



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

BACHELOROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:

Vårsemesteret, 2021

Petroleumsteknologi

Åpen

Forfatter: Anne Kvalsund

Studentnummer: 237460

Fagansvarlig: Runar Bøe

Veileder(e): Runar Bøe

Tittel på bacheloroppgaven: Casestudie av væske-vann/varmepumpe

Engelsk tittel: Casestudy of a geothermal home heating system

Studiepoeng: 20

Emneord:

Varmpumpe, bergvarme, jordsløyfe

Sidetail: 78

+ vedlegg/annet: 8

Stavanger, 15.5.2021

Sammendrag

Oppgaven tar utgangspunkt i en enebolig lokalisert i Stavanger, som i forbindelse med rehabilitering, installerte en væske/vann-varmepumpe. Det spesielle med dette anlegget er at varmeenergien hentes fra en kuldebærer, samansatt av en horisontal jord- og en vertikal brønnsøyfe.

Hensikten med bacheloroppgaven var å redegjøre for hvordan anlegget kan driftes mest mulig lønnsomt. I den sammenheng vurderes det også i hvilken grad det lar seg gjøre å flytte overskuddsvarme hentet fra jordsløyfen og lagre den i berget.

For å kunne besvare problemstillingen for dette spesifikke kasuset ble, forsøk med ulike kombinasjoner av jord- og brønnsøyfer, samt og endring av driftsparametere for kuldebærerpumpen utført.

Funn fra analyse av forsøkene gir klare indikasjoner på at kontroll av strømningshastigheten til kuldebærerpumpen, er det som påvirket effektiviteten mest. Det er også basert på funn grunnlag for å hevde at en viss mengde energi kan lagres i bakken, men bare for en kortere periode.

Ut fra funnene er det grunnlag for å hevde at de fleste væske/vann-varmepumper installert i kystnære strøk har potensial for å kunne forbedre energifaktoren betydelig.

Besparelsen som kan oppnås ved å optimalisere driftsinnstillingene til denne type anlegg visualiseres best når en foretar en økonomisk nåverdibetraktning over varmepumpens forventede levetid.

Summary

This thesis analyses a residential geothermal home heating system. Energy used to heat the private newly renovated home, situated in Stavanger, is captured from a heat collector system, composed of a subsurface horizontal and a vertical well loop.

The objective of this analysis was to explore potential optimization of the system to harness greater efficiencies, thus unlocking greater value of the system. In this context, it is also considered to what extent it is possible to store surplus heat from the earth loop in the rock.

In an attempt to answer the problem, several experiments were performed. Said experiments consisted of conducting several variations to the operating system and evaluating different inputs.

Key findings from the analysis evidenced that tuning and adjusting the flow of the low temperature heat collector pump, affected the efficiency the most. Furthermore, the results from the experiments gave clear indications that it is possible to store a certain amount of energy in the ground for a limited period.

Based on the findings, there is reason to claim that most liquid / water heat pumps installed in coastal areas have the potential to significantly improve the efficiency of residential geothermal home heating systems. The savings that can be achieved by optimizing the operating system's settings are best visualized when an economic net present value consideration is made over the expected lifetime of the heating system.

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	1
1.1	<i>Problemstilling.....</i>	1
1.2	<i>Formål med rapporten</i>	2
1.3	<i>Forutsetninger og avgrensninger</i>	2
1.4	<i>Leseveiledning</i>	2
2	Metode.....	3
3	Teori:.....	4
3.1	<i>Termodynamikk.....</i>	4
3.1	<i>Grunnvarme</i>	4
3.1.1	<i>Bergvarme</i>	5
3.1.2	<i>Jordvarme.....</i>	7
3.2	<i>Elektromotor og frekvensomformer (inverter styring):</i>	8
3.3	<i>Varmepumpe:.....</i>	8
3.4	<i>Coefficient of Performance (COP).....</i>	10
3.5	<i>Investeringsanalyse</i>	11
4	Beskrivelse av «Case Fjellstølveien 22»	12
4.1	<i>Varmepumpeanlegg.....</i>	15
4.2	<i>Varmebærer krets</i>	18
4.3	<i>Kuldebærer.....</i>	19
4.4	<i>Kuldebærer - kalibrering og innregulering</i>	21
4.4.1	<i>Verifisering av volum i kuldebærer.....</i>	22
4.4.2	<i>Strømningsmåling.....</i>	23
4.4.3	<i>Innregulering</i>	24
4.4.4	<i>Temperatur kalibrering.....</i>	25
5	Brønntest.....	26
5.1	<i>Termisk responstest 24. – 27. januar.....</i>	26
5.1.1	<i>Én brønn u/jordkolektor (24.1.21).....</i>	27
5.1.2	<i>Én brønn m/jordkolektor (25.1.21)</i>	27
5.1.3	<i>To brønner u/jordkolektor (26.1.21)</i>	28
5.1.4	<i>To brønner u/jordkolektor selvvalgt ΔT (27.1.21)</i>	28
5.2	<i>Kontinuerlig drift og parameteroptimalisering</i>	28
5.2.1	<i>Kontinuerlig drift og parameteroptimalisering Fra 23.03. til 31.03.....</i>	29
5.2.2	<i>Varmepumpens arbeidsområde.....</i>	29
6	Resultat	30
6.1	<i>Resultat fra termiskresponstest 24.1. til 27.1.....</i>	31
6.1.1	<i>En brønn u/jordkolektor</i>	32
6.1.2	<i>En brønn m/jordkolektor</i>	33
6.1.3	<i>To brønner u/jordkolektor.....</i>	35
6.1.4	<i>To brønner u/jordkolektor selvvalgt ΔT.....</i>	35
6.1.5	<i>Analyse av resultat</i>	36

6.2	<i>Kontinuerlig drift og parameteroptimalisering</i>	37
6.2.1	Endring av deltatemperatur og pådrag KB-pumpe.....	38
6.2.2	Ending av varmebærerets	41
6.3	<i>Resultat fra hele testperioden samlet</i>	43
6.3.1	Avgitt effekt	44
6.3.2	Observasjoner siste år	46
6.4	<i>Analyse av forbruk fra oppstart november 2016 til mai 2021</i>	48
7	Økonomisk betraktning	49
7.1	<i>Investeringskostnader Fjellstølveien</i>	49
7.2	<i>Operasjonskost</i>	50
7.3	<i>Virkelig forbruk og besparelse i løpet av et år</i>	50
7.4	<i>Nåverdibetraktning og besparelse over tid</i>	52
8	Diskusjon	53
8.1	<i>Sammenligning med Enova rapport</i>	53
8.1.1	SPF faktor over året	54
8.1.2	Årlig andel tappevann.....	55
8.1.3	Væske/vann vs. varmebærer turtemperatur	56
8.1.4	Gjennomsnittlig innetemperatur.....	57
8.1.5	Energibruk	58
8.1.6	Videre analyser av varmepumpeanlegg	60
8.2	<i>Gode og dårlige varmepumpeanlegg</i>	60
8.2.1	Valg av varmepumpesystem	60
8.2.2	Varmepumpemodell.....	61
8.2.3	Størrelse på varmepumpe	61
8.2.4	Systemoppbygning og styring.....	62
8.2.5	Varmebærer	62
8.2.6	Kuldebærer	63
8.3	<i>Oppsummering av sammenligning – Konklusjon</i>	64
8.4	<i>Feilkilder</i>	65
9	Konklusjon	66
9.1	<i>Videre forskning</i>	67
10	Referanser:	68
11	Vedlegg	70
11.1	<i>Energiattest Fjellstølveien 22A</i>	70
11.2	<i>Kalibreringsbevis no. 21/30495 Temperatur</i>	72
11.3	<i>Kalibreringsbevis no. 20/20835 Flow</i>	73
11.4	<i>Nibe tilbud/beregning F1255-12</i>	74
11.5	<i>Plantegninger Fjellstølveien</i>	75

Figurliste:

Figur 2-1 Diagram over fremgangsmåte ved vitenskapelig arbeid.....	3
Figur 3-1 Varedrift og kjøledrift [3].....	5
Figur 3-2 Geotermisk gradient [3].....	6
Figur 3-3 Varmepumpe oppsett [3]	8
Figur 3-4 Nåverdi eksempel [13].....	11
Figur 4-1 Boligen i Fjellstølveien 22 [14]	12
Figur 4-2 Oversiktsbilde av eiendommen med plassering av brønner og jordsløyfe.....	14
Figur 4-3 Skisse av varmpumpeanlegget.....	15
Figur 4-4 Nibe lokalt display[1] (venstre) og Nibe Uplink til telefon (høyre).....	16
Figur 4-5 Nibeuplink trendlogg.....	17
Figur 4-6 Nibe Uplink parameter-menu	17
Figur 4-7 t.v. topp etg. viser Selencio plate. t.h. flytparkling kjeller.....	18
Figur 4-8 Illustrasjon av kuldebærerrets, sammensatt av jord- og brønnkollektor	19
Figur 4-9 Berggrunnsdata for området [17].....	20
Figur 4-10 illustrasjon av kalibreringspunkter for temperatur og flowmåling.....	21
Figur 4-11 Verifisering av kuldebærer volum	22
Figur 4-12 Illustrasjon flowmåler.....	23
Figur 4-13 Flowkalibrering av KB-pumpe	24
Figur 4-14 Forgreningsventiler jordsløyfe.....	24
Figur 4-15 Temperaturkalibrering – Fluke 5615 med nøyaktighet $\pm 0.021^{\circ}\text{C}$	25
Figur 5-1 Tidslinje test- og observasjonsperiode.....	26
Figur 5-2 Illustrasjon av oppsett av kuldebærer "Én brønn u/jordkollektor".....	27
Figur 5-3 Illustrasjon av oppsett av kuldebærer "Én brønn m/jordkollektor".....	27
Figur 5-4 Illustrasjon av oppsett av kuldebærer "To brønner u/jordkollektor".....	28
Figur 5-5 Illustrasjon av kuldebærer ΔT	29
Figur 6-1 Historikk fra brønntest 24. til 27. januar.....	31
Figur 6-2 Relasjon mellom avgitt effekt og COP fra 24. tom. 25. jan 2021	36
Figur 6-3 Relasjon mellom avgitt effekt og andel varmtvann fra 24. tom. 25. jan 2021	36
Figur 6-4 Sammenheng mellom kuldebærer og COP.....	37
Figur 6-5 Historikk over utetemperatur under testperiode.....	38
Figur 6-6 Nibe uplink trendlogg, periode 01.01. - 23.01.	39

