppføler i tredje akkumuleringstank, varmtvann
Bibliotek og parkeringskjeller	
RT37	Tur varmeveksler oppvarming av ventilasjonsluft
RT38	Retur varmeveksler oppvarming av ventilasjonsluft
RT39	Retur varmeveksler, varmtvann
RT40	Tur varmeveksler, varmtvann
RT41	Toppføler i første akkumuleringstank, varmtvann
RT42	Toppføler i tredje akkumuleringstank, varmtvann
HK21	
RT44 og RT45	Tur/ retur varmeveksler forvarming, varmtvann

Tabell 14: Fortsettelse: oversikt over temperaturfølere ved Moholt 50|50

Plassering	**Måling**
Trykkfølere	
Varmeopptaksnett og energisentral	
RP1	Tur frostvæske, brønnpark
RP2 og RP3	Tur/ retur frostvæske, fordampere
RP4 og	Tur/ retur før kondensatorene
RP6	Retur varmedistribusjon undersentralene, etter påfylling
RP7 og RP8	Tur/ retur varmedistribusjon undersentralene
Tårn A, B, C og E	
RP9	Tur varmeveksler, oppvarming av ventilasjonsluft
Tårn D	
RP10	Tur varmeveksler, oppvarming av ventilasjonsluft
Barnehage	
RP11	Tur varmeveksler, oppvarming av ventilasjonsluft
Bibliotek og parkeringskjeller	
RP12	Tur varmeveksler, oppvarming av ventilasjonsluft
HK21	
RP13	Tur varmeveksler, forvarming av varmtvann
Volumstrømmåler	
Varmeopptaksnett og energisentral	
RF1	Tur frostvæske solfangere
RF2	Tur frostvæske varmeveksler, avløpsvann

Tabell 15: Fortsettelse: oversikt over trykkfølere ved Moholt 50|50

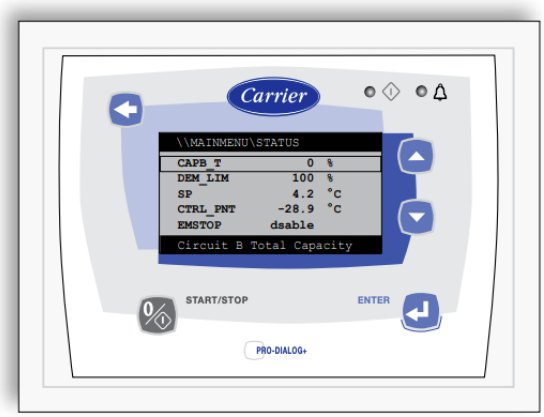
E Måleusikkerhet i måleutstyr

Sensor	ID	Type	Spesifikasjon	Nøyaktighet
Energimålere				
Varmesentral	OE	Kamstrup MULTICAL® 603	Ec [%] EN1434 Ec [%] Typisk Et [%] EN1434 Et [%] Typisk	± 0,5 + $\Delta\Theta_{min}/\Delta\Theta$ ± (0,15 + $2/\Delta\Theta$) ± (0,5 + $3\Delta\Theta_{min}/\Delta\Theta$) ± (0,4 + $4\Delta\Theta$)
Varme-gjenvinner avløpsvann	OE	ModMag M1000		± 0,3 % av reell væskestrøm ± 2 mm/s av reell væskestrøm
Undersentral	OE	Axis Industries SKU-4	Total E [%] Strømnings-måler E [%] 0 - 180 °C	$\pm \frac{3+4\Delta\Theta_{min}}{\Delta\Theta+0{,}2q_p/q}$ $\pm \frac{2{,}5+\Delta\Theta_{min}}{\Delta\Theta+0{,}2q_p/q}$
Undersentral	OE	Siemens UH50-C45-00	EN1434 class 2, typisk	± 4 [%] ± 2 [%]
Undersentral	OE	Siemens WSM525-BE	EN1434 class 2, typisk E [%] $\Delta\Theta$ = 3 K 0 - 180 °C	± 4 [%] ± 2 [%] 0,5 + $\Delta\Theta_{min}/\Delta\Theta$ max 1,5 °C
Øvrig instrumentering				
Temperatur-føler	RT	Thermasgard TF54	25 °C	± 0,2 K
Trykkføler 1	RP	Premasgard SHD		$< 3\ \%$
Trykkføler 2	RP	Premasgard		$< 3\ \%$

Tabell 16: Målenøyaktighet for installert instrumentering ved Moholt 50|50 (Axis Industries, 2019), (Badger Meter Europe, 2019), (Kamstrup, 2014), (Kampstrup, 2019), (Siemens Building Technologies, 2013), (Siemens, 2018), (S+S Regeltechnik, 2019), (S+S Regeltechnik, 2018).

F Måleenheter i det interne kontrollsystemet til varmepumeaggregatene

Figur 15 viser displayet til det numeriske kontrollsystemet, Pro-Dialog +, som er integrert i Carrier 61WG aggregatene. I Carrier WG61 aggregatene med to scrollkompressorer er det bare en krets, krets A.



Figur 15: Bilde av displayet til varmepumpeaggregatets integrerte kontrollsystem (Carrier, 2012).

Display	Beskrivelse	Enhet
Krets A		
term_ewt	Inngående vanntemperatur	°C
term_lwt	Utgående vanntemperatur	°C
CTRL_PNT	Kontrollpunkt temperatur	°C
CAP_T	Total kapasitet	%
CAPA_T	Total kapasitet krets A	%
EWT	Inngående vanntemperatur	°C
LWT	Utgående vanntemperatur	°C
OAT	Utetemperatur	°C
CHWSTEMP	Common master/slave temperature, evaporator	°C

Tabell 17: Måleenheter i det interne kontrollsystemet til varmepumpeaggregatene (Carrier, 2012)

Display	Beskrivelse	Enhet
Krets A		
DGT_A	Trykkgasstemperatur A	°C
SCT_A	Metningstemperatur kondensator A	°C
SST_A	Metningstemperatur fordamper A	°C
SUCT_A	Sugegasstemperatur A	°C
DP_A	Leveringstrykk A	kPa
SP_A	Sugegasstrykk A	kPa
DRY_LWT	C Turtemperatur tørrkjøler	°C
Fordamper		
CL_EWT	Turtemperatur	°C
CL_LWT	Returtemperatur	°C
Kondensator		
COND_EWT	Turtemperatur	°C
COND_LWT	Returtemperatur	°C
Settpunkt		
csp1	Kjøling settpunkt 1	°C
csp2	Kjøling settpunkt 2	°C
ice_sp	Islagring kjøle settpunkt	°C
hsp1	Varme settpunkt 1	°C
hsp2	Varme settpunkt 2	°C
hsp3	Varme settpunkt 3	°C
cauto_sp	Kjøle settpunkt	°C
hauto_sp	Varme settpunkt	°C
lim_sp1	Grense settpunkt 1	%
lim_sp2	Grense settpunkt 2	%
lim_sp3	Grense settpunkt 3	%
cond_sp	Kondensering settpunkt, kondensator	°C
SP	Nåværende settpunkt	°C
Driftstid		
hr_mach	Driftstid enhet	time
chr_ach	Driftstid i kjølemodus, enhet	timer
hhr_mach	Driftstid i varmemodus, enhet	timer
st_mach	Antall start, enhet	-
hr_cp_a1	Timer kompressor A1	time
st_cp_a1	Antall start kompressor A1	-
hr_cp_a2	Timer kompressor A2	time
st_cp_a2	Antall start kompressor A2	-

Tabell 18: Fortsettelse: måleenheter i det interne kontrollsystemet til varmepumpeaggregatene (Carrier, 2012)

F.1 Avleste verdier i det interne kontrollsystemet

Display	Beskrivelse	VP 1	VP 2	VP 3
Krets A				
term_ewt	Inngående vanntemperatur kond.	43,7 °C	42,9 °C	43,3 °C
term_lwt	Utgående vanntemperatur kond.	43,6 °C	51,7 °C	52,3 °C
Ctrl_pnt	Kontrollpunkt temperatur	40,0 °C	45,0 °C	43,0 °C
CAP_T	Total kapasitet	0%	100 %	100 %
CAPA_T	Total kapasitet krets A	0%	100 %	100 %
EWT	**Inngående vanntemperatur ford.**	**2,6 °C**	**2,6 °C**	**2,5 °C**
LWT	Utgående vanntemperatur ford.	2,5 °C	-0,9 °C	-1,0 °C
OAT	Utelufttemperatur	-17,8 °C	-17,8 °C	-17,8 °C
DGT_A	**Trykkgasstemp.**	**20,3 °C**	**95,7 °C**	**98,5 °C**
SCT_A	Metningstemp. kondensator	43,8 °C	50,6 °C	52,1 °C
SST_A	Metningstemp. fordamper	1,7 °	-5,3 °C	-4,8 °C
SUCT_A	Sugegasstemperatur	16,8 °C	1,5 °C	1,9 °C
DP_A	Leveringstrykk	2520,5 kPa	3027,6 kPa	3113,1 kPa
SP_A	Sugegasstrykk A	742,2 kPa	571,1 kPa	580 kPa
Dry_lwt	Tørrkjøl utgående vanntemp.	-17,8 °C	-17,8 °C	-17,8 °C
Fordamper				
CL_EWT	Returtemperatur	-	-	-
CL_LWT	Turtemperatur	-	-	-
Kondensator				
Cond_ewt	Kondensator inngående temp.	43,7 °C	43,1 °C	43,3 °C
Cond_lwt	Kondensator utgående temp.	43,6 °C	51,8 °C	52,3 °C
Settpunkt				
csp1	Kjøling settpunkt 1	0 °C	0 °C	0 °C
csp2	Kjøling settpunkt 2	0 °C	0 °C	0 °C
ice_sp	Islagring kjøle settpunkt	12 °C	12 °C	12 °C
hsp1	Varme settpunkt (20-50 °C)	40,0 °C	45,0 °C	43,0 °C
hsp2	Varme settpunkt 2 (20-50 °C)	50,0 °C	50,0 °C	50,0 °C
hsp3	Varme settpunkt 3 (20-55 °C)	50,0 °C	50,0 °C	50,0 °C
cauto_sp	Kjøle settpunkt	23,9 °C	23,9 °C	23,9 °C
hauto_sp	Varme settpunkt	17,8 °C	17,8 °C	17,8 °C
lim_sp1	Grense settpunkt 1	100 %	100 %	100 %
lim_sp2	Grense settpunkt 2	100 %	100 %	100 %
lim_sp3	Grense settpunkt 3	100 %	100 %	100 %
cond_sp	Kond. settpunkt, kond.	40,0 °C	40,0 °C	40,0 °C
SP	Nåværende settpunkt	40,0 °C	45,0 °C	43,0 °C

Tabell 19: Avlesning av varmepumpeaggregatenes elektroniske kontrollsystem, 12. oktober 2019 kl 14.00

Display	Beskrivelse	VP 1	VP 2	VP 3
Driftstid				
hr_mach	Driftstid enhet	14798 t	13 328 t	16 122t
chr_ach	Driftsitd i kjølemodus, enhet	0 t	0 t	0 t
hhr_mach	Driftstid i varmemodus, enhet	0 t	0 t	0 t
st_mach	**Antall start, enhet**	**19 985**	**18 370**	**31 313**
hr_cp_a1	Timer kompressor A1	12 340 t	10 410 t	12 484
st_cp_a1	Antall start kompressor A1	22 652	20 773	32 584
hr_cp_a2	Timer kompressor A2	12 419 t	10 705 t	12 663t
st_cp_a2	Antall start kompressor A2	22 645	20 705	32 566

Tabell 20: Avlesning av varmepumpeaggregatenes elektroniske kontrollsystem, 12. oktober 2019 kl 14.00