Figur 6-7 COP og andel varmtvann 22.3.-30.3.....	40
Figur 6-8 Historisk trendlogg fra 31.mars til 5.april.....	41
Figur 6-9 Kompressor og KB-hastighet	42
Figur 6-10 Data fra hele testperioden samlet.....	43
Figur 6-11 Varmepumpen sitt arbeidsområde fra Nibe sin brukermanual [16].....	45
Figur 6-12 Avgitt effekt og andel varmtvann	46
Figur 6-13 Årsoversikt temperatur	47
Figur 7-1 Grafisk fremstilling akkumulert besparelse, strøm- pris og forbruk	51
Figur 8-1 Sammenligning Fjellstølveien vs. Enova rapport SPF_A_luft og SPF_A_væske ...	54
Figur 8-2 Sammenligning Fjellstølveien vs Enova rapport, årlig andel tappevann	55
Figur 8-3 Sammenligning Fjellstølveien vs Enova rapport, turtemperatur.....	56
Figur 8-4 Sammenligning Fjellstølveien og Enova rapport innetemperatur.....	57
Figur 8-5 Energiforbruk til rom og tappevann.....	58
Figur 8-6 Spesifikk effekt og energiforbruk	59
Figur 8-7 Forbruk tappevann pr beboer.....	60
Figur 8-8 illustrasjon over temperaturløft.....	64

Tabell liste:

Tabell 4-1 Spesifikasjoner for anlegget	14
Tabell 4-2 Beskrivelse av kuldebærer energiopptak-berg-/jordvarme	19
Tabell 4-3 [15]	20
Tabell 4-4	22
Tabell 6-1	31
Tabell 6-2	34
Tabell 6-3 Sammenheng mellom temperaturendring i KB og energiforbruk.....	44
Tabell 6-4 Oversikt over forbruk fra oppstart.....	48
Tabell 7-1 Nåverdibetraktning 20-årsperspektiv	52

Forkortelser:

		Enhet
COP	Coefficient of performance	
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance	
SPF	Sesonal performance factor	
DUT	Dimensjonerende utetemperatur	
KB _{inn}	Kuldebærer inn	[°C]
KB _{ut}	Kuldebærer ut	[°C]
VP	Varmepumpe	
VB	Varmebærer	
Q _{ut}	Avgitt varme	[kW]
Q _{inn}	Tilført varme	[kW]
W _{inn}	Tilført arbeid	[kW]
T _{KB-inn}	Temperatur kuldebærer inn	[°C]
T _{KB-ut}	Temperatur kuldebærer ut	[°C]
ΔT	Differanse mellom temperatur inn og ut	[K]
λ	Termisk konduktivitet	[W/mK]
c	Spesifikk varmekapasitet	[J/kg K]
L	Latent varme	[J/kg]
m	masse	[kg]
NV	nåverdi	
VV	Varmtvann	
VVT	Varmtvannstank	

Definisjon av begrep:

Bergvarme	«Bergvarme er varme fra sola lagret under bakken»[2]
Jordvarme	Horisontale sirkulasjonsrør for å hente energi fra jordoverflatens ytterste skorpe
Kuldebærer	Sirkulasjonskrets for berg- eller jordvarme, der energien tas opp av omgivelsene
Romtemperatur	Standard inngang levert med varmpumpen, benyttet for å kunne vise temperatur målt i enden av jordsløyfen, før retur til brønn.
Varmebærer	Sirkulasjonskrets for avgivelse av varme til bolig og oppvarmingsvann.

Forord

Oppgaven er skrevet i forbindelse med fullføring av bachelorstudiet innen Petroleumsteknologi avd. institutt for energi- og petroleumsteknologi, ved Universitetet i Stavanger.

Interessen for temaet oppgaven omhandler ble til etter å ha observert mine foreldres boligrehabilitering, der all oppvarming er basert på en væske/vann-varmepumpe. I løpet av studiene bidro fagene fysikk og thermo- og fluiddynamikk til å vekke interessen for denne metoden å hente energi.

Under litteraturstudie og arbeidet med denne oppgaven har jeg lært mye om hvordan en varmepumpe, som bygger på trykk-temperaturloven, kokepunkt-loven og væske-gass loven fungerer og hvordan den påvirkes av forskjellige faktorer. Dette har ført til en økende interesse for optimalisering av varmepumpedrift.

I denne sammenheng ønsker jeg å takke IKM-testing for at jeg fikk låne måleutstyr slik at det var mulig å utføre kalibrering av både temperatur og strømning. Dette ga sikkerhet i oppnådde resultater og bedre forståelse av varmepumpeanleggets virkemåte.

Ønsker også å takke min far for god hjelp under forsøk og utarbeidelse av bacheloroppgaven, og resten av beboerne i Fjellstølveien for at jeg fikk lov til å utføre forsøk på anlegget over en lengre periode. Til slutt vil jeg takke Katarina Skjevling for konstruktiv kritikk under gjennomlesning av oppgaven.

1 Innledning

Varmepumpen slik vi kjenner den i dag har blitt utviklet og forbedret i løpet av de siste hundreårene. Til tross for dens lange historie er det først i nyere tid at den har fått en tilstrekkelig virkningsgrad og pris rimelig nok til at den er økonomisk lønnsom og velges som oppvarmingskilde i hjemmet. Varmepumpen er en innretning som tilsynelatende avgir mer energi enn det som blir tilført. I virkeligheten henter den energi fra et kaldt sted og flytter den til et sted med høyere temperatur.

Denne energieffektive oppvarmingskilden passer godt inn i dagens samfunn der det er et stort fokus på fornybar og bedre utnyttelse av energi

Den vanligste type varmpumpe i norske hjem er luft/luft-varmpumpe, men i senere tid har det vært en gradvis økning i antall væske/vann-varmpumper som blir installert[3]. Kasuset som denne oppgaven tar for seg er et slikt væske/vann-anlegg installert i en enebolig i Stavanger.

Selve varmpumpen sammensatt av tre hoveddeler: kompressormodul varmebærer og kuldebærer. Lønnsomheten eller avkastningen på varmpumpeinvesteringen er direkte knyttet til gjeldende strømpris og effektfaktor (COP). For å oppnå en høyest mulig COP vil både prosjektering i forkant og hvordan anlegget driftes ha stor innvirkning.

Ifølge brukermanual til varmpumpen installert i boligen benyttet som case, kan man lese at en temperatur endring av varmebærer med én grad vil medføre en endring i energiforbruket med 5 % [1]. En kan med andre ord si at ved å senke innetemperaturen litt oppnås et mindre temperaturløft, som så vil gi en høyere COP.

1.1 Problemstilling

Varmepumpene oppgir tilsynelatende en høyere effektgrad enn det som i praksis oppnås. Rapporten vil forsøke å finne beste praksis for design og installasjon av væske/vann-varmpumpe ved å besvare følgende problemstilling:

Hvordan bør en varmpumpe basert på væske-vann prinsippet installeres og driftes for å oppnå en høyest mulig årsvarmefaktor.

Opprinnelig problemstilling var å undersøke om det er mulig å lagre energi i berg.

1.2 Formål med rapporten

Rapportens formål er å undersøke om betingelser for å kunne oppnå best mulig årsvarmefaktor ble lagt til grunn under prosjektering av valgt case, varmepumpeanlegget i Fjellstølveien 22.

I den anledning stilles følgende spørsmål:

- Hvordan bør et kombinert jord- og bergvarme anlegg driftes for å oppnå høyest mulig COP?
- Er det mulig å lagre energi i fjell?

1.3 Forutsetninger og avgrensninger

Denne oppgaven tar for seg varmepumpen og anlegget i Fjellstølveien 22. Resultatene fra denne oppgaven vil kun gjelde for dette anlegget.

1.4 Leseveiledning

Kapittel 1 er innledningen der det presenteres hva som skal forskes på i oppgaven. Kapittel 2 forklarer hvilken forskningsmetode som er tatt i bruk, og kapittel 3 forklarer teorien som ligger bak teknologi og fenomen beskrevet i oppgaven. I kapittel 4 introduseres og beskrives anlegget som det har blitt utført tester på. Kapittel 5 forklarer hvilke forsøk som har blitt utført, og i kapittel 6 presenteres funn. Kapittel 7 ser på de økonomiske betraktningene rundt en investering i et bergvarmeanlegg. For å se hvordan dette anlegget er i forhold til andre, vil det i kapittel 8 sammenlignes med resultater fra andre anlegg i en rapport utført av Enova. Her diskuteres også hva som kjennetegner en god og dårlig varmepumpe. I kapittel 9 framlegges konklusjonen etterfulgt av referansene i kapittel 10. Vedlegg er lagt ved helt til slutt.

2 Metode

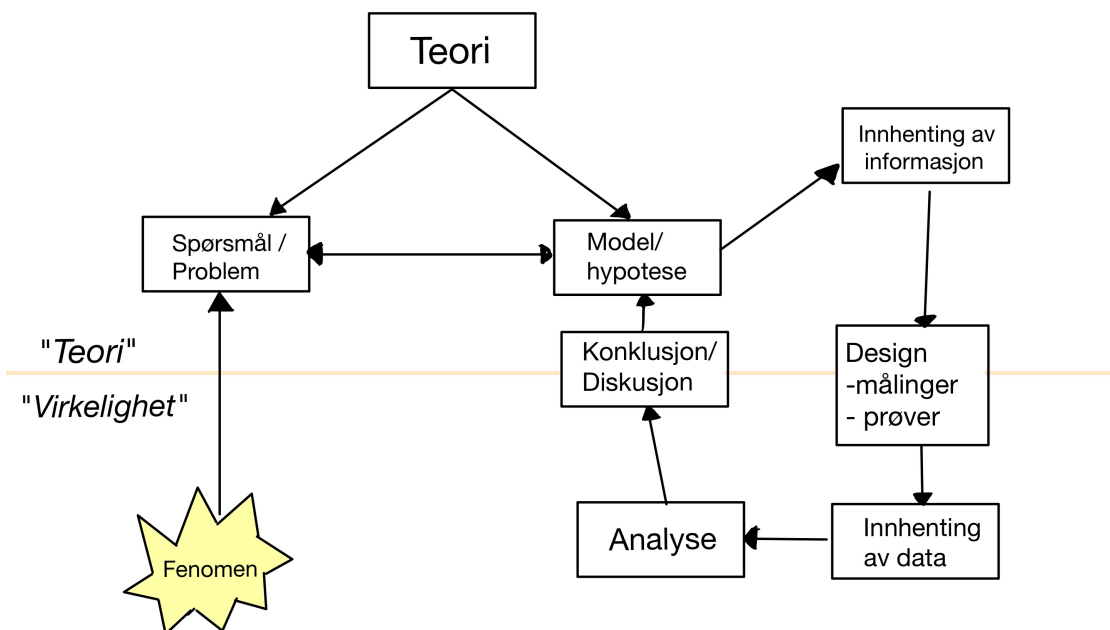
I dette delkapittelet redegjøres det for hva de forskjellige hovedretningene innen samfunnsforskningen er, og hva som kjennetegner dem. Det sies også hvilket forskningsdesign som blir benyttet i denne oppgaven.

Ved analyse og innhenting av data finnes det to hovedretninger: kvantitativ og kvalitativ forskning. Den kvantitative metoden sies å være deduktiv, at den er teori- og hypotesedrevet. Den kvalitative metoden er induktiv, eksplorerende og empiridrevet. Der den kvantitative metoden foretrekker data i form av tall og søker etter forklaring, fokuserer den kvalitative metoden på data i form av tekst og søker etter forståelse[4].