G Beregning av graddagstall

Etter ENOVAs bygningstatistikk for 2017 (Enova SF, 2017)

$$E_T = E \times T_{uavh.andel} + E \times T_{avh.andel} \times (\frac{NGT_{Trondheim}}{GT_{Trondheim}}) \tag{1}$$

hvor

E_T	=	Spesifikt tilført temperaturkorrigert energibruk
E	=	Spesifikt tilført energibruk
$T_{uavh.\ andel}$	=	Forbruksandelen som ikke er avhengig av utetemperatur
NGT - Normalgradstall $_{Trondheim}$	=	Nasjonal normalgradstall for Trondheim i perioden 1981-2010
GT - Graddagstall År $_{Trondheim}$	=	Energigradtall i Trondheim for det gitte året som ønskes temperaturkorrigert

Ligning 2 beregner graddagskorrigeringsfaktoren med hensyn kun på temperatur (Pöyry Management Consulting AS, 2014). Et kaldere år, vil gi et høyere graddagstall. Dette vil igjen gi en korrigeringsfaktor mindre enn 1, mens et varmere år og dermed et lavere graddasgtall vil gi en korrigeringsfaktor større enn 1.

$$\text{Graddagstallets korrigeringsfaktor} = \frac{\text{Gradagstall Normalår}}{\text{Gradagstall målt}} \tag{2}$$

Graddagstall hentet fra Enova (Enova SF, 2018)

Måned	$GDT_{normalår}$	GDT_{2016}	GDT_{2017}	GDT_{2018}
Januar	577	648	497	595
Februar	525	508	494	569
Mars	518	446	488	617
April	384	376	397	355
Mai	255	210	250	144
Juni	158	132	131	156
Juli	95	72	88	38
August	116	110	108	108
September	220	139	130	168
Oktober	360	386	302	399
November	472	501	485	420
Desember	565	467	532	533

Tabell 21: Graddagstall per måned for Trondheim

Måned	KF_{2016}	KF_{2017}	KF_{2018}
Januar	0,890	1,161	0,970
Februar	1,033	1,063	0,920
Mars	1,161	1,061	0,840
April	1,021	0,967	1,082
Mai	1,214	1,020	1,770
Juni	1,197	1,206	1,013
Juli	1,319	1,080	2,500
August	1,055	1,074	1,074
September	1,583	1,583	1,310
Oktober	0,932	1,192	0,902
November	0,942	0,973	1,124
Desember	1,210	1,062	1,060

Tabell 22: Korrigeringsfaktor for graddagstall per måned for Trondheim

H Målt varmeleveranse til studentbyen

H.1 Varmeleveranse til varmtvannsberedning

Måned	Varme til varmtvannsberedning [kWh]			
	2016	2017	2018	2019
Januar	-	51 546	67 030	60 581
Februar	-	55 663	57 614	68 946
Mars	-	65 892	61 787	64 876
April	-	46 448	66 776	53 554
Mai	-	55 947	69 337	66275
Juni	550	32 037	38 933	37 038
Juli	4093	19 771	22 113	22 621
August	66 276	49 831	49 489	43 578
September	43 404	60 357	70 400	62 947
Oktober	47 552	71 608	72 411	62 216
November	44 777	51 689	70 935	60 433
Desember	37 911	40 053	54 475	48 803
Totalt	**244 563 kWh**	**600 842 kWh**	**701 298 kWh**	**651 967 kWh**

Tabell 23: Målt energibehov til varmtvannsberedning i de fem boligtårnene og barnehagen ved studentbyen Moholt 50|50

H.2 Varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft

Måned	Varme til oppvarming av ventilasjonsluft [kWh]			
	2016	2017	2018	2019
Januar	-	30 932	31 938	41 221
Februar	-	33 307	32 416	22 484
Mars	-	24 674	35 218	27 291
April	-	10 069	11 362	8813
Mai	-	5148	3189	4537
Juni	550	435	331	177
Juli	4093	243	107	352
August	2124	1175	157	165
September	3503	538	555	725
Oktober	11 974	3821	5887	8327
November	25 134	23 595	15 786	29 957
Desember	24 431	28 871	30 240	20 933
Totalt	**71 810 kWh**	**162 809 kWh**	**167 184 kWh**	**164 982 kWh**

Tabell 24: Målt varmebehov til oppvarming av ventilasjonsluft for boligtårnene, barnehagen og biblioteksbygningen ved studentbyen Moholt 50|50

Bygg	Spesifikk varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft per kvadrat [kWh/(år m^2)]		
	2017	**2018**	**2019**
Tårn A	0,1	0,2	0,2
Tårn B	0,4	0,5	0,6
Tårn C	0,9	0,9	0,9
Tårn D	0,3	0,5	0,5
Tårn E	0,8	0,6	0,5
Gjennomsnitt/ år	**0,5 kWh/m^2**	**0,5 kWh/m^2**	**0,5 kWh/m^2**
Tårn A, legesenter	2,5	0,9	1,7
Tårn B, treningssenter	4,9	4,6	4,2
Tårn C, næring	6,7	1,2	0,1
Tårn D, næring	2,6	2,6	1,3
Tårn E, næring	0	1,0	4,7
Gjennomsnitt/ år	**16,5 kWh/m^2**	**10,2 kWh/m^2**	**12,0 kWh/m^2**
Barnehage nord	1,0	1,2	0,9
Barnehage sør	1,7	1,8	1,5
Gjennomsnitt/ år	**1,3 kWh/m^2**	**1,5 kWh/m^2**	**1,2 kWh/m^2**
Bibliotek	-	-	9,4
Kafe kjøkken	-	-	62,1
Aktivitetsarealer Sit 2. etg	-	-	15,2
Gjennomsnitt/ år	**-**	**-**	**28,9 kWh/m^2**

Tabell 25: Varmeleveranse til oppvarming av ventilasjonsluft per kvadrat for de ulike byggene ved Moholt 50|50

H.3 Varmeleveranse til snøsmelting

Måned	Varme til snøsmelting [kWh]			
	2016	**2017**	**2018**	**2019**
Januar	-	13 407	8458	11 519
Februar	-	12 270	7000	5637
Mars	-	4523	4625	8019
April	-	1422	1049	349
Mai	-	31	0	218
Juni	0	0	0	0
Juli	0	0	0	224
August	0	2	0	205
September	0	0	0	223
Oktober	0	355	1520	1226
November	1169	4401	2663	5896
Desember	8335	11 182	6407	6331
Totalt	**9504 kWh**	**47 593 kWh**	**31 721 kWh**	**39 845 kWh**

Tabell 26: Målt varmeleveranse til snøsmelteanleggene ved nedkjørselen til parkeringskjelleren, barnehagen og aerotemperen i parkeringskjelleren

	Varme til snøsmelting [kWh/(m^2 år)]		
Måned	**Nedkjørsel parkeringskjeller**	**Gangsti og uteområde, barnehage**	**Totalt**
2017	151	227	203
2018	127	112	136
2019	171	163	166
Totalt	**449 kWh/m^2**	**440 kWh/m^2**	**505 kWh/m^2**
Gjennomsnitt/år	**150 kWh/(m^2 år)**	**147 kWh/(m^2 år)**	**168 kWh/(m^2 år)**

Tabell 27: Målt spesifikk varmeleveranse til snøsmelting ved nedkjørselen til parkeringskjelleren og barnehagens gangsti og uteområde

H.4 Varmeleveranse til forvarming av varmt tappevann

Måned	Varme til forvarming av varmt tappevann [kWh]
	2019
Januar	0
Februar	0
Mars	17 274,4
April	8
Mai	14114,5
Juni	11 777
Juli	7894
August	13958
September	18 654
Oktober	9808
November	29 755
Totalt	**123 264 kWh**

Tabell 28: Målt varmeleveranse til forvarming av varmt tappevann til HK21

H.5 Varmeleveranse til varmesentral

Måned	Varmeleveranse fra varmesentral i 2019 [kWh]	
	Varmepumpeaggregater	**Elektrokjel**
Januar	119 160	6532
Februar	110 770	115
Mars	123 993,2	7083
April	69 542	82
Mai	91 590	0
Juni	55 755	425
Juli	37 173	53
August	63 532	1562
September	88 567	377
Oktober	99 120	1110
November	119 461	3781
Desember	107 214,6	445
Totalt	**1 052 190 kWh**	**21 119 kWh**
Totalt varmeleveranse fra varmesentralen = 1 073 753 kWh		

Tabell 29: Målt varmeleveranse fra varmepumpeaggregater og elektrokjel

H.6 Varmeleveranse til varmedistribusjonsnettet til brønnparken

	Tilbakeført varme til brønnparken [kWh]		
Måned	**Varme fra varmegjenvinning av**		**Varme fra**
2019	**avløpsvann**	**ventilasjonsluft**	**solfangeranlegget**
Januar	16 000	0	0
Februar	17 200	0	525
Mars	16 800	100	2157
April	13 200	7940	7545
Mai	14 800	12 496	5072
Juni	10 400	26 819	5661
Juli	6800	30 193	6808
August	10 800	39 794	5695
September	18 000	12 752	3284
Oktober	19 200	25	2561
November	16 800	0	0
Desember	14 000	0	6
Total	**174 000 kWh**	**130 118 kWh**	**39 315 kWh**

Tabell 30: Varme tilbakeført brønnparken fra solfangeranlegget og varmegjenvinning av avløpsvann og ventilasjonsluft i 2019

I Målt, simulert og estimert kjøleleveranse

	Målt, simulert og estimert kjøleleveranse [kWh]			
Måned	**2018**			
	Målt	**Simulert**	**Estimert, 12 °C**	**Estimert**
Januar	0	0	0	0
Februar	0	0	0	0
Mars	0	0	0	0
April	522	0	0	1244
Mai	15 782	979	37 614	37 614
Juni	12 999	5243	30 980	30 980
Juli	41 205	14 676	98 205	98 205
August	28 152	16 969	67 096	67 096
September	17 755	4622	0	42 315
Oktober	1614	37	0	3847
November	397	0	0	1835
Desember	770	0	0	0
Totalt	**119 195 kWh**	**42 525 kWh**	**233 894 kWh**	**284 081 kWh**
Måned	**2019**			
	Målt	**Simulert**	**Estimert 12 °C**	**Estimert**
Januar	0	0	0	0
Februar	0	0	0	0
Mars	100	0	0	238
April	7940	0	0	18 922
Mai	12 406	979	0	29 781
Juni	26 819	5243	63 917	63 917
Juli	30 193	14 676	71 960	71 960
August	39 794	16 969	94 842	94 842
September	12 752	4622		30 392
Oktober	25	37	0	60
November	0	0	0	0
Desember	0	0	0	0
Totalt	**130 118 kWh**	**42 525 kWh**	**230 720 kWh**	**310 113 kWh**

Tabell 31: Målt, simulert og estimert kjøleleveranse for boligtårnene, barnehagen og biblioteksbygningen ved studentbyen Moholt 50|50

J Energidekningsgrad og varmetap i rørnett

Måned	Energidekningsgrad	Tap i rørnett
Januar	94,8 %	0
Februar	99,9 %	4 %
Mars	94,3 %	0 %
April	99,9%	1%
Mai	100 %	1%
Juni	99,2 %	5%
Juli	99,9 %	0,11 %
August	97,5 %	3 %
September	99,6 %	12 %
Oktober	98,9 %	13 %
November	96,8 %	0 %
Desember	99,6 %	0 %
Totalt for 2019	**98 %**	**4 %**