Denne oppgaven følger det kvalitative forskningsdesignet med kjennetegn som å være tett på forskningsobjektet, drevet frem av empiri og avgrenset av miljøet, et case studie [4]. Data innhentet i forsøkene passer mer til den kvantitative retningen og oppgaven følger dermed det kvalitative forskningsdesignet, men har kvantitative trekk ved seg.

Det benyttes et eksplorativt design under forsøkene. Dette forskningsdesignet ønsker å kunne beskrive et fenomen, for så å gi en ny innsikt. Dette leder igjen til en ny hypotese og videre forskning [5].

Figuren under er illustrativ for oppgaven. Figur 2-1 er illustrativ for oppgaven.



Figur 2-1 Diagram over fremgangsmåte ved vitenskapelig arbeid

3 Teori:

Kapittelet innledes med termodynamikkens lover og beskrivelse av lavtemperatur energikilder. Ettersom pumper og kompressor er en forutsetning for å kunne utnytte energien fra omgivelsene, forklares så elektromotorer og hastighetsregulering. På tampen av kapittelet forklares prinsippene bak varmepumpen, effektivitet og lønnsomhet.

3.1 Termodynamikk

Fundamentet som prinsippet til varmepumpen bygget på, er termodynamikken.

Innen termodynamikk er det to fundamentale lover som sier følgende:

1. Energi kan ikke oppstå eller forsvinne, bare endre form. [kilde]
2. Varmeoverføring skjer alltid fra et sted med høy temperatur til et sted med en lavere temperatur[6].

Energi beskrives som den evnen et system har til å utføre arbeid og kan overføres til eller fra et lukket system i form av varme og arbeid.

3.1 Grunnvarme

Grunnvarme er en fellesbetegnelse på utnyttelse av lavtemperatur termisk energi som ligger lagret i berg, jord, løsmasse og grunnvann. Energien lagret i grunnen kommer fra solenergi og er både en fornybar og miljøvennlig energikilde[7]. Den stabile temperaturen under jordoverflaten året rundt gir gode driftsbetingelser for varmepumper. Ved bruk av grunnvarme kommer omtrent 70 % av energien fra grunnen, mens de resterende 30 % kommer fra den elektriske energien som er nødvendig for å drive varmepumpen [8].

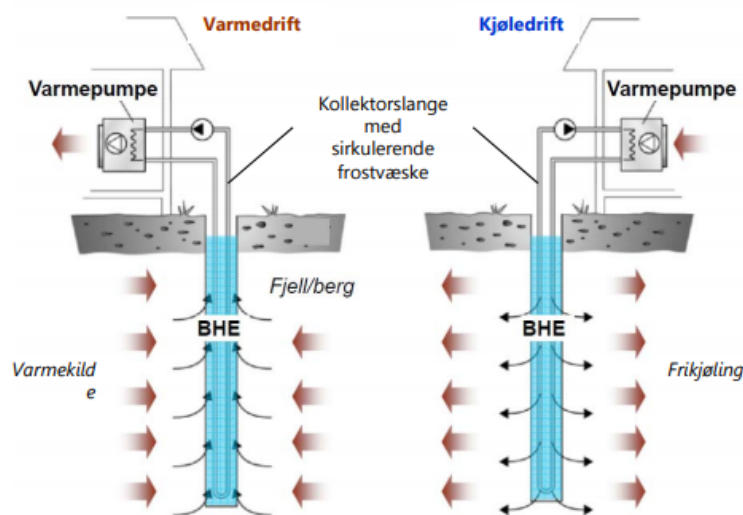
3.1.1 Bergvarme

Bergvarmeanlegg henter energi fra berg via energibrønner som har en dybde fra 80 m til 300 m, og typisk en diameter på 14 cm. Inni brønnen sirkulerer en frostsikker væske som transporterer varme fra berget og opp til varmepumpen.

En energibrønn kan kjøres både på varmedrift om vinteren og kjøledrift om sommeren. Ved varmedrift hentes varme fra fjellet og transporteres opp til varmepumpen. Ved kjøledrift reverseres denne prosessen og varme transporteres ned i berget[8]. For varmedrift kan man vanligvis hente ut 30 – 40 watt per meter aktivt borehull [8].

Watt per meter aktivt borehull kan beregnes fra følgende formel:

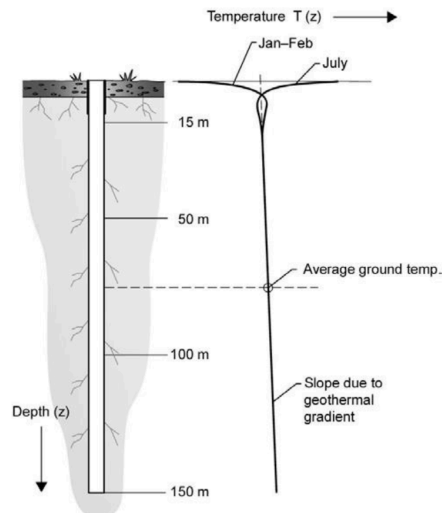
$$Q_{brønn} = \frac{Q_{borehull}}{m} * l \quad (3.1)$$



Figur 3-1 Varedrift og kjøledrift [3]

Det er fire geologiske forhold som kan påvirke kostnaden ved investering i et bergvarmeanlegg. Tykkelsen på løsmasse over fjellet, temperaturen i grunnen, bergets varmeledende egenskaper og grunnvannsnivået [8].

Tykkelsen på løsmasse over berget i Norge er generelt ganske lav, med noen unntak, f.eks. i dalfører. Dersom tykkelsen på løsmassen er stor må det settes ned forings-rør i stål. Dette er for å stabilisere brønnen, og vil øke kostnaden ved boring betraktelig.



Figur 3-2 Geotermisk gradient [3]

Grunntemperaturen varierer med årstiden i de øverste 10 – 20 m. Lengre nede ligger temperaturen stabilt, grunntemperaturen bestemmes ved den geotermiske gradienten og årsmiddel luft-temperaturen. Generelt sett ligger grunntemperturen 1 – 2 grader høyere enn årsmiddel luft-temperaturen i området [7].

Varmeledningsevne eller termiskkonduktivitet er et mål på hvor godt et materiale, i dette tilfellet berget, leder varme. Fjelllets varmeledende egenskaper er avhengig av mineralsammensetningen og øker ved økt innhold av mineralet kvarts. Berggrunnens ledningsevne i Norge ligger vanligvis et sted mellom 2 og 4,5 watt per meter kelvin (W/mK). Ledningsevnen til berget vil øke dersom det er vannfylt [9]. Formel for beregning av termisk konduktivitet er vist under [6, s. 627].

$$\lambda = \frac{Q * \Delta x}{A(T_2 - T_1)} \quad (3.2)$$

λ = Termisk konduktivitet [W/mK]

Q = Avgitt varme [W]

Δx = Tykkelse [m]

A = Areal [m²]

T = temperatur differanse [K]

Grunnvannet ligger et sted mellom 1 til 10 meter under overflaten, og dybden varierer med terrenget. I enkelte tilfeller kan grunnvannets bevegelse ha en innvirkning på energiuttaket til brønnen [8].

3.1.2 Jordvarme

Jordvarmeanlegg henter varme lagret i det øverste løsmasse-laget. Varme hentes fra bakken via kollektorslanger, med en diameter på 40 mm, som er gravd ned i 80 til 150 cm dype grøfter. Ved jordvarme er det en fordel å ha fuktig jord; å grave ned kollektorslangen i en myr ville skapt ideelle forhold [8].

Grunntemperaturen nærme overflaten vil variere med årstidene. Varmeuttaket varierer med jordartstype og er omtrent 15-30 W/m kollektorslange. Den største energioverføringen skjer ved faseovergang fra væske til is [8].

Avgitt varme [6]:

$$\dot{Q} = \dot{m}c(t_2 - t_1) \quad (3.3)$$

Q = avgitt varme [J/s]

m = masseflow [kg/s]

c = spesifikk varmekapasitet [J/kg K]

t_2 = temperatur ut [K]

t_1 =temperatur inn [K]

Avgitt varme ved faseovergang [6]:

$$Q = mL \quad (3.4)$$

Q = avgitt varme [J]

m = mass [kg]

L = latent varme [J/kg]

3.2 Elektromotor og frekvensomformer (inverter styring):

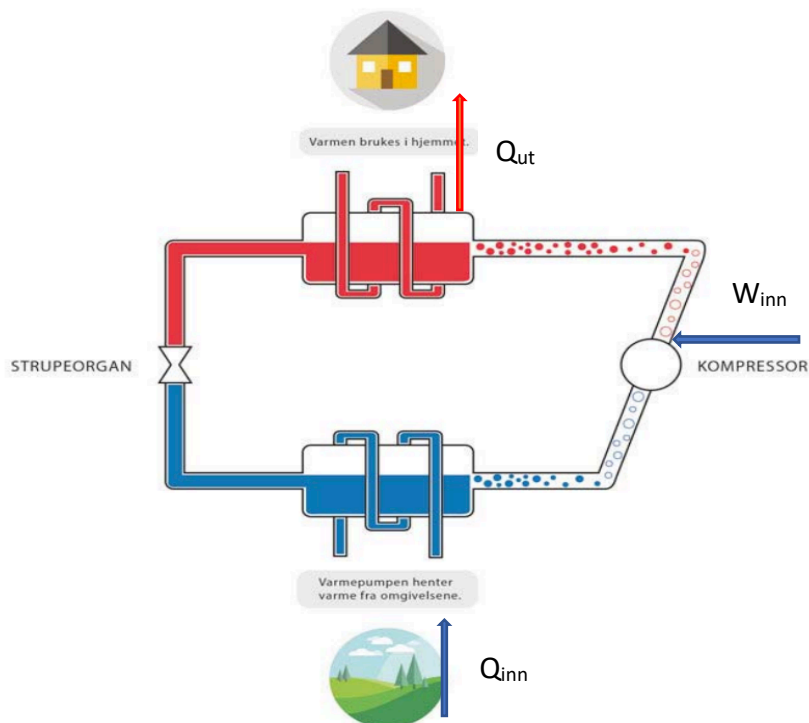
Kompressor og sirkulasjonspumper er drevet av elektromotorer. Utvikling av rimeligere og mer driftssikker elektronikk har ført til utstrakt bruk av frekvensomformere.

Frekvensomformeren likeretter den tilkoblede faste spenningen og endrer den så til ønsket variabel spenning og frekvens. Det er dette som muliggjør trinnløs hastighetsregulering.

Ut fra frekvensomformeren kan man regulere både frekvens og amplitude på spenningen. Frekvensomformere blir benyttet for å få mykstart, turtallsregulering og effektregulering av elektriske maskiner[10].

3.3 Varmepumpe:

Varmepumpe er en innretning som henter varme fra et kaldt sted og transporterer den til et sted med en høyere temperatur. Som figuren under illustrerer, så er varmpumpen sammensatt av tre hoveddeler varmebærer, kuldebærer og kompressormodul. Lav-temperatur kilden som kuldebærer henter varme fra kan være vann, luft, berg eller jord.