Tabell 32: Målt energidekningsgrad for varmepumpeaggreater og tap i rørnett

K Gjennomsnittstemperatur i brønnpark

Måned	Gjennomsnittstemperatur fra brønnparken [°C]			
	2016	2017	2018	2019
Januar	-	3,9	3,3	3,1
Februar	-	3,2	2,9	3,0
Mars	-	3,8	3,0	3,1
April	-	5,3	4,4	5,3
Mai	-	5,8	6,2	5,6
Juni	-	8,1	7,3	7,5
Juli	-	9,1	9,7	8,5
August	-	8,1	8,5	8,8
September	-	7,9	7,0	6,3
Oktober	5,4	6,1	5,5	4,8
November	4,7	4,2	4,7	3,3
Desember	4,6	3,7	3,9	3,0
Gjennomsnitt	**-**	**5,8 °C**	**5,5 °C**	**5,2 °C**
Måned	**Gjennomsnittstemperatur til brønnparken [°C]**			
Januar	-	-	1,9	1,1
Februar	-	-	1,5	1,3
Mars	-	-	1,5	1,6
April	-	-	3,7	5,1
Mai	-	5,3	5,8	5,1
Juni	-	8,7	7,2	8,1
Juli	-	9,9	10,8	9,4
August	-	8,3	8,5	9,7
September	-	8,2	6,5	5,8
Oktober	-	5,0	4,2	3,8
November	-	2,6	3,0	1,8
Desember	-	2,3	2,1	1,4
Gjennomsnitt	**-**	**-**	**4,7 °C**	**4,5 °C**

Tabell 33: Målt gjennomsnittstemperatur for frostvæsken fra brønnparken og frostvæsken til brønnparken

Måned	Gjennomsnittstemperatur fra varmegjenvinning [°C]			
Måned	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**
Januar	-	-	2,3	1,5
Februar	-	-	1,9	1,8
Mars	-	-	1,8	2,2
April	-	5,1	4,1	5,9
Mai	-	6,0	6,7	6,1
Juni	-	9,7	8,0	9,5
Juli	-	11,1	11,9	10,6
August	-	9,4	9,5	11,3
September	-	9,4	7,4	7,0
Oktober	-	5,7	4,9	4,1
November	-	3,1	3,7	2,3
Desember	-	2,6	2,6	1,8
Gjennomsnitt	**-**	**-**	**5,4 °C**	**5,3 °C**

Tabell 34: Målt gjennomsnittstemperatur for frostvæsken fra varmedistribusjonsnettet til brønnparken; varmegjenvinning fra avløpsvann, ventilasjon og varme fra solfangerene

L Spesifikasjoner, termisk energilager i Emmaboda og Geotermos i Drammen

Spesifikasjoner til de termiske energilageret i Emmaboda i Sverige og det termiske energilageret Geotermos i prosjektet Fjell 2020 i Drammen er presentert i tabell 35.

Beskrivelse	**Brønnparkspesifikasjoner**	
	Emmaboda	**Geotermos**
Start/ Ferdigstilt	ferdigstilt i 2010	startet i 2017
Antall energibrønner	140	52
Gjennomsnittlig brønndybde	ca. 150 m	ca. 50 m
Total brønndybde	ca. 21 00 m	ca. 2 600 m
Berggrunn	Granodioritt	Granitt
Varmeledningsevne	ca. 2,8 og 3,2 W/mK	ca. 3,4 W/mK
Gjennomsnittlig borehullavstand	ca 4 m	ca. 4 m
Kollektortype	Koaksialkollektor	Enkel U-rør (turbokollektor)
Kollektorvæske	Vann	Vann
Borehullkonfigurasjon	Rektangulær (10 x 14)	Sirkulær, d = 16m
Seksjoner/ skall/ celler	7 seksjoner med 20 borehull	14 celler med 2-4 borehull
Indre kjerne	60 borehull	2 borehull
Estimert varmeleveranse til brønnparken		450 MWh/år
Estimert lagringskapasitet	3 800 MWh/år	
Estimert varmetap	1 200 MWh/år	
Temperaturnivå	ca. 40-60 °C	ca. 23-60 °C

Tabell 35: Spesifikasjoner for det termiske energilageret i Emmaboda og det termiske energilageret Geotermos i Drammen (Andersson et al., 2009) (Ramstad, 2017) (Rydell, 2019)

Det termiske energilagert i Emmaboda i Sverige

Det termiske energilageret ved Xylem Water Solution AB i Emmaboda i Sverige ble ferdigstilt i 2010. Xylem produserer senkepumper og gjennom den industrielle produksjonsprosessen oppstår det mye overskuddsvarme. Konseptet for det termiske energisystemet er å benytte overskuddsvarme fra fabrikken som ellers ville blitt gått til spille, til å minimere bruken av fjernvarme til oppvarmingsformål. Overskuddsvarmen brukes enten direkte i varmesystemet eller når behovet til romoppvarming er dekket, leveres varmen til det termiske energilageret. I vintermånedene vil varme fra energilageret sammen med to varmepumpeaggregater levere varme til varmesystemet (Nordell et al., 2015).

Borehullene er koblet parallelt i 7 seksjoner med 20 borehull. Energilageret har en indre kjerne med 60 brønner, vist i seksjon C, D og E i figur 5.46. I tillegg er det boret to

testborehull GT1/2 og GT3, henholdsvis plassert inne i og rett utenfor energilageret.

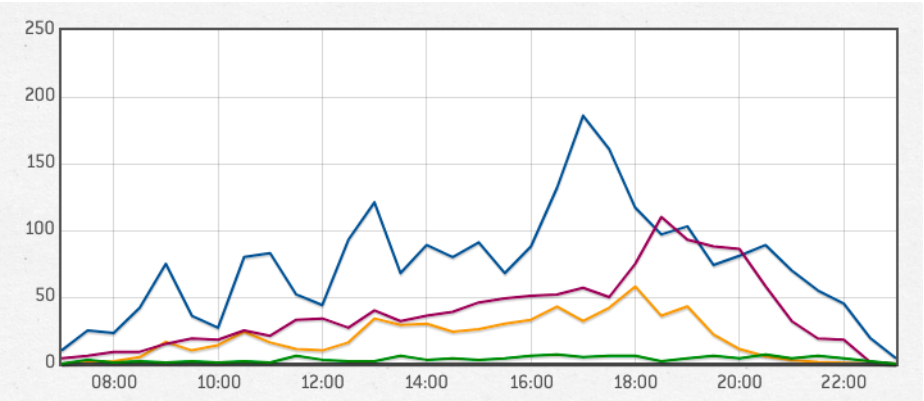
Geotermos i prosjektet Fjell 2020 i Drammen

Drammen Eiendom KF, Drammen kommunes eiendomsforvalter, startet høsten 2017 byggingen av prosjektet Fjell 2020 med ny skole, kulturhall og aktivitetshus som er lavenergibygg med behovsstyrte lavtemperatur varme og ventilasjonssystemer (Drammen Kommune, 2019). Hovedkonseptet for varme- og kjøleleveranse til byggene er et termisk energisystem som lagrer varme i borehull i fjell ved å tilbakeføre varme fra solenergi og en CO_2 varmepumpe i sommer- og høstmånedene. Varmen lagret i borehullene vil hentes opp i vintermånedene og ved behov for deretter å brukes direkte i lavtemperatur varmedistribusjonsanlegget til bygningene.

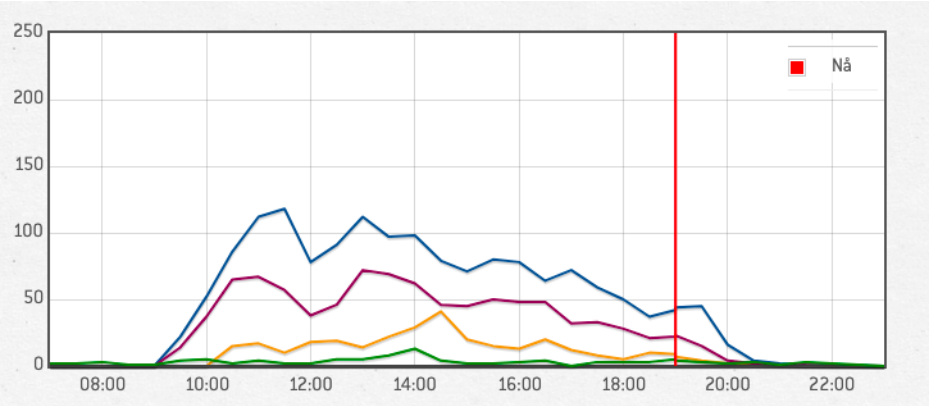
To og to brønner er koblet i serie, hvor ei celle utgjør maksimalt fire brønner hvor to seriekoblede brønner er koblet i parallell. De ulike skallene delt inn i temperatursoner. De to inneste borehullene er prosjektert til å holde høyest temperatur, opp mot 50-60 °C, og vil brukes direkte til ventilasjons- og gulvoppvarmming. Temperaturen er prosjektert til å synke ned til omtrent 23 °C utover til det ytterste skallet, og vil kunne brukes indirekte via CO_2 varmepumpen.

I tillegg har brønnparken 15 dype energibrønner på 280 meter. Disse brønnene vil være knyttet til energisentralen for frikjøling og for å kunne brukes som varmekilde for CO_2 varmepumpen i perioder det er ønskelig å supplere varmeproduksjonen.

M Pågang SiT treningssenter i boligtårn B



Figur 16: Besøksstatistikk for treningssenteret i boligtårn B, onsdag i uke 2 2020 (Sit, 2019)



Figur 17: Besøksstatistikk for treningssenteret i boligtårn B, lørdag uke 2 2020 (Sit, 2019)

N SCOP beregninger

Beregning av SCOP:

Tid	Varme produsert VP	El tilført VP	El tilført VP2	El tilført VP	El tilført pumpe	Kjøling tårn E	Kjøling total
01.09.2018	75550,00	3825,80	3776,10	15422,00	3495,00	3550,90	17754,50
01.10.2018	90070,00	5541,40	5656,20	17051,70	2955,00	322,80	1614,00
01.11.2018	95970,00	6535,20	7097,70	16819,30	2801,00	79,40	397,00
01.12.2018	97510,00	6368,70	6912,80	17665,60	0,00	154,00	770,00
01.01.2019	119160,00	10170,90	10972,70	19045,70	3800,00	0,00	0,00
01.02.2019	110770,00	10125,50	10490,70	17257,00	3319,00	0,00	0,00
01.03.2019	116910,00	17118,30	18068,80	2722,40	4150,00	20,00	100,00
01.04.2019	69460,00	13828,50	10471,50	10,80	2564,00	1587,90	7939,50
01.05.2019	91590,00	19110,10	10655,80	0,00	2908,00	2499,10	12495,50
01.06.2019	55330,00	13782,20	3313,00	5,40	2465,00	5363,70	26818,50
01.07.2019	37120,00	10994,00	28,50	12,40	2518,00	6038,60	30193,00
01.08.2019	61970,00	17732,20	26,00	14,20	2976,00	7958,80	39794,00
01.09.2019	88190,00	964,40	17207,00	8100,00	3029,00	2550,40	12752,00
01.10.2019	98010,00	11335,10	10245,70	7591,80	4188,00	0,00	0,00

Tid	SCOP 1, Varme	SCOP2, Varme	SCOP1, v + k	SCOP2, v + k
01.09.2018	3,28	2,85	4,05	3,52
01.10.2018	3,19	2,89	3,25	2,94
01.11.2018	3,15	2,89	3,16	2,90
01.12.2018	3,15	3,15	3,18	3,18
01.01.2019	2,96	2,71	2,96	2,71
01.02.2019	2,92	2,69	2,92	2,69
01.03.2019	3,08	2,78	3,09	2,78
01.04.2019	2,86	2,58	3,18	2,88
01.05.2019	3,08	2,80	3,50	3,19
01.06.2019	3,24	2,83	4,80	4,20
01.07.2019	3,36	2,74	6,10	4,97
01.08.2019	3,49	2,99	5,73	4,90
01.09.2019	3,36	3,01	3,84	3,45
01.10.2019	3,36	2,94	3,36	2,94

Tid	Kjøling es. 12°C	Kjøling es.	SCOP1, v+k, es. 12°C	SCOP2,v+k, es. 12°C	SCOP1,v+k, es.	SCOP2,v+k, es.
01.09.2018	0,00	42314,89	3,28	2,85	5,12	4,44
01.10.2018	0,00	3846,70	3,19	2,89	3,32	3,01
01.11.2018	0,00	946,18	3,15	2,89	3,18	2,91
01.12.2018	0,00	1835,17	3,15	3,15	3,21	3,21
01.01.2019	0,00	0,00	2,96	2,71	2,96	2,71
01.02.2019	0,00	0,00	2,92	2,69	2,92	2,69
01.03.2019	0,00	238,33	3,08	2,78	3,09	2,79
01.04.2019	0,00	18922,48	2,86	2,58	3,64	3,29
01.05.2019	0,00	29780,94	3,08	2,80	4,08	3,71
01.06.2019	63917,43	63917,43	6,97	6,09	6,97	6,09
01.07.2019	71959,98	71959,98	9,88	8,05	9,88	8,05
01.08.2019	94842,37	94842,37	8,82	7,56	8,82	7,56
01.09.2019	0,00	0,00	3,36	3,01	3,36	3,01
01.10.2019	0,00	0,00	3,36	2,94	3,36	2,94

Figur 18: SCOP beregninger i excel

O Beregninger av energibruk til belysning og teknisk utstyr fra SN/TS3031:2016

For å finne det teoretiske energibruket til teknisk utstyr og belysning er tabell A.3 og A.6 i SN/TS 3031:2016 Bygningers energiytelse. Beregning av energibehov og energiforsyningbrukt Standard Norge (2016). Tallene er puttet inn i tabell 36 og tabell 37 i kolonnene [Wh/m^2]. Videre er det ved bruk av tabell 2, regnet ut det totale energiforbruket per døgn for de ulike bygningstypene.

Boligtårnene fra 2-9. etasje er beregnet i kolonne boligblokk", barnehagen i kolonne bbarnehage"og næringsarealene i 1. etasje samt bibliotek og aktivitetshus i kolonne næringsbygg". Dette gir en estimert verdi av hva det totale strømforbruket til belysning og teknisk utstyr i studentbyen vil kunne være.

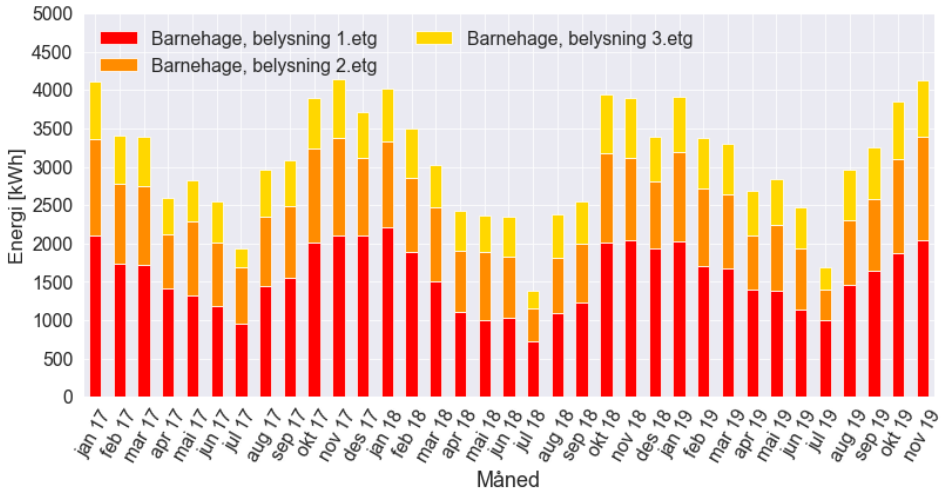
Tid	Belysing					
	Boligblokk		Barnehage		Næringsbygg	
	[Wh/m^2]	[kWh]	[Wh/m^2]	[kWh]	[Wh/m^2]	[kWh]
00-01	0	0	0	0	0	0
01-02	0	0	0	0	0	0
02-03	0	0	0	0	0	0
03-04	0	0	0	0	0	0
04-05	0	0	0	0	0	0
05-06	1,84	31,8	0	0	0	0
06-07	1,84	31,8	0	0	0	0
07-08	1,84	31,8	10,10	22,6	0	0
08-09	1,84	31,8	10,10	22,6	0	0
09-10	1,84	31,8	10,10	22,6	0	0
10-11	1,84	31,8	10,10	22,6	8,85	25,7
11-12	1,84	31,8	10,10	22,6	8,85	25,7
12-13	1,84	31,8	10,10	22,6	8,85	25,7
13-14	1,84	31,8	10,10	22,6	8,85	25,7
14-15	1,84	31,8	10,10	22,6	8,85	25,7
15-16	1,84	31,8	0	0	8,85	25,7
16-17	1,84	31,8	0	0	8,85	25,7
17-18	1,84	31,8	0	0	8,85	25,7
18-19	1,84	31,8	0	0	8,85	25,7
19-20	1,84	31,8	0	0	8,85	25,7
20-21	1,84	31,8	0	0	0	0
21-22	1,84	31,8	0	0	0	0
22-23	1,84	31,8	0	0	0	0
23-24	0	31,8	0	0	0	0
t/d	17		8		10	
Totalt/ dag	31,28	541,1	80,80	181,2	88,50	-

Tabell 36: Beregning av energibruk til belysning

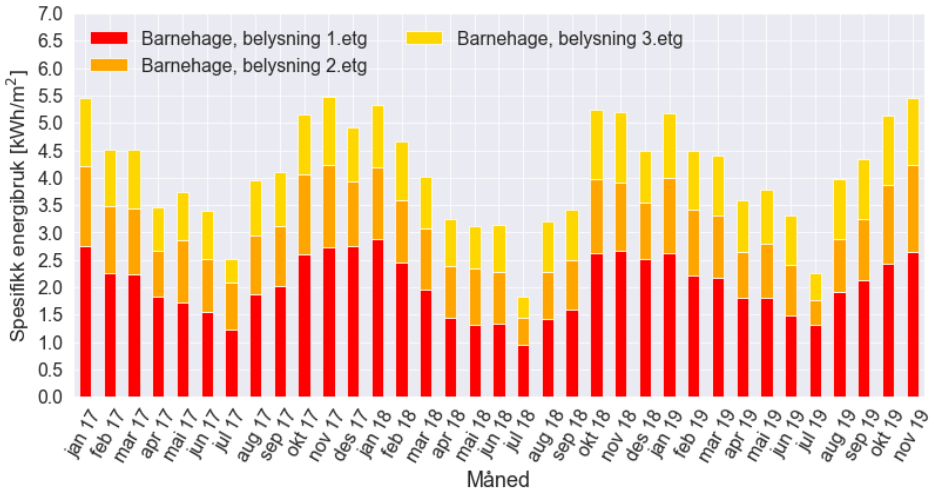
Tid	Teknisk utstyr					
	Boligblokk		Barnehage		Næringsbygg	
	[Wh/m^2]	[kWh]	[Wh/m^2]	[kWh]	[Wh/m^2]	[kWh]
00-01	0,96	16,6	0	0	0	0
01-02	0,96	16,6	0	0	0	0
02-03	0,96	16,6	0	0	0	0
03-04	0,96	16,6	0	0	0	0
04-05	0,96	16,6	0	0	0	0
05-06	0,96	16,6	0	0	0	0
06-07	0,96	16,6	0	0	0	0
07-08	0,96	16,6	1,92	4,3	0	0
08-09	1,92	33,2	1,92	4,3	0	0
09-10	0,96	16,6	1,92	4,3	0	0
10-11	0,96	16,6	2,88	6,5	0,77	2,2
11-12	0,96	16,6	2,88	6,5	0,77	2,2
12-13	0,96	16,6	2,88	6,5	2,05	6,0
13-14	0,96	16,6	1,92	4,3	2,05	6,0
14-15	1,92	33,2	2,88	6,5	0,77	2,2
15-16	3,37	58,3	0	0	0,77	2,2
16-17	4,33	74,9	0	0	2,05	6,0
17-18	4,33	74,9	0	0	2,05	6,0
18-19	4,33	74,9	0	0	0,77	2,2
19-20	3,85	66,6	0	0	0,77	2,2
20-21	3,85	66,6	0	0	0	0
21-22	3,37	58,3	0	0	0	0
22-23	2,40	41,5	0	0	0	0
23-24	0,96	16,6	0	0	0	0
t/d	24		8		10	
Totalt/ dag	48,07	831,6	19,20	43,1	12,82	-

Tabell 37: Beregning av energibruk til tenkisk utstyr

I barnehagen, biblioteket, kafeen og aktivitetsarealene i 2. etasje er det installert energimålere for elektrisitet til belysning.

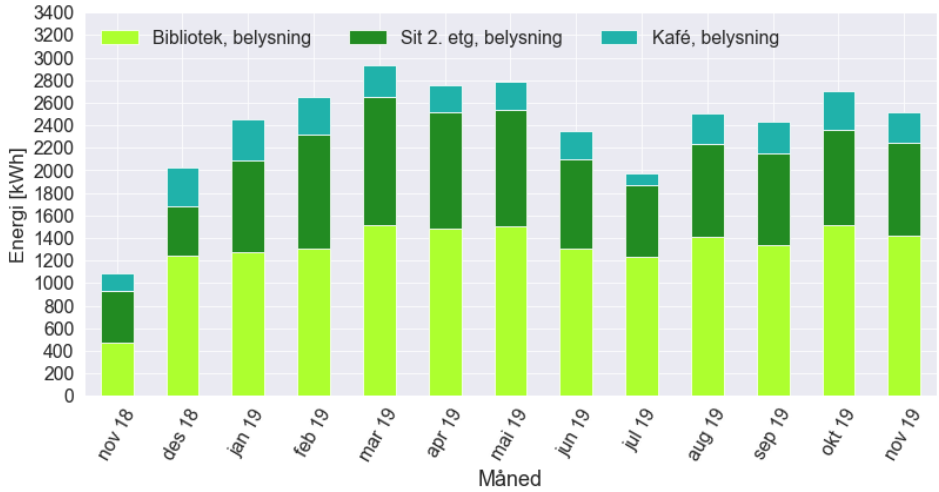


Figur 19: Målt elektrisk forbruk til belysning for barnehagen

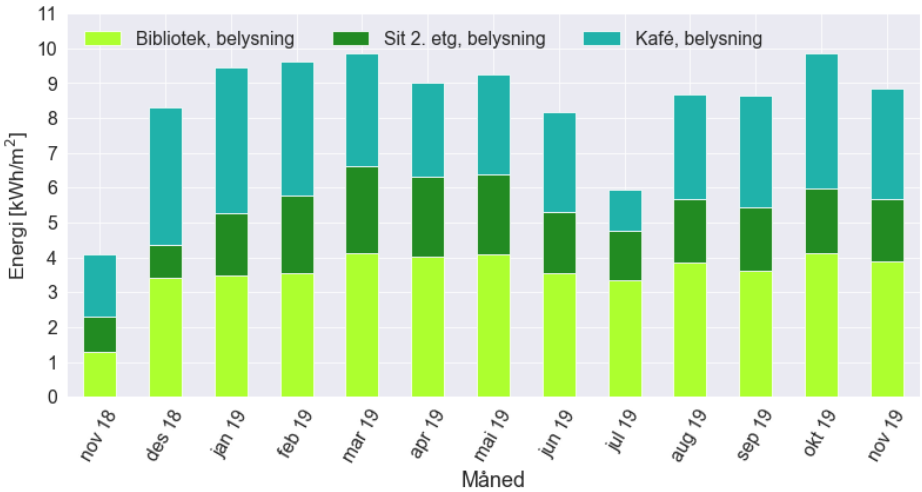


Figur 20: Målt spesifikt elektrisk forbruk til belysning for barnehagen

Det er koblet noen utelys på energimåleren som måler el. forbruket til første etasje i barnehagen. Det er høyst sannsynlig at dette er årsaken til det høyere forbruket i første etasje.