Figur 3-3 Varmepumpe oppsett [3]

For å kunne dra nytte av trykk-temperaturloven, kokepunkt-loven og væske-gass loven, som antas kjent og derfor ikke forklares nærmere, er kompressormodulens sirkulasjonskrets bygget opp av fire hovedkomponenter: kompressor, kondenser, strupeventil og fordamper.

Kompressor sørger for at trykk og temperatur til kuldemediet øker.

Kuldemediet går så inni kondenser der den møter sirkulasjonsmediet fra varmebærerkransen. Kuldemediet avgir da energi i form av varme til varmebærerkransen og kondenserer.

Det nå delvis kondenserte mediet fortsetter til trykkavlastningsventilen. Ventilen sørger for en trykkreduksjon i kuldemediet og dermed synker også temperaturen.

I fordamperen vil fullstendig kondensert kuldemedium, grunnet tilført varmeenergi fra kuldebærer, få en temperaturøkning. Undertrykket skapt av kompressorens sugeside fører så til at mediet fordamper og går over til gassfase.

Prosessen blir så gjentatt. Slik som termodynamikkens andre lov sier så kan energi verken oppstå eller forsvinne, bare endre form. Derfor må summen av det tilførte arbeidet og varmen være lik den avgitte varmen fra pumpen.

$$Q_{inn} + W_{inn} = Q_{ut} \quad (3.5)$$

Q_{inn} =Varme inn i systemet [W]

W_{inn} = Arbeid tilført systemet [W]

Q_{ut} = Varme avgitt fra systemet [W]

$$\Delta T = T_{inn} - T_{ut} \quad (3.6)$$

ΔT = temperatur differanse [K]

T_{inn} = temperaturen inn [K]

T_{ut} = temperaturen ut [K]

3.4 Coefficient of Performance (COP)

COP, kalt effektfaktor på norsk, er et mål på effektiviteten til en varmepumpe. COP er et mål på forholdet mellom avgitt varme og tilført arbeid. En $COP > 1$ vil indikere et lavere energiforbruk.

COP for en varmepumpe kan uttrykkes ved følgende formel:

$$COP_{HP} = \frac{\text{\textit{ønsket output}}}{\text{\textit{nødvendig input}}} = \frac{Q_{ut}}{W_{inn}} \quad (3.7)$$

Q_{ut} = Avgitt varme [W]

W_{inn} = Tilført arbeid [W]

Seasonal Coefficient of Performance (SCOP) er den teoretiske beregnet COP-en over et år. På norsk kalt teoretisk årsvarmefaktor og gir et uttrykk for hvor mye energi som er forbrukt i forhold til hvor mye energi man får ut i løpet av året. Denne er beregnet fra pumpeleverandørens spesifikasjoner.

Sesonal performanse factor (SPF) eller faktisk årsvarmefaktor, er det pumpen virkeligpresterer. En god varmepumpe vil ha en SPF som er tilnærmet lik SCOP verdien gitt av varmepumpeleverandøren [11].

3.5 Investeringsanalyse

En investeringsanalyse er en metode å se på de ulike faktorene rundt en investering. På grunnlag av denne analysen kan man fatte beslutning om å iverksette eller gå for alternativ investering.

En måte å beregne lønnsomhet på er ved en nåverdi beregning. Dersom nåverdien er positiv, er investeringen lønnsom [12].

$$NV = K_n \times \frac{1}{(1+r)^n} \quad (3.8)$$

NV = nåverdi

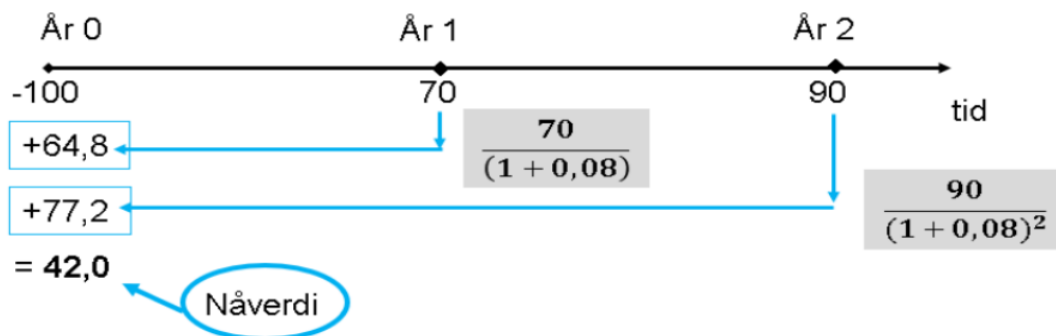
K_n = verdi i år n

r = rente

Eksempel på en nåverdi beregning er vist i figuren under.

Vi kan illustrere med et eksempel: vi ønsker å analysere om en investering på 100 (i år 0) er lønnsom, når den generer positive resultater (kontantstrøm) på 70 i år 1 og 90 i år 2, gitt at avkastningskravet skal være 8 %.

Av figuren nedenfor beregner vi først nåverdien av 70 i år 1 og 90 i år 2, ved å diskontere beløpene med avkastningskravet på 8 %. Vi har da gjort disse beløpene sammenlignbare med investeringsbeløpet i år 0 og kan bare summere dem sammen. Nåverdien summerer vi til 42, og siden denne er positiv er prosjektet lønnsomt. Det vil si at investeringen dekker kravet vi har satt på avkastning til 8 % og litt til.



$$\text{Nåverdi} = -100 + \frac{70}{(1 + 0,08)} + \frac{90}{(1 + 0,08)^2} = 42$$

Figur 3-4 Nåverdi eksempel [13]

4 Beskrivelse av «Case Fjellstølveien 22»

Boligen i Fjellstølveien 22 ble oppført i 1982, hadde da en grunnflate på 100 m² og en tilhørende garasje på 24 m². Eiendommen ble solgt i oktober 2015 og nye eiere besluttet å totalrenovere. Arkitekt ble engasjert og ombygging påbegynt så snart nødvendige godkjenninger ble gitt i februar 2016. I løpet av byggeperioden, som varte til desember samme år, ble takkonstruksjon endret, garasjen ble revet og erstattet med en «bunkers» tilknyttet huset på ca. 100 m². Grunnflate etter ombyggingen er omtrent 215 m². Bruttoarealet i dag er litt over 400 m².



Figur 4-1 Boligen i Fjellstølveien 22 [14]

Under prosjektering var det fokus på komfort og energioptimalisering, basert på fremtidsrettet og miljøvennlig teknologi. I den forbindelse var det tilstrekkelig isolasjonsevne i tak, vegger og vindu, balansert ventilasjon, sentralstøvsuger og vannbåren oppvarming som fremstod som de viktigste faktorene for å oppnå et best mulig inn klima. Når det kommer til valg av VP, så

er det avhengig av energibehovet/forbruket til husstanden og budsjett. I dette tilfellet ble flere leverandører kontaktet for tilbud på bergvarmeanlegg som skulle ha minst 100 % energidekning til oppvarming og forbruksvann. Nevner i den sammenheng at syv beboere, to kjøkken, fire dusjer og et badekar i boligen skulle legges til grunn for beregninger. Det ble mottatt flere tilbud med sammenfallende beregninger, disse indikerte et oppvarmingsbehov tilsvarende 35 watt per kvadratmeter. Lagt til grunn noe lavere temperatur og energibehov i garasje/bunkers får et maksimalt effektbehov på omtrent 12 kW. – Se vedlegg 11.4.

Basert på tester og god omtale ble det i 2016 besluttet å gå til innkjøp av en Nibe 1255. For å ha en dekningsgrad på 100 % så falt valget på 12 kW utgaven, en Nibe F1255-12.

I tillegg til å kunne levere energi til oppvarming, har den også tilstrekkelig kapasitet til å kunne dekke varmtvannsbehovet. Det er med andre ord ikke installert en ekstern varmtvannsbereder eller annen elektrisk oppvarming.

Tilfeldigheter har bidratt til at anlegget i dag ikke fremstår som opprinnelig designet og har to vesentlige endringer.

Jensen Brønnboring, som utførte boring, opplyste ved ankomst om at en ville oppnå bedre virkningsgrad ved å bore to brønner. Valget falt derfor å følge råd om å bore to brønner på 130 m fremfor en brønn på 210 m.

Den andre vesentlige endringen ble innført etter ett par år med drift, da det ble observert en synkende trend i temperaturen på kuldebærervæsken. Basert på intuisjon ble det besluttet å legge en jordsløyfe i serie med brønnene, i den tro at en kunne "lade" brønnene i perioder med varmt vær.

Mulighetene de nevnte tiltakene åpner for er det som gjør at nettopp dette varmepumpeanlegget ble valgt som case. Plassering av de to energibrønnene og jordvarmesløyfen er vist i figur 4-2.



Figur 4-2 Oversiktsbilde av eiendommen med plassering av brønner og jordsløyfe

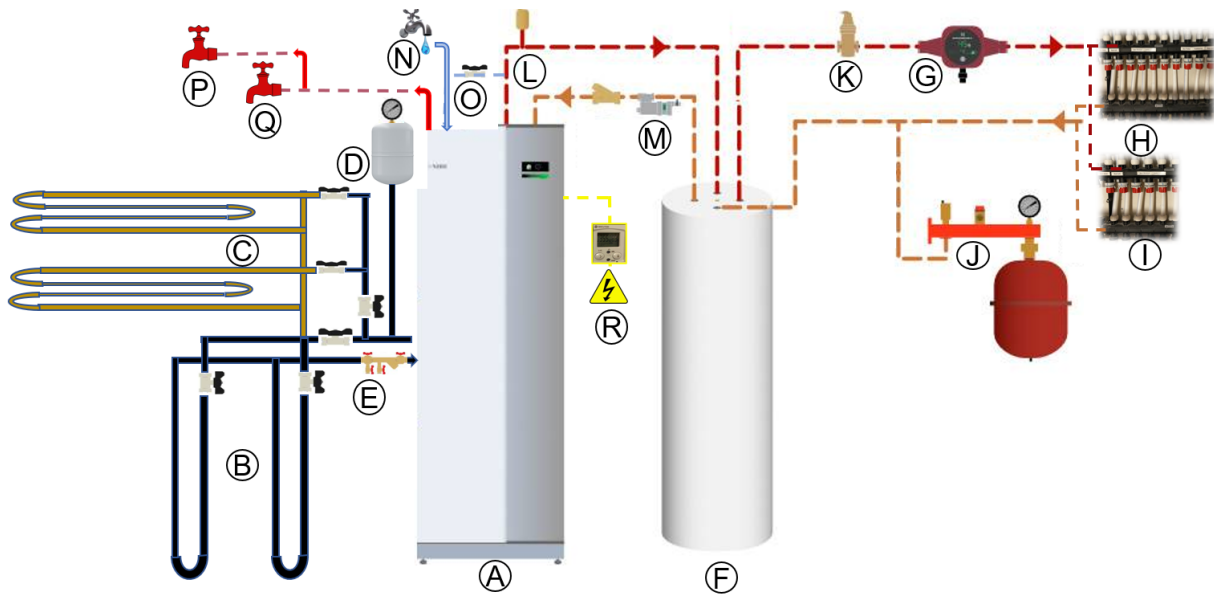
Tabellen under lister nøkkelinformasjon for boligen.

Tabell 4-1 Spesifikasjoner for anlegget

Byggeår / Rehabilitering	1982/2016
Areal [m ²]	400
Installasjons år VP	2016
Effekt VP [kW]	3 – 12
Varme-opptak	Bergvarme + jordsløyfe
Varme-avgivelse	Gulvvarme
Varmepumpe	Nibe F1255-12

4.1 Varmepumpeanlegg

Fordelen med valgt bergvarmepumpe er at den er utstyrt med hastighetsregulering eller inverter styring av elektromotorene som driver kompressor, varme- og kuldebærerpumpe. Relativt stor variasjon i avgitt effekt (3–12 kW) gjør at varmepumpen kan opprettholde kontinuerlig drift i store deler av året.



Figur 4-3 Skisse av varmepumpeanlegget

Liste over komponenter som inngår i anlegget

- | | |
|----------------------------------|----------------------------------|
| A. Nibe F1255 3-12 kW | J. VB-Ekspansjonskar m/Manometer |
| B. Energibrønn 2 x 130 m | K. Luftepotte |
| C. Jordkolektor 2 x 80 m | L. Mikrobobleutskiller |
| D. KB-Ekspansjonskar m/Manometer | M. Magnetittfilter |
| E. Påfyllingsventiler – HX35 | N. Forbruksvann |
| F. Akkumulatortank 200 l | O. Etterfylling vann gulvvarme |
| G. Sirkulasjonspumpe | P. Forbruksvann hovedhus |
| H. Gulvvarme hovedhus | Q. Forbruksvann leilighet |
| I. Gulvvarme leilighet | R. Effektmåler [kWh] 3 x 400 VAC |

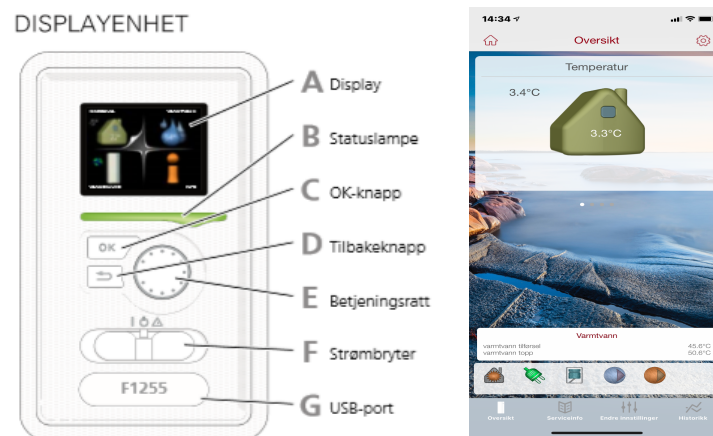
Figur 4-3 over illustrerer komponentene som inngår i varmepumpeanlegget. Energien hentes fra omgivelsene angitt fra B til E.

Vedrørende tidsinnstilling for prioritering av andel varmtvann eller romoppvarming er fordelingen henholdsvis 90 min og 30 min. For å forhindre store svingninger i

romtemperaturen ved produksjon av varmtvann ble det installert en akkumulatortank (F) på varmebærer-siden. I rørstykket mellom akkumulatortanken og fordelingsventilene (H) og (I) er det plassert en sirkulasjonspumpe, energiforbruket til denne er ikke tatt med i beregninger. Nibe1255 er utstyrt med intern styringsenhet der driftsdata kontinuerlig logges. Avgitt energi beregnes ut fra strømningshastighet og temperaturfall over varmebærer.

Energileverandøren til boligen er Lyse, og tilførselen av effekt til varmepumpen måles med egen foran-koblet energimåler (R). Det er avlesninger fra denne energimåleren sammenlignet med avgitt energi fra VP som brukes til COP beregninger.

Nibe sine varmepumper har en rekke driftsparametere og leveres derfor med et intuitivt brukergrensesnitt. Det lokale panelet har navigeringshjul og lokalt display som vist til venstre i figur 4-4. Navigeringshjulet forenkler kommunikasjon mellom «menneske og maskin», henviser til brukermanualen til Nibe for detaljer [1].

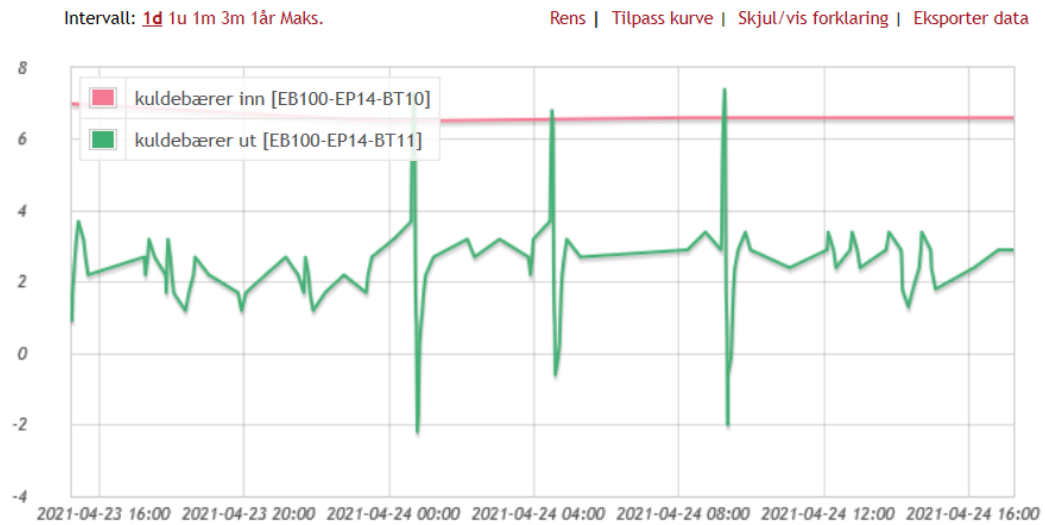


Figur 4-4 Nibe lokalt display[1] (venstre) og Nibe Uplink til telefon (høyre)

Varmepumpen leveres også med et internettbasert verktøy som kalles Nibe Uplink. Denne programvaren tilbyr ulike abonnementer for fjernstyring, trendlogging og overvåking. Nibe Uplink kan styres fra både pc og telefon. Dette er verktøyet som har blitt benyttet for logging og innhenting av data. Telefonoppsettet for styringssystemet er vist til høyre i figur 4-4.

Informasjon som kan hentes fra Nibe Uplink er vist i figur 4-5 og 4-6 under. Det er 34 tilgjengelige parametere som logges, og data kan eksporteres som CSV-fil.

Historikk



Figur 4-5 Nibeuplink trendlogg

status

- utetemperatur BT1
- varmtvann tilførsel BT6
- varmtvann topp BT7
- strøm EB100-BE1
- strøm EB100-BE2
- strøm EB100-BE3
- gradminutter

kompressor modul

- kompressorstarter EB100-EP14
- kuldebærerpumpehastighet EP14-GP2
- varmebærerpumpehastighet EP14
- hetgass EB100-EP14-BT14
- kondensator tur EB100-EP14-BT12
- kuldebærer inn EB100-EP14-BT10
- kuldebærer ut EB100-EP14-BT11
- sesongoversikt kuldebærer inn EB100-EP14
- sesongoversikt kuldebærer ut EB100-EP14
- sugegass EB100-EP14-BT17
- væskeledning EB100-EP14-BT15
- kompressor driftstid EB100-EP14
- kompressor driftstid varmtvann EB100-EP14
- aktuell kompressorfrekvens

klimasystem 1

- beregnet turledning S1
- ekstern turledning BT25
- retur.temp. EB100-EP14-BT3
- romtemperatur BT50
- turledningstemp. BT2

varmemengdemåler

- bass.2, bare kompr. EP14
- basseng, bare kompr. EP14
- varme, bare kompr. EP14
- varme, inkl. int. till.varme EP14
- vv, bare kompr. EP14
- vv, inkl. int. till.varme EP14
- volumstrøm BF1

smart price adaption

- strømpris NO2

Figur 4-6 Nibe Uplink parameter-menu

4.2 Varmebærer krets

Varmeenergi blir avgitt til boligen er via 20 mm gulvvarmerør i alle gulv, med unntak av garasjeområdet. I garasje er det bare lagt vannbårenvarme i tilhørende oppholdsrom. For best mulig varmeavgivelse til hele boligen, ble det valgt å legge flere og kortere sløyfer.

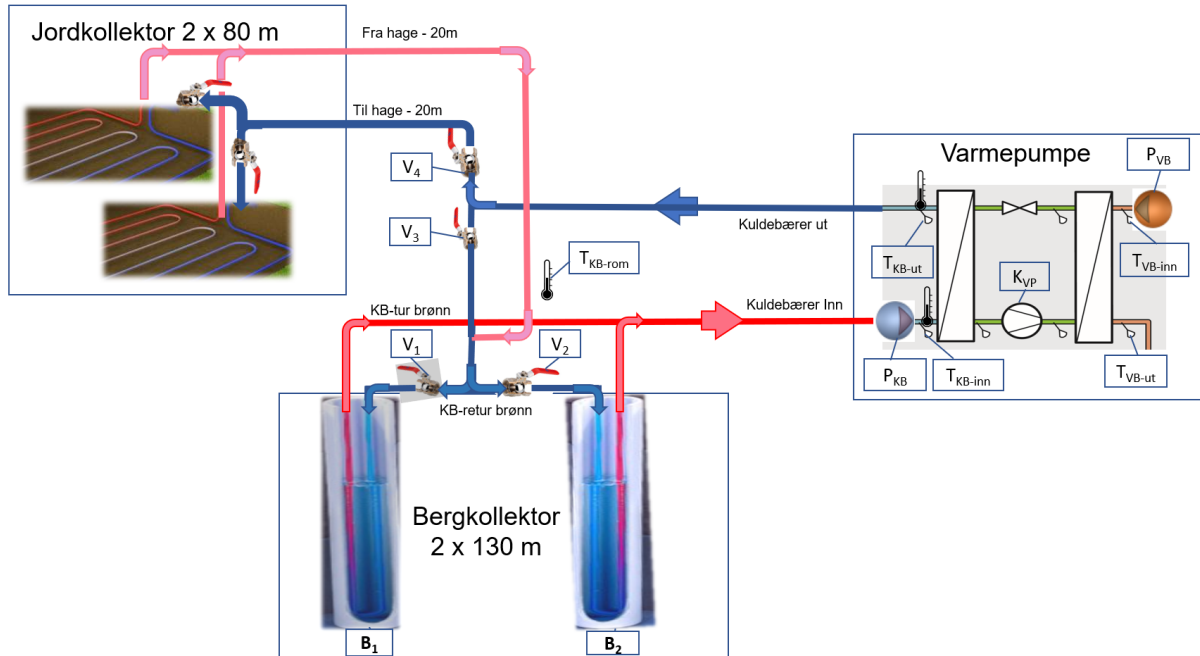
Det ble valgt å legge Nibe sin anbefaling om «sparetips» til grunn [1, s.23], da varmtvannsdistribusjon ble installert uten foran koblede termostater (reguleringsventiler). Se vedlegg 11.5 for plantegning av bolig.