Figur 21: Målt elektrisk forbruk til belysning for biblioteket, kafeen og aktivitetsarealene i 2. etasje



Figur 22: Målt spesifikt elektrisk forbruk til belysning for biblioteket, kafeen og aktivitetsarealene i 2. etasje

Elektrisitetsforbruket til belysning i barnehagen er målt fra 1. januar 2017 til og med 31. november 2019. Biblioteketsbygget ble åpnet for drift 3. desember 2018, men elektrisitetsforbruket til belysning er målt fra 1. november 2018 til og med 31. november 2019. Både grafene over og tabellen under viser elektrisitetsforbruket til belysning henholdsvis per måned og per år. Tabellene og beregningene gjort basert på standardverdier i SN/TS 3021:2016 er presentert i tabellen under for å kunne sammenligne verdiene. Da bibliotek

ikke sto som eget punkt i standarden er det brukt standardverdier for næringsbygg.

Det antas at barnehagen holder stengt i helger, på helligdager og holder 3 uker sommerstengt, noe som gir 238 driftsdager. Biblioteket antas å holde stengt søndager og helligdager, som gir 303 driftsdager i året. Det beregnede el. forbruket til belysning er presentert i tabell 38.

Beskrivelse	Beregnet el.forbruk [kWh] [kWh]	Målt el.forbruk [kWh]		
		2017	2018	2019
Barnehage, belysning 1.etg	-	19 647,4	17 809,5	17 351,0
Barnehage, belysning 2.etg	-	11 927,3	10 520,6	10 228,9
Barnehage, belysning 3.etg	-	7063,0	6924,3	6897,3
Barnehage, total	**43 126**	**38 637,7**	**35 254,4**	**34 477,2**
Bibliotek, belysning	-	-	1720,2	15305,5
Kafé, belysning	-	-	500,3	2978,2
Sit 2.etg, belysning	-	-	893,7	9757,0
Biblioteksbygg, total	**26 816**	**-**	**3114,2**	**28 040,7**

Tabell 38: Beregnet elektrisk forbruk til belysning i barnehagen og biblioteksbygningen

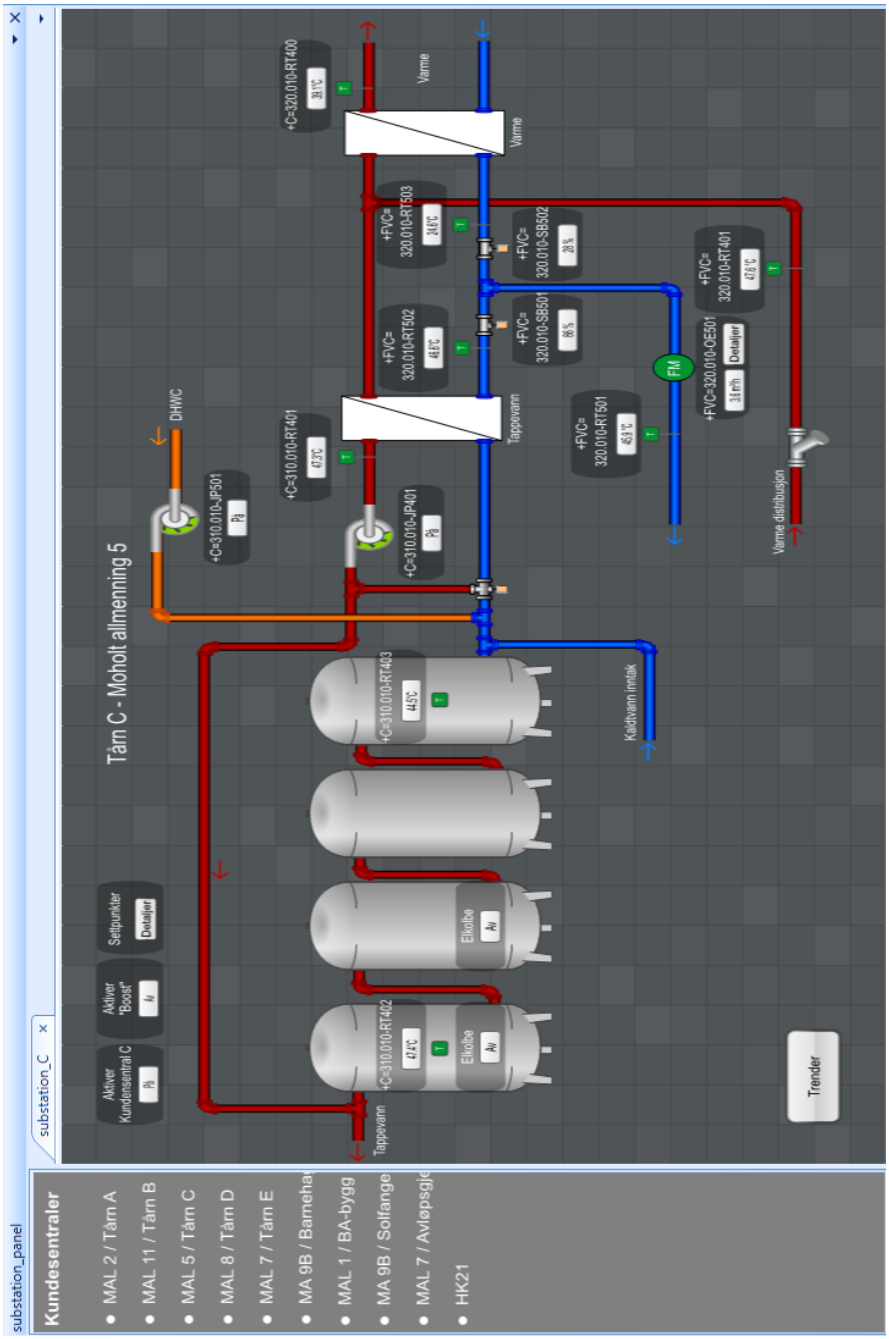
El. forbruket til belysning i barnehagen ligger mellom 81,7 % - 89,6 % av de beregnede verdiene basert på standarden SN/TS 3021:2016. Fra januar til og med november 2019 er el. forbruket til beslysning i biblioteket 104,6 % av den beregnede verdien.

Beregnet el. forbruk til studentarealene og næringsdelen i boligtårnene er gitt i tabellen under. De beregnede verdiene er basert på standardverdier fra SN/TS 3021:2016. Det er i denne beregningen antatt at studentene er i boligtårnene 365 dager i året, mens næringslokalene har stengt 52 søndager og 10 helligdager, som gir 303 driftsdager. Dette gir kun et estimat, da treningssenteret har åpent hver dag, mens legesenteret har stengt både lørdag og søndag.

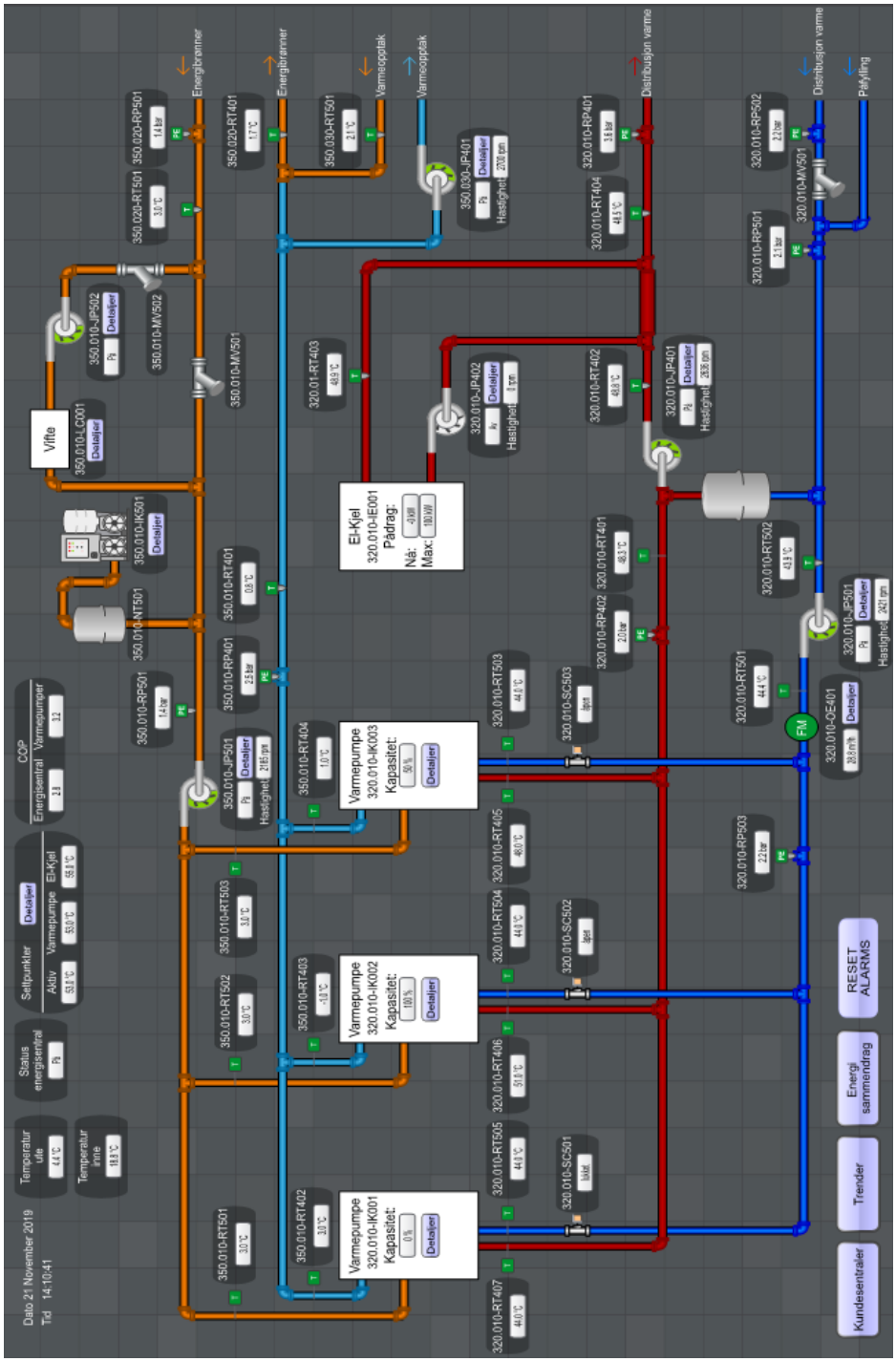
Beskrivelse	Areal	Beregnet el.forbruk [kWh]
Tårn A-E, belysning	17 300	197 518
Tårn A-E, teknisk utstyr	17 300	312 311
Tårn A-E, totalt		**509 829**
Tårn A-E, totalt per tårn		**101 966**
Tårn A-E - næringsdel, belysning	1900	50 950
Tårn A-E - næringsdel, teknisk utstyr	1900	9256
Tårn A-E- næringsdel, totalt		**60 206**
Tårn A-E- næringsdel, totalt per tårn		**12 041**

Tabell 39: Beregnet elektrisk forbruk til belysning i hybel- og næringsarealene i boligtårnene