Figur 4-7 t.v. topp etg. viser Selencio plate. t.h. flytsparkling kjeller

4.3 Kuldebærer

Væske/vann-varmepumpen har en kuldebærer som henter varmeenergi fra to brønner og jordsløyfe. Jordsløyfen kan ikke driftes alene og fungerer som en forvarmer for kuldebærervæsken før den ledes tilbake til brønnene.



Figur 4-8 Illustrasjon av kuldebærerkrets, sammensatt av jord- og brønnkolektor

Kuldebærer ut fra de to energibrønnene, går så inn i en varmeveksler som overfører energien hentet fra KB-kretsen over til fordamperen.

KB-kretsen har fire ventiler som muliggjør drift med ulike kombinasjoner av berg- og jordvarme. Tabell 4-2 illustrerer mulige driftsinnstillinger for bergvarmeanlegget. Det er denne unike muligheten til å kombinere som gjør det mulig å utføre ulike forsøk på anlegget og at Fjellstølveien ble valgt som case.

Tabell 4-2 Beskrivelse av kuldebærer energiopptak-berg-/jordvarme

Funksjon/objekt	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄
Brønn 1 alene	X		X	
Brønn 2 alene		X	X	
Brønn 1 og 2	X	X	X	
Brønn 1 + jordsløyfe	X			X
Brønn 2 + jordsløyfe		X		X
Brønn 1 og 2 + jordsløyfe ¹	X	X		X

¹ Slik anlegget kjøres ved normal drift

Brønnene har en dybde på 130 m hver og er plassert 15 meter fra hverandre.

Jordvarmekretsene er på omtrent 80 m hver, i tillegg til ca. 40 m med transport til og fra anlegget.

Mediet i kuldebærersløyfen er HX35. Dette er en blå væske bestående av vann og denatureert etanol. Spesifikasjoner for mediet er listet i tabellen under.

Tabell 4-3 [15]

Spesifikasjoner HX35	
Konsentrasjon	35 %(vol.)
Tetthet	0,96 kg/dm ³
Flammepunkt	27 °C
Kokepunkt	83,7 °C
Frysepunkt	-17,5 °C
Spesifikk varmekapasitet (ved 20 °C)	4200 J/kgK

Mediets frysepunkt er -17,5 °C og regnes derfor som frostsikker ned til denne temperaturen. Nibe sine fabrikkinnstillinger gjør at varmpumpen automatisk stoppes dersom kuldebærer temperatur skulle gå under -12 °C. Det ligger dermed en sikkerhetsmargin på 5,5 °C, som forhindrer at kuldebærer fryser og forårsaker skade på anlegget.

Brukermanual oppgir at KB-pumpens nominelle volumstrøm er 0,29 l/s med tilhørende variabel effekt fra 20-180 W [16].

Varmeopptagelse i KB-sløyfen kan uttrykkes ved følgende formel:

$$Q_{\text{totalt avgitt KB}} = Q_{\text{brønn 1}} + Q_{\text{brønn 2}} + Q_{\text{jordsløyfe}} \quad (4.1)$$



Figur 4-9 Berggrunnsdata for området [17]

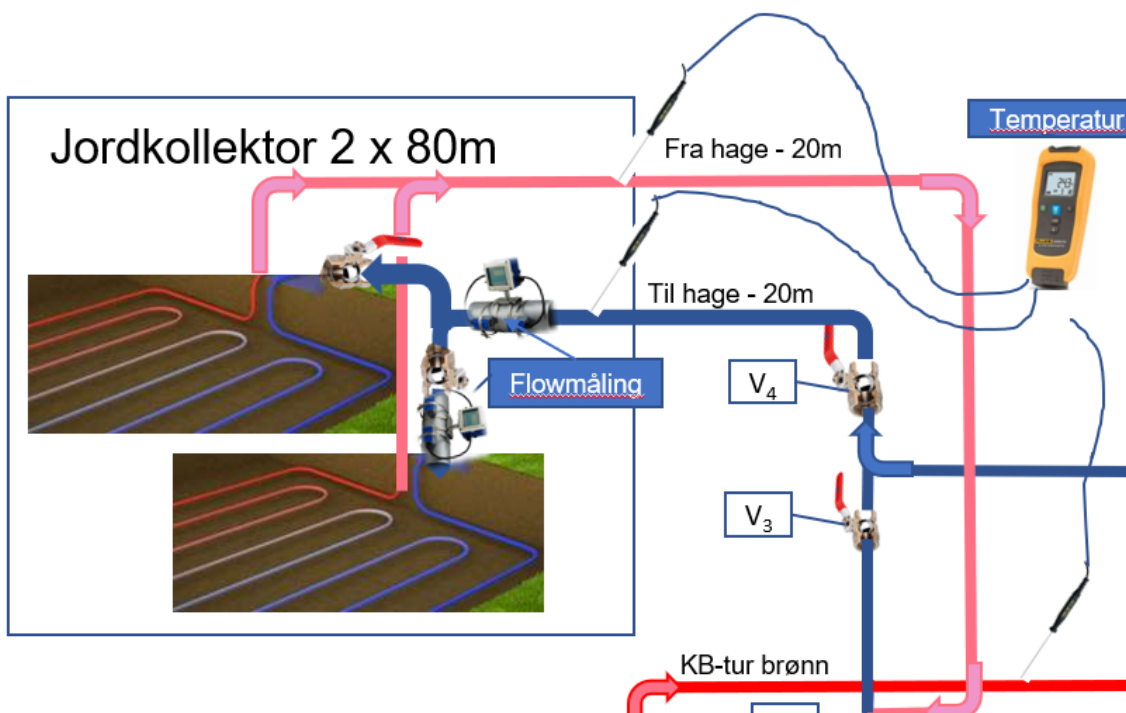
Som nevnt i kap 3.1 er varmeopptaket til brønnen avhengig av mineralsammensetningen til berget. Bergarten regionalt i området er fyllitt [17]. Fyllitt er en metamorf bergart som består av kvarts, glimmer, staurolitt og pyritt [18]. Den termiske konduktiviteten til denne bergarten ligger normalt på 3 W/mK med et variasjonsområde fra 1,5 til 4,5[19].

4.4 Kuldebærer - kalibrering og innregulering

Ettersom analysene er utført på grunnlag av målinger hentet fra Nibe Uplink og kalkulasjoner hentet fra selve varmepumpen var det et ønske om å etterprøve oppgitte data.

IKM Laboratorium AS ble derfor kontaktet med forespørsel om de hadde utstyr som kunne lånes ut i forbindelse med verifisering av måldata. Positiv tilbakemelding ble gitt og utstyr for strømningshastighet og temperatur kalibrering ble hentet sammen med tilhørende kalibreringssertifikat.

Utført kalibrering ble begrenset til å gjelde kun KB-krets. Figuren under illustrerer kalibreringspunktene.



Figur 4-10 illustrasjon av kalibreringspunkter for temperatur og flowmåling

Nibe oppgir KB pumpekapasitet med benevnning l/s. Ettersom volumstrøm beregnes på grunnlag av mediets hastighet ble kalibreringsseansen innledet med kontrollmåling av kollektorslange

4.4.1 Verifisering av volum i kuldebærer



Figur 4-11 Verifisering av kuldebærer volum

Tabellen under viser beregning av volum i jordkolektor.

Tabell 4-4

Verifisering " PE40-Kollektorrør"

Ytterkappe	40 mm
Plast	2,5 mm
Innerdiameter	35 mm
Volum pr. meter " PE40-Kollektorrør"	0,96 dm ³

"PE40-Kollektorrør" lengde

Jordsløyfe 1	80 m
Jordsløyfe 2	80 m
Jordsløyfe "Transportrør"	40 m
Brønn 1 a 130 m	260 m
Brønn 2 a 130 m	260 m
Total lengde	720 m

" PE40-Kollektorrør" volum

Jordsløyfe	192,4 dm ³
Brønn 1 a 130 m	250,1 dm ³
Brønn 2 a 130 m	250,1 dm ³
Total Vol	692,7 dm ³

4.4.2 Strømningsmåling

"Clamp on" strømningsmåler ble først festet på rørstykket oppstrøms jordsløyfe. KB-pumpe ble så satt i manuell for så å måle strømning ved stegvis endring i pådrag. Pådraget varierte fra 100 % til 5 % med et intervall på fem prosent mellom hver avlesning.

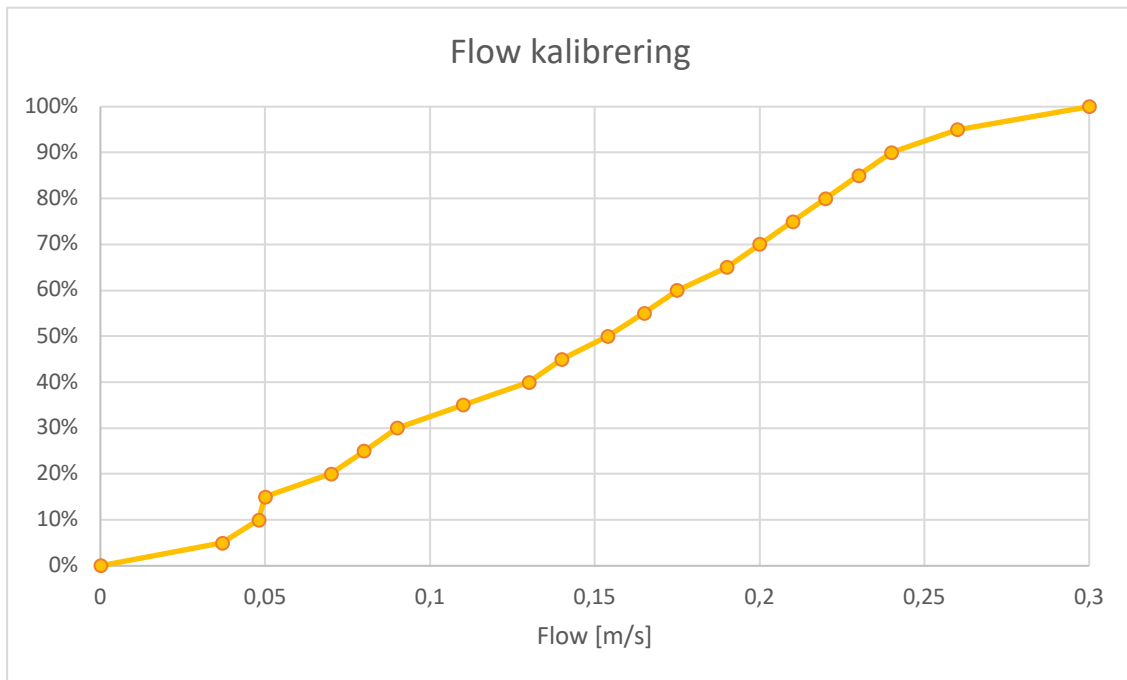
Måleinstrumentet ble deretter koblet til etter forgreningen av jordsløyfe. Dette for å undersøke om strømningen fordelte seg likt mellom de to forgrenede kollektorrørene.

Måleinstrumentet benyttet er et Ultrasonic Flowmeter fra Fuji electric.



Figur 4-12 Illustrasjon flowmåler

Grafen under illustrerer målt strømning mot pådrag på pumpen. Nibe oppgir i brukermanualen at kuldebærer har en volumstrøm på 0,29 l/s, dette stemmer med høyest målt hastighet var 0,303 m/s ved 100 % pådrag på KB-pumpen.



Figur 4-13 Flowkalibrering av KB-pumpe

4.4.3 Innregulering

Ved kontrollmåling av strømning, etter T-fordeling, ble det målt 0,141 m/s.

Strømningsfordelingen er vist i figuren under.



Figur 4-14 Forgreningsventiler jordsløyfe

For å få lik strømning i begge jordsløyfe ble det foretatt en innregulering ved å justere på åpningen til ventil V_x . Etter innregulering ble strømningen målt til 0,15 m/s. Dette er halvparten av det som går i ett rør før forgrening, noe som indikerer at strømmingen nå deler seg likt på de to jordsløyfe ved fullt pådrag på pumpen. V_y har full åpning på ventil.

4.4.4 Temperatur kalibrering

Temperaturmåling ble foretatt på tre forskjellige punkter på KB-sløyfen: Ved KB-inn, KB-ut og «romtemperatur» (ut fra jordsløyfe). Dette for å kontrollere om termometerne oppgav reelle verdier. Termometer og sensor brukt under kalibrering er fra fabrikanten Fluke.

Første temperaturkalibrering ble utført i rørstrekket mellom kuldebærer-ut og forgrening av jordsløyfe. Om en ser bort fra det 15 m lange rørstrekket er det i prinsippet KB-ut som måles. Her ble det målt $-1,33\text{ }^{\circ}\text{C}$ sammenlignet med Nibe Uplink sin angitte temperatur på $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Her er vi innenfor $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tilsvarende for KB-Inn.



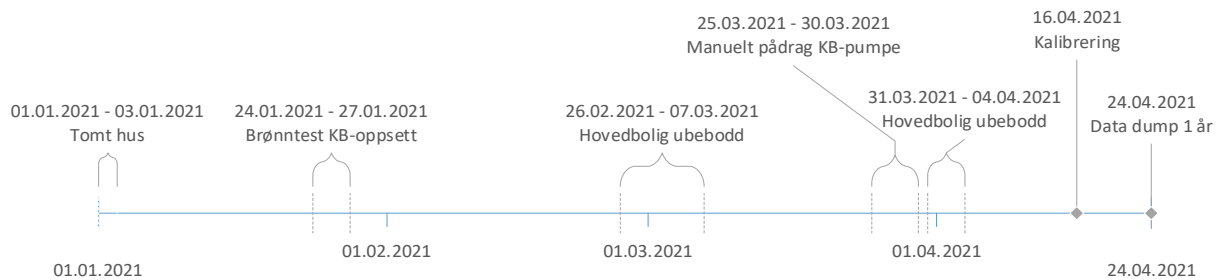
Figur 4-15 Temperaturkalibrering – Fluke 5615 med nøyaktighet $\pm 0.021^{\circ}\text{C}$

Det oppstod usikkerhet forbundet med "romtemperatur"-måleren, da denne ble påmontert i ettertid og muligens ikke var tilstrekkelig isolert. I rørstrekk etter jordsløyfe og før returbrønn, ble det målt $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, Nibe registrert en temperatur på $5,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dette er en differanse på 2,7 grader.

5 Brønntest

I dette delkapittelet beskrives forsøkene, med et eksplorativt design, utført på bergvarmeanlegget. Hensikten med testene var å observere hvordan endringene påvirket effektiviteten til varmepumpen.

Testperioden, som vist i tidslinjen, varte fra 1. januar til slutten av april.



Figur 5-1 Tidslinje test- og observasjonsperiode

I denne perioden ble kuldebærer driftet med ulike kombinasjoner av brønn og jordsløyfe i tillegg til endring av driftsparameter til kuldebærerpumpe.

Tidsintervallet fra 24. januar til 27. januar skiller seg ut da fokus endres fra «parameter optimalisering» til ren ytelsestest. Ulike kombinasjoner av brønn og jordsløyfe testes. Forsøkene har oppstart ved midnatt og varer nøyaktig ett døgn hver.

Data fra energimåler (R) og det lokale displayet på varmepumpen (A) noteres, og loggføres i eget regneark (bokstaver henviser til figur 4-3). I tillegg blir driftsdata kontinuerlig logget i Nibe Uplink systemet. Har da systemets historikk som da kan verifiseres mot manuelt logget data.

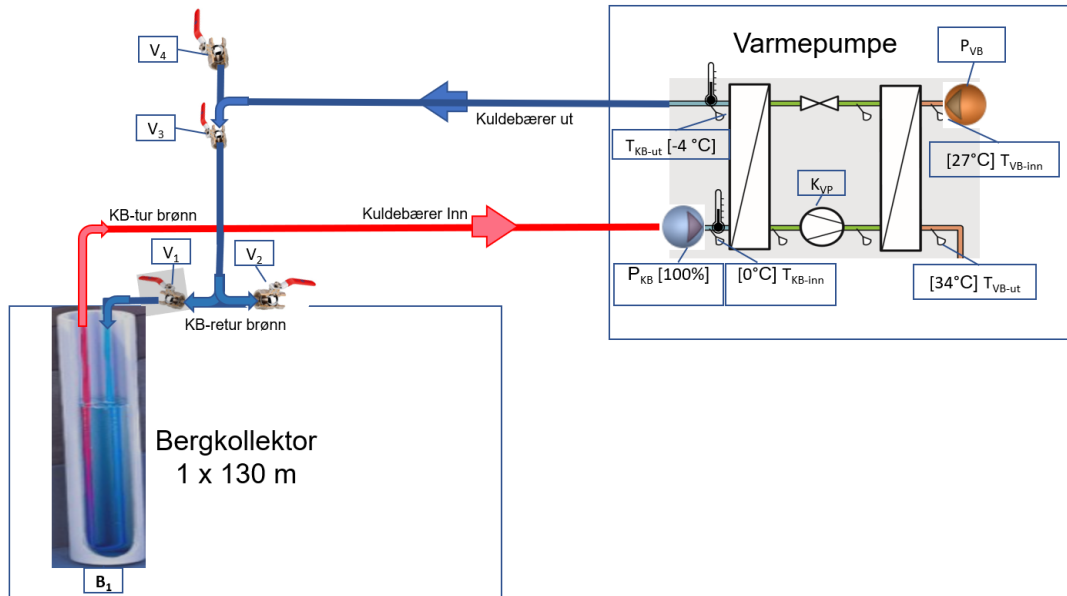
5.1 Termisk responstest 24. – 27. januar

Fra den 24. til den 27. januar ble varmepumpen opererte ved følgende oppsett.

- 1) Én brønn u/jordkollektor i auto
- 2) Én brønn m/jordkollektor i auto
- 3) To brønner u/jordkollektor i auto
- 4) To brønner u/jordkollektor med selvvalgt ΔT

5.1.1 Én brønn u/jordkolektor (24.1.21)

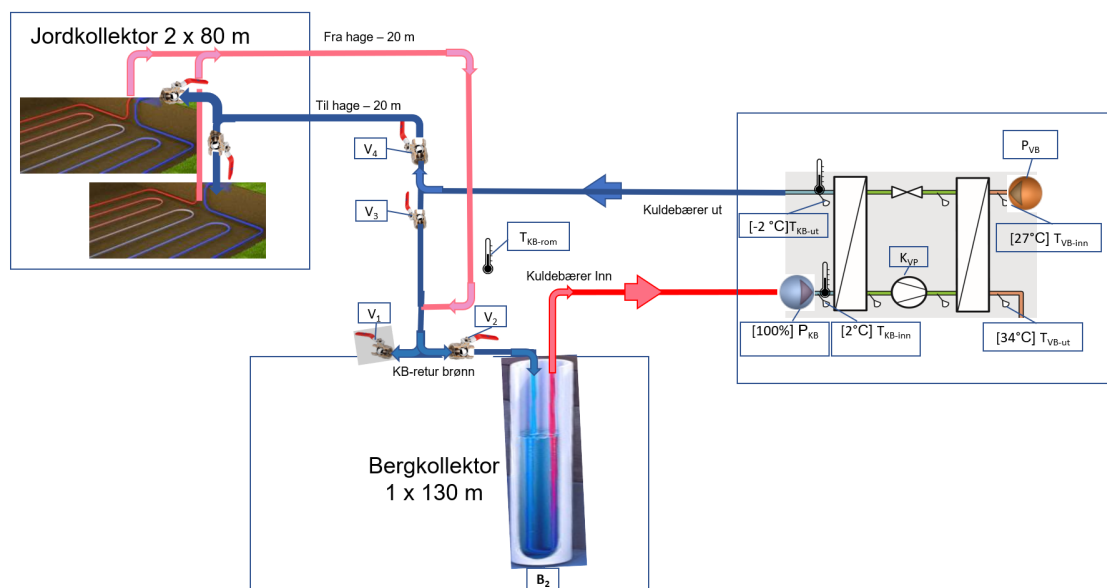
Stengte ut til jordsløyfe og til en av brønnene. Registrerte målinger i løpet av ett helt døgn. Pumpen ble drifet med auto innstillinger, kuldebærer etterstreber da å ha en deltatemperatur på fire grader. Oppsettet er illustrert i figuren under.



Figur 5-2 Illustrasjon av oppsett av kuldebærer "Én brønn u/jordkolektor".