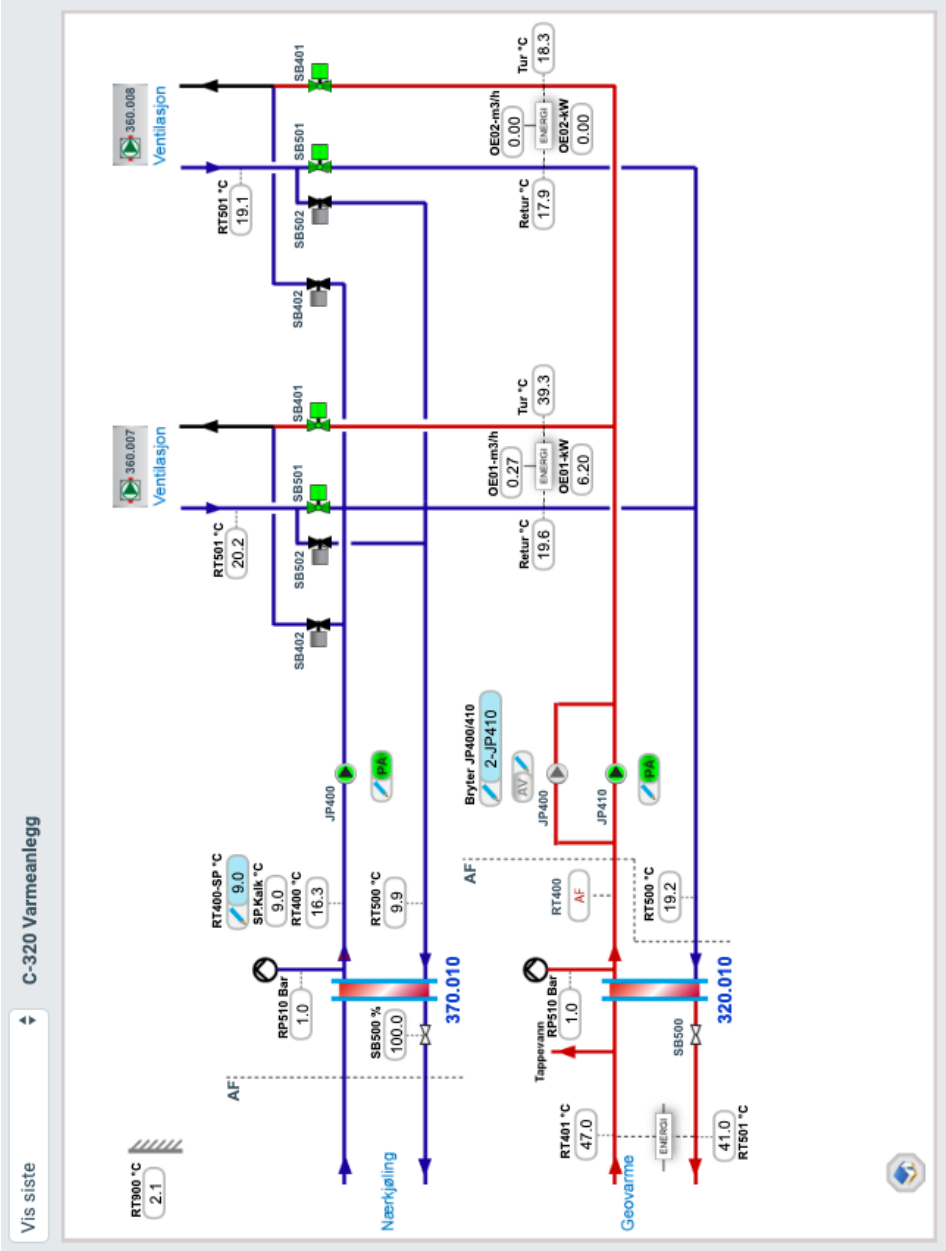
P Bilder fra SD-anleggene



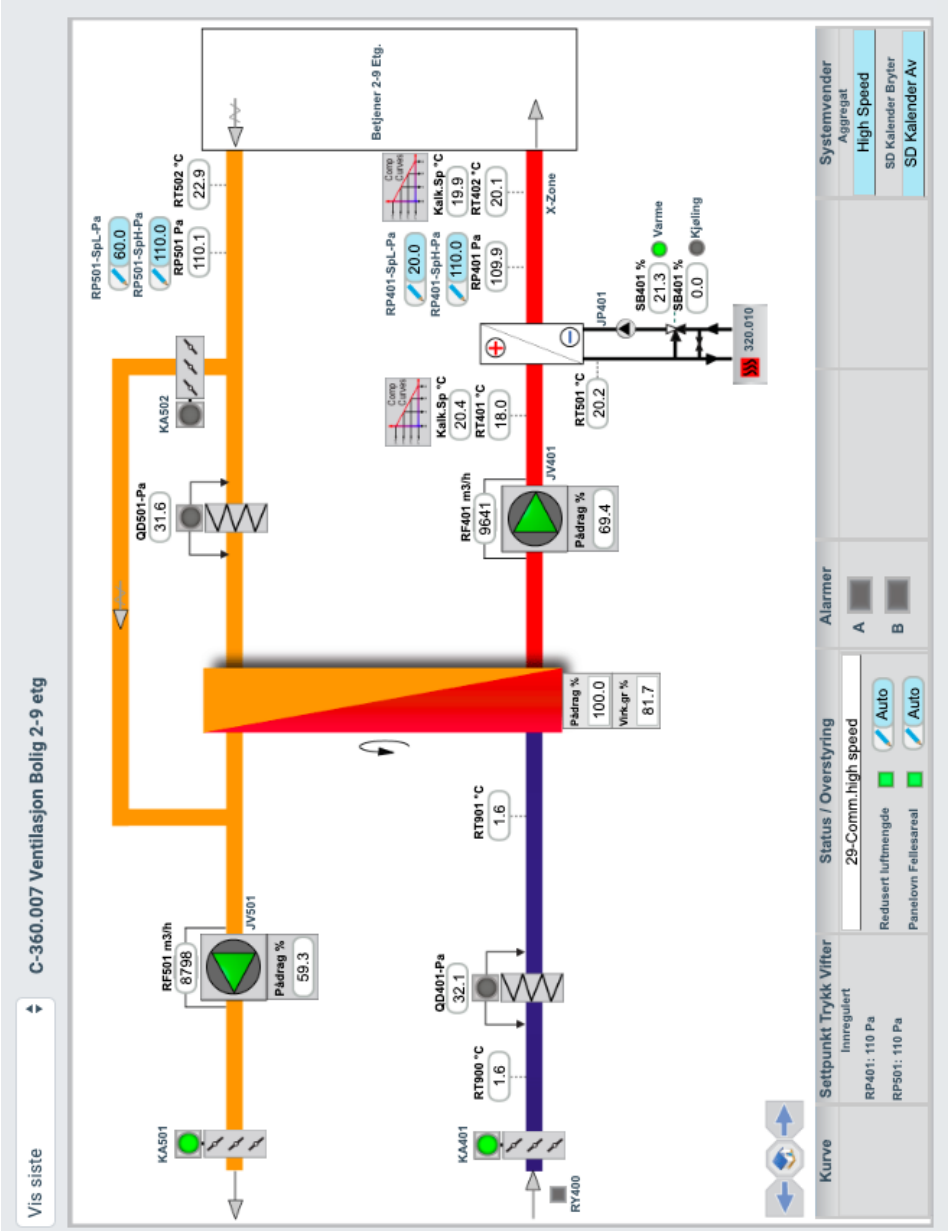
Figur 23: Bilde av undersentralen i Tårn C i SD-anlegget levert av Sneider



Figur 24: Bilde av varmesentralen i SD-anlegget levert av Sneider



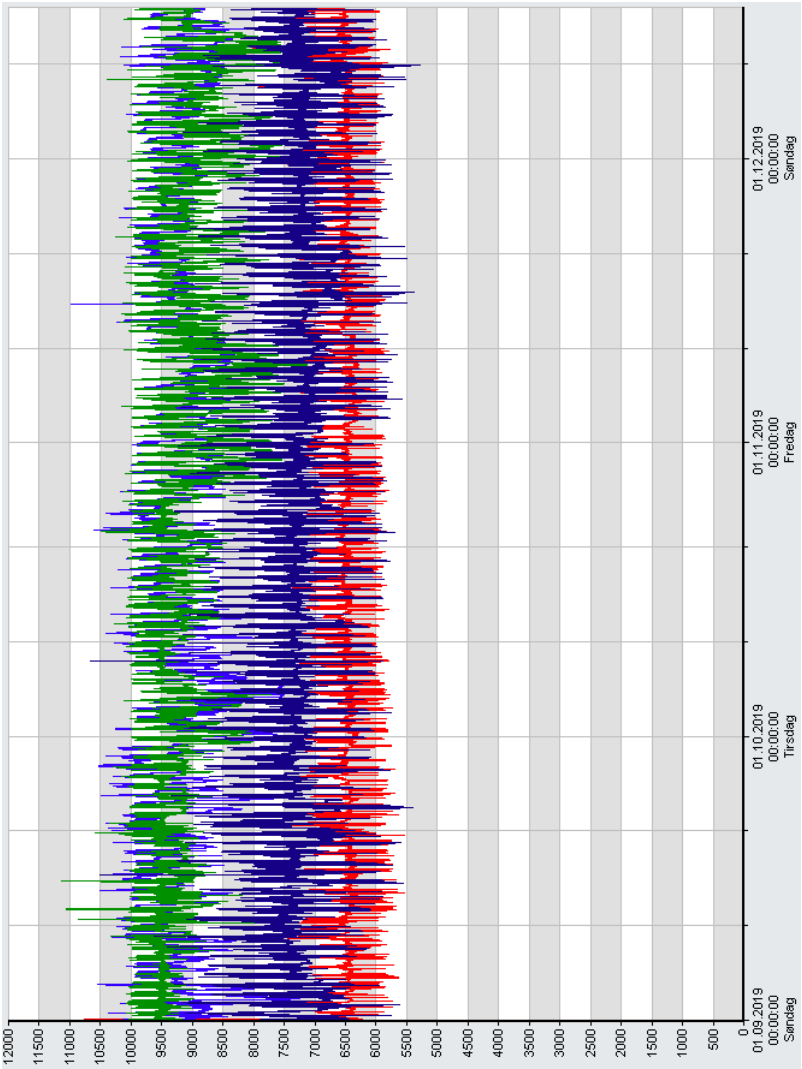
Figur 25: Bilde av undersentalen i SD-anlegget levert av IWMAC



Figur 26: Bilde av undersentalen i SD-anlegget levert av IWMAC

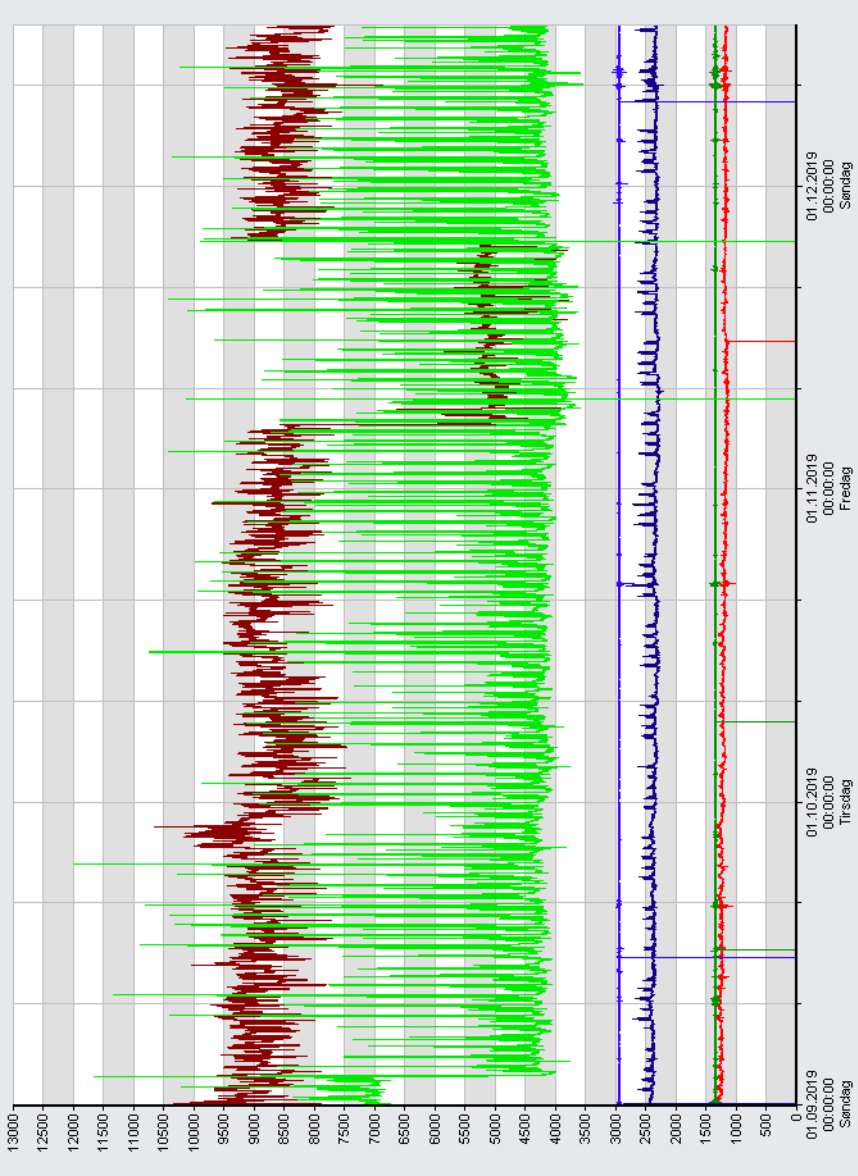
Q Målte luftmengder i boligtårnene, næringsarealene, barnehagen og biblioteket

Målte luftmengder for boligtårnene A, C, D og E i perioden 1. september 2019 til 17. desember 2019: Gjennomsnittlige luftmengder for boligtårn A (rød), C (lys blå), D (grønn) og E (mørk blå) er henholdsvis ca. 6500 m^3, 9000 m^3, 9000 m^3, 9000 m^3 og 7500 m^3. Figurene som viser de målte luftmengdene er utklipp tatt fra undersentralenes SD-anlegg.



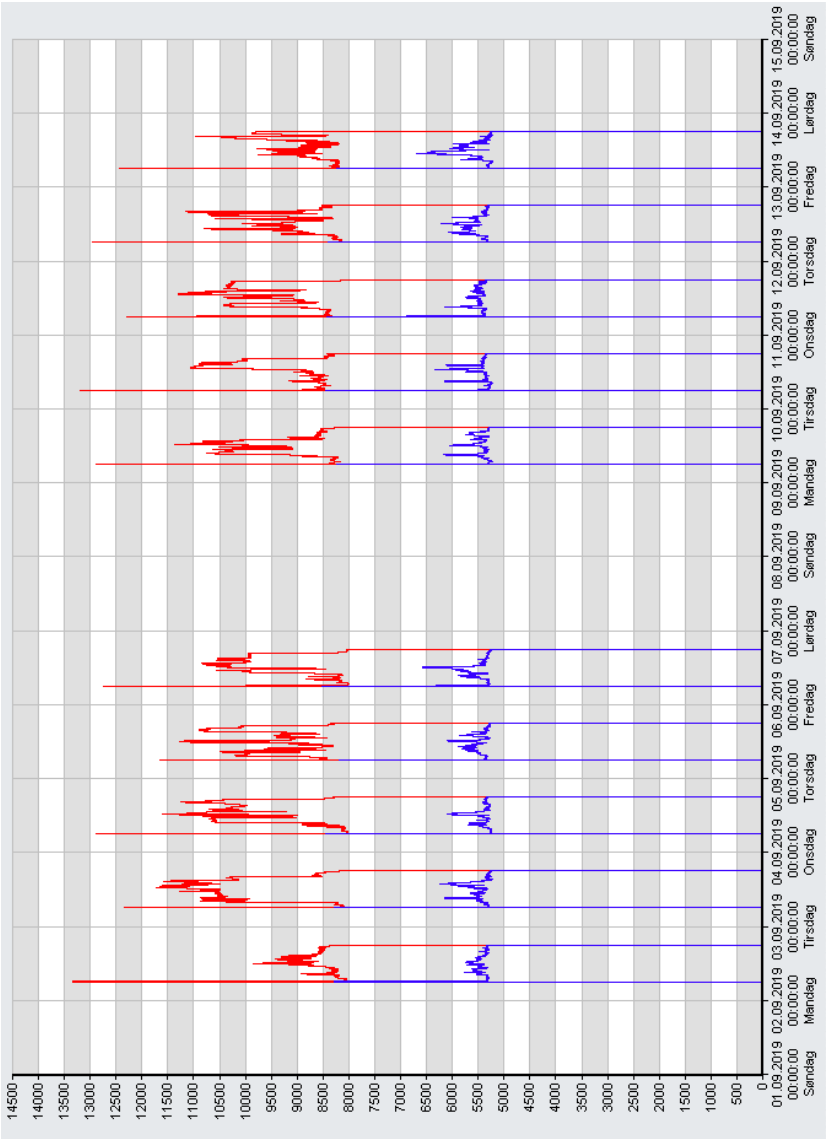
Figur 27: Utklipp fra undersentralens SD-anlegg som viser luftmengder for hybelarealene i boligtårn A, C, D og E

Målte luftmengder for boligtårn B og næringsarealene i alle boligtårnene perioden 1. september 2019 til 17. desember 2019. Gjennomsnittlige luftmengder for næringarealene i boligtårn A (mørk blå), B bolig (mørk rød), B næring (lys grønn), C (rød), D (lys blå) og E (mørk grønn) er henholdsvis ca. 2400 m^3, 9000 m^3, 1250 m^3, 3000 m^3 og 1400 m^3.



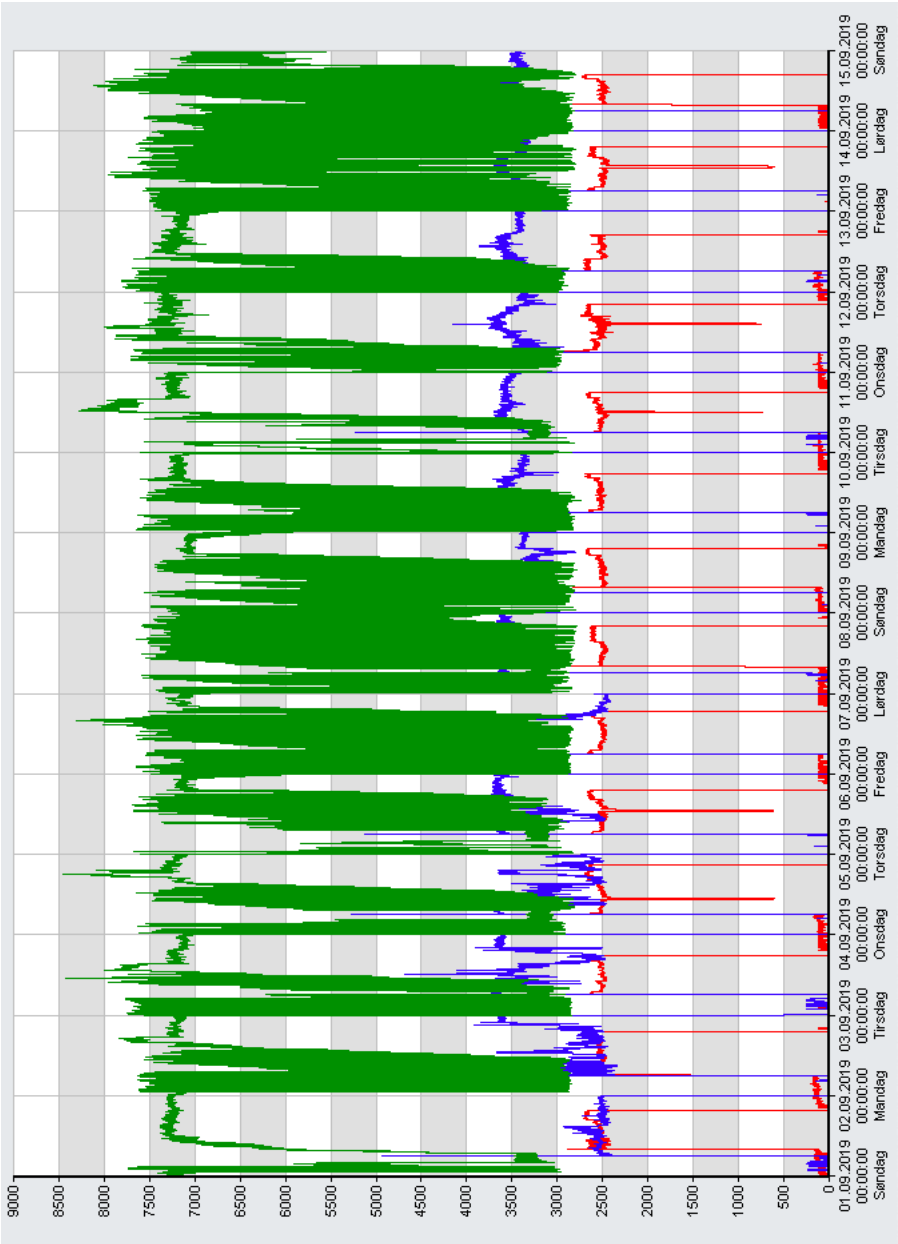
Figur 28: Utklipp fra undersentralens SD-anlegg som viser luftmengder for hybelarealene i boligtårn B og næringsarealene i boligtårn A, B, C, D og E

Målte luftmengder for barnehagen i alle boligtårnene perioden 1. september 2019 til 15. september 2019. For å få leselige utklipp fra SD-anlegget er det valgt å vise en luftmengder i en kortere periode for barnehagen og biblioteksbygningen enn for boligtårnene. Gjennomsnittlige luftmengder for barnehagen nord (rød) og barnehage sør (blå) henholdsvis ca. 9500 m^3 og 5500 m^3.



Figur 29: Utklipp fra undersentralens SD-anlegg som viser luftmengder for barnehagens søndre og nordre del

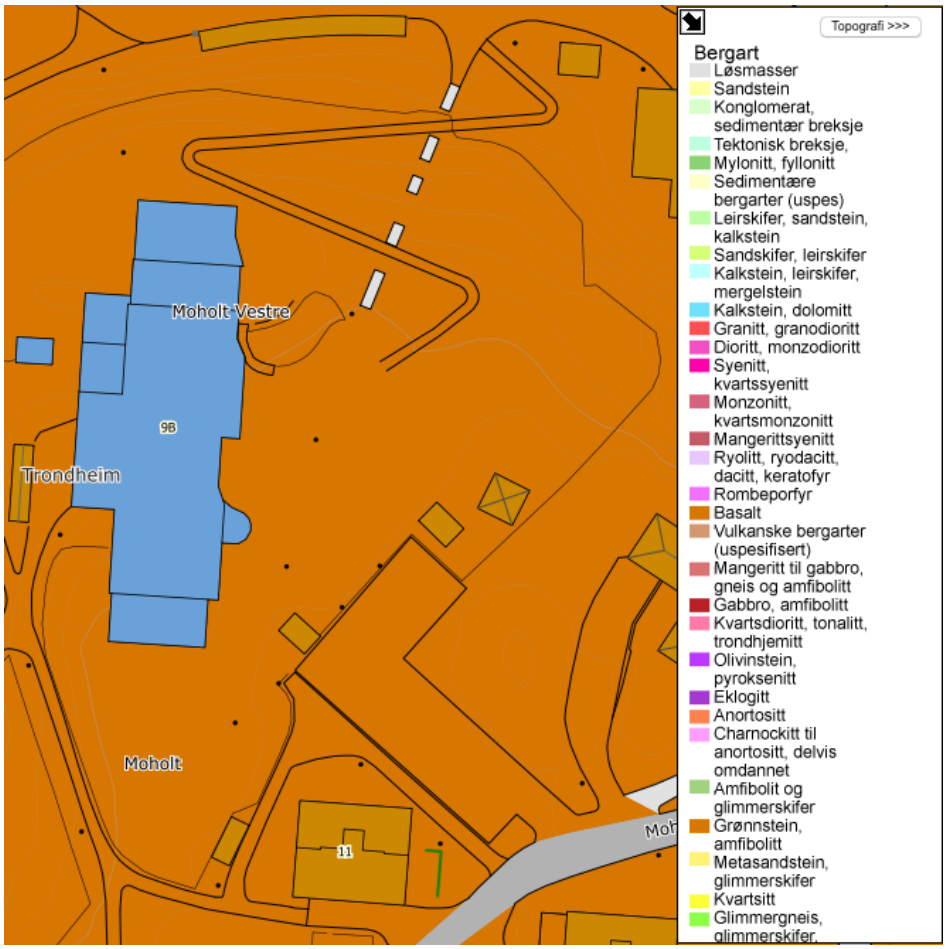
Målte luftmengder for biblioteksbygningen perioden 1. september 2019 til 15. september 2019. Gjennomsnittlige luftmengder for biblioteket plan 1 (blå), plan 2 (grønn) og kjøkkenet (rød) er henholdsvis ca. 5500 m^3, 3200 m^3 og 2500 m^3.



Figur 30: Utklipp fra undersentralens SD-anlegg som viser luftmengder for bibliotekbygningens plan 1, plan 2 og kjøkken

R Earth Energy Designer (EED)

Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) har flere databaser som beskriver ulike bergarter i berggrunnen. For Moholt 50|50, hvor Moholt barnehage er markert i blått, er brønnparken plassert i et område som har grønnstein og amfibolitt som hovedbergart (NGU, 2019b) (NGU, 2019a).



Figur 31: Utklipp fra NGU som viser bergartene i området rundt brønnparken ved Moholt 50|50

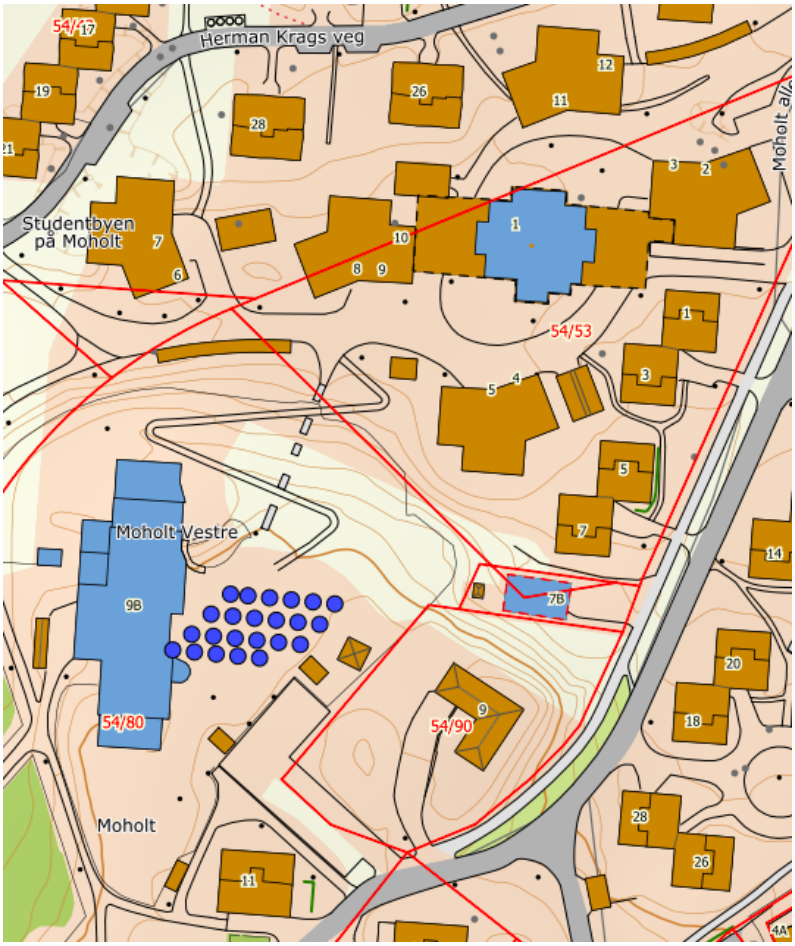
#	Bergartsbeskrivelse	Dekkeenhet	Geologisk gruppe	Geologisk formasjon
1	Grønnstein (metabasalt) og grønnskifer udifferensiert. Hovedsakelig deformert putelava med enkelte lag av sur lava, kiselstein, tuffitt, gjennomsatt av diabasganger, særlig i den vestre delen			

Figur 32: Utklipp fra NGU som beskriver bergartene i området rundt brønnparken ved Moholt 50|50

#	Hovedbergart	Bergart
1	Grønnstein, amfibolitt	Grønnstein og grønnskifer med lag av kvartskeratofyr

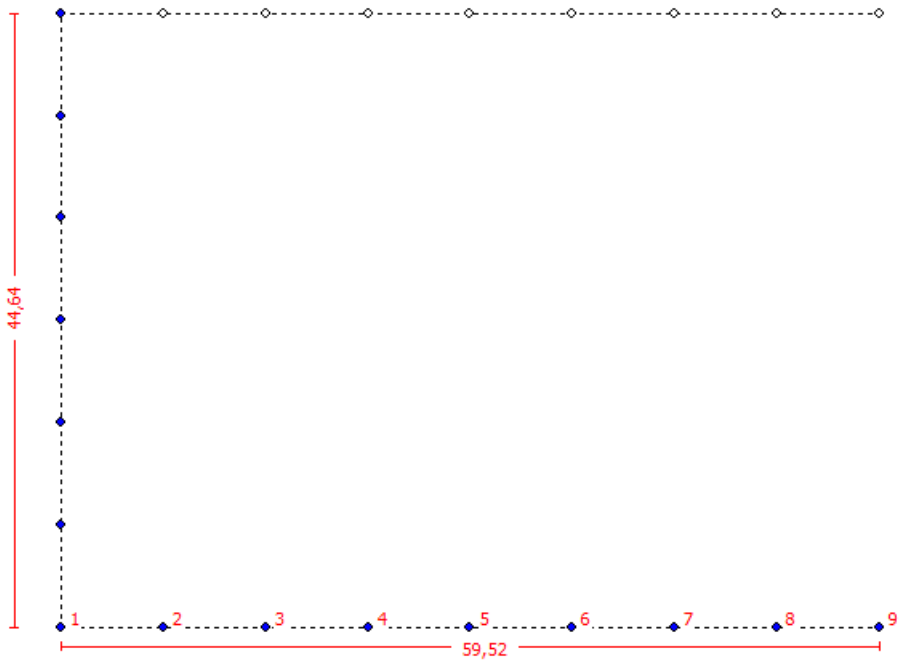
Figur 33: Utklipp fra NGU som beskriver hovedbergarten i brønnparken ved Moholt 50|50

Forenklet oversikt over brønnparken ved Moholt 50|50, studenttårnene, Moholt barnehage og bilioteksbygningen hentet fra NGUs nasjonale grunnvannsdatabase, GRANADA (NGU, 2019c).



Figur 34: Utklipp fra NGU som viser en forenkelt oversikt over brønnparken ved Moholt 50|50

En forenklet brønnparkkonfigurasjon basert på koordinatene til brønnparken ved Moholt 50|50 er presentert i figuren under. Konfigurasjonen er i u-formasjon med 23 brønner og har dimensjon 59,52 m x 44,64 m.



Figur 35: Borehullskonfihurasjon i EED

```
QUICK FACTS
  Cost                                          -
  Number of boreholes                           23
  Borehole depth                                250 m
  Total borehole length                         5750 m


                D E S I G N    D A T A
                =====================

GROUND

  Ground thermal conductivity                   4 W/(m·K)
  Ground heat capacity                          2,1 MJ/(m³·K)
  Ground surface temperature                    7,35 °C
  Geothermal heat flux                          0 W/m²

BOREHOLE

  Configuration:                                145 ("23 : 7 x 9 U-configuration")
  Borehole depth                                250 m
  Borehole spacing                              7,44 m
  Borehole installation                         Single-U
  Borehole diameter                             114 mm
  U-pipe diameter                               40 mm
  U-pipe thickness                              2,4 mm
  U-pipe thermal conductivity                   0,42 W/(m·K)
  U-pipe shank spacing                          57 mm
  Filling thermal conductivity                  0,6 W/(m·K)
  Contact resistance pipe/filling               0 (m·K)/W

THERMAL RESISTANCES

  Borehole therm. res. fluid/ground             0,12 (m·K)/W
  Borehole therm. res. internal                 0,5 (m·K)/W
  Internal heat transfer between upward and downward channel(s) is considered.

HEAT CARRIER FLUID

  Thermal conductivity                          0,432 W/(m·K)
  Specific heat capacity                        4297,6 J/(Kg·K)
  Density                                       970,5 Kg/m³
  Viscosity                                     0,00449 Kg/(m·s)
  Freezing point                                -14,6 °C
  Flow rate per borehole                        0,6 l/s
```

Figur 36: Inndata til brønnparken for simuleringer i EED

S Dimensjoner varmeopptaks- og kjølenett og koordinater

Dimensjoner for varmeopptaks- og kjølenettet, distribusjonsnettet og kommentarer til figur 2.5 (AF Gruppen, 2015c).

	Distribusjonsnett	**Varmeopptaksnett**
Rørstrekk	**Dimensjon**	**Dimensjon SDR17**
1	DN100/225	PE110
2	DN80/180	PE90
3	DN65/160	PE90
4	DN40/125	PE63
5	DN32/125	PE75
6	DN50/140	PE40
7	DN65/160	PE75
8	DN65/160	PE63
9	DN50/140	PE63
10	DN40/125	PE40
11	DN32/125	PE40
12	DN50/140	PE40
13	DN40/125	PE50
14	DN65/160	PE75
15	DN65/160	
16		PE90
		Brønnpark
18		PE125/140
19		PE160/180
20		PE160/180
Kommentarer		
Note 1	Fjernvarmerør avsluttet i kum med stengeventiler og bypass	
Note 2	Vertikalt slag ned til innstikk tårn B	
Note 3	Rørføring innvendig under tak i parkeringskjeller	
Note 4	Innstikk til barnehage, bygget 2015	

Tabell 40: Rørdimensjoner for varmedistribusjonsnettet

Koordinatene til brønnparkkonfigurasjonen (AF Gruppen, 2015c):

Brønnpark koordinater			
Euref 89 NTM, høyder NN200			
Nr	x	y	z
1	1602874.148	96593.836	121.697
2	1602868.257	96587.784	123.468
3	1602869.595	96605.051	122.046
4	1602865.644	96618.445	121.462
5	1602869.658	96582.907	122.952
6	1602864.328	96583.296	123.650
7	1602860.496	96605.652	123.329
8	1602857.479	96578.167	124.352
9	1602858.720	96592.129	123.740
10	1602855.902	96616.646	122.068
11	1602852.114	96618.648	122.592
12	1602850.351	96571.420	125.014
13	1602830.118	96570.819	124.968
14	1602842.851	96574.411	125.239
15	1602839.179	96593.264	125.105
16	1602822.643	96581.801	125.208
17	1602800.261	96544.579	123.093
18	1602805.407	96558.766	124.535
19	1602804.451	96579.021	125.389
20	1602794.221	96546.419	123.223
21	1602787.154	96552.616	123.997
22	1602789.099	96566.030	124.778
23	1602780.693	96559.954	124.895

Figur 37: Brønnparkens koordinater

Anja Meisler

NTNU

Kunnskap for en bedre verden