5.1.2 Én brønn m/jordkolektor (25.1.21)

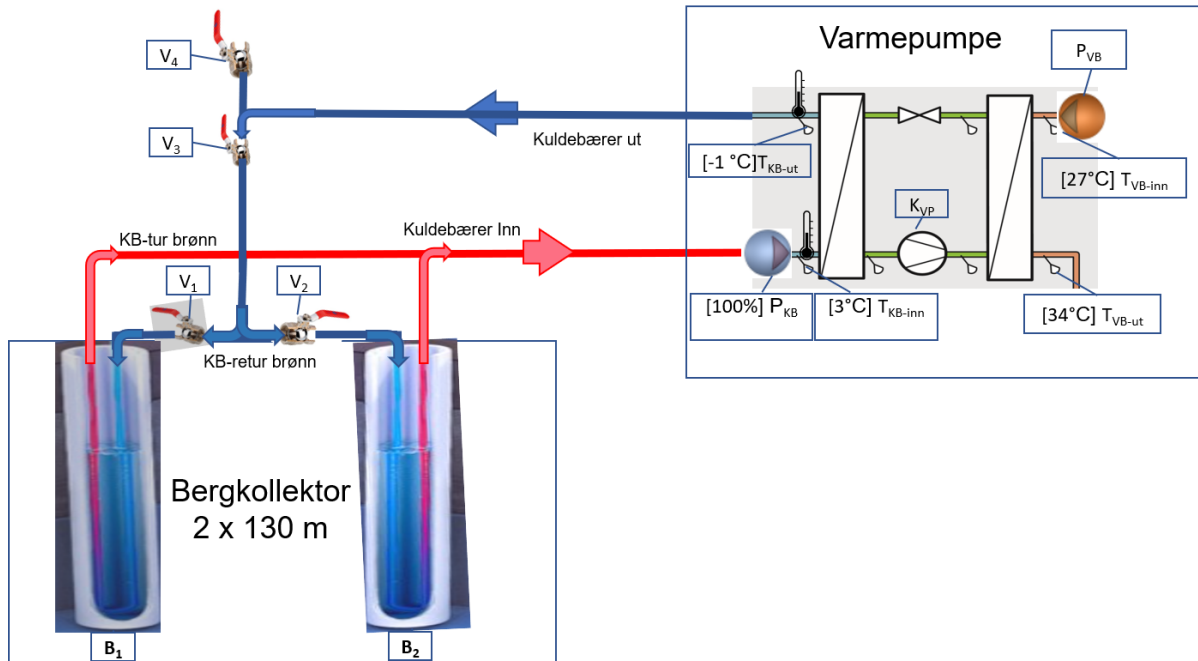
Ved midnatt ble oppsett "Brønn 2 + jordsløyfe" valgt. Det ble lagt om på hvilken brønn som var i drift ved å åpne V₂ åpnet og stenge V₁. Åpnet opp V₄ til jordkolektor og stengte så V₃ retur til brønn. Oppsettet er vist i figuren under, henter varmeenergi fra én brønn og jordkolektor.



Figur 5-3 Illustrasjon av oppsett av kuldebærer "Én brønn m/jordkolektor".

5.1.3 To brønner u/jordkollektor (26.1.21)

Etter testen med én brønn og jordkollektor ble det tatt en test der begge brønnene var i drift, men uten jordkollektoren. Endret oppsett ved å åpne V_1 og V_3 for så å stenge V_4 . Dette oppsettet er slik kuldebærer til varmepumpen originalt var tiltenkt.



Figur 5-4 Illustrasjon av oppsett av kuldebærer "To brønner u/jordkollektor".

5.1.4 To brønner u/jordkollektor selvvalgt ΔT (27.1.21)

Den siste kuldebærer tilstanden som ble utprøvd var likt som oppsettet over, men med en selvvalgt deltatemperatur. Delta temperaturen over kuldebærer ble satt til 7°C .

5.2 Kontinuerlig drift og parameteroptimalisering

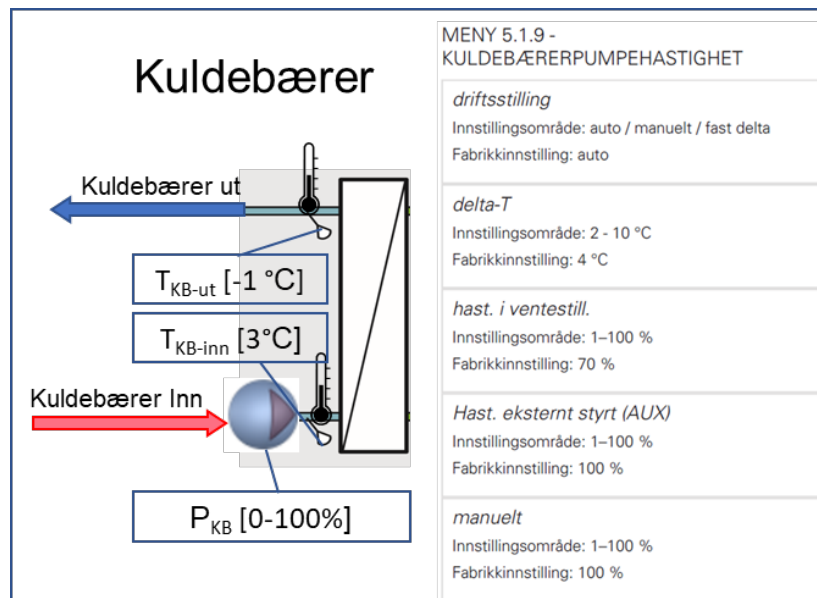
Sett bort i fra perioden med termiskrespons test, stod brønnene som i normal drift (Brønn 1 og 2 + jordsløyfe). Kuldebærerpumpen ble operert på tre ulike måter:

- 1) Auto
- 2) Selvvalgt ΔT
- 3) Selvvalgt % pådrag

For å forklare hvordan dette lar seg gjøre er det i figuren under lagt til en prinsippskisse kuldebærer/fordamper – varmeveksler. Temperaturfallet over varmeveksleren eller delta T kan uttrykkes ved formel 3.6.

Det er pådraget på kompressor og kuldebærerpumpen (P_{KB}) som påvirker temperaturfallet over KB-varmeveksleren ved å endre hastigheten på mediet som sirkulerer i KB-kretsen.

KB-pumpen kan kjøres i auto, da vil regulere mot en $\Delta T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$. De andre alternativene er å kjøre med en selvvalgt ΔT eller med selvvalgt prosent pådrag på KB-pumpe.



Figur 5-5 Illustrasjon av kuldebærer ΔT

Nevner i forbindelse med testen at varmtvannsinstilling forble uendret, valgt modus var «Økonomi»

- Start produksjon varmtvann $38 \text{ }^\circ\text{C}$
- Stopp produksjon av varmtvann $48 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.2.1 Kontinuerlig drift og parameteroptimalisering Fra 23.03. til 31.03.

I slutten av mars ble det igjen foretatt en gradvis og systematisk endring deltatemperatur og direkte styring av pådraget til kuldebærerpumpen.

5.2.2 Varmepumpens arbeidsområde

I periodene fra 25. februar til 7. mars og fra 31. mars til 4. april var hoveddelen av huset tomt, mens leiligheten var bebodd. I nevnte perioder ble husets «vannbåren varme» sirkulasjonskretser stengt av. I tillegg ble også ventilasjonsanlegget skrudd av.

6 Resultat

Både lagring av energi i berg og hvordan oppnå høyest mulig årsvarmefaktor handler i hovedsak om hvordan å få mest mulig avkastning fra investeringen i varmepumpeanlegget. Analysene fra forsøkene knyttes opp mot COP da en alltid etterstreber en høyest mulig årsvarmefaktor.

Basert på Lord Kelvins utsagn “if you can not measure it, you can not improve it” [20], så nærmer vi oss oppgavens kjerne. Det nytter lite å lagre energi i berg om det ikke forbedrer ytelsen til varmepumpen. Analyse av målinger ble utført med hensikt om å få en bedre forståelse rundt varmepumpeanlegget.

Den første interessante observasjonen ble gjort i tidsintervall 1. januar kl. 13 til 3. januar kl. 15 med andre ord 50 timer da huset stod tomt. Temperaturen inne i huset var konstant 22 °C. Ut fra dette kan vi si:

- Avgitt varme til huset: 245 kWh tilsvarende ca. 4,9 kW pr. time.
- All avgitt varme gikk til vedlikeholds oppvarming av varmtvann, dvs. ingen forbruk.

Dette tilsvarte 23 kWh fordelt på 50 timer som blir omtrent 460 W/t.

Av observasjonen går det frem at andel varmtvann, på tross av null forbruk, representerte 6,5 % av varmepumpens avgitte energi. Det produserte varmtvannet ble avgitt som tap til omgivelsene.

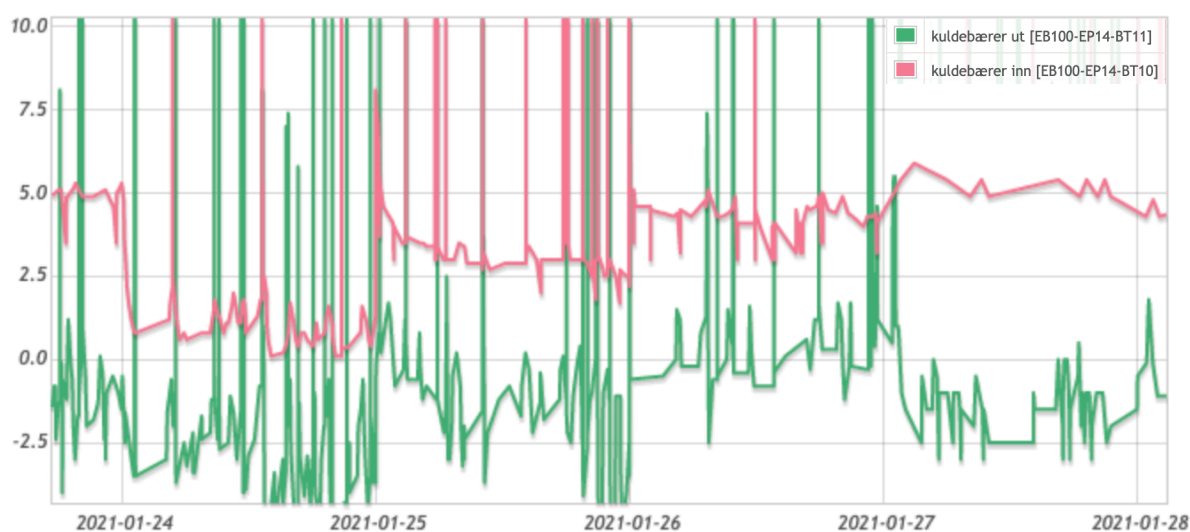
6.1 Resultat fra termiskresponstest 24.1. til 27.1.

Nøkkeldata fra brønntesten er oppsummert i tabell 6-1 under.

Tabell 6-1

Dato	24.jan	25.jan	26.jan	27.jan
Avgitt romoppvarming [kWh]	161	144	160	144
Avgitt varmtvann [kWh]	26	28	21	26
Sum avgitt effekt [kWh]	187	172	181	170
Andel varmtvann [%]	13,9	16,3	11,6	15,3
Tilført effekt Nibe [kWh]	48,7	43,5	43,4	40,1
Tilført Lyse [kWh]	82	77	67	63
Andel Pumpe /Lyse [%]	59,4	56,5	64,8	63,7
Avgitt – tilført [kWh]	119,9	120,0	120,2	120,3
COP	3,84	3,95	4,17	4,23
Snitt KB-inn [°C]	0,2	2,9	4,1	4,9
Snitt KB-ut [°C]	-3,6	-1,3	-0,4	-2
Energi fra KB-krets [kWh]	138,3	128,5	137,6	129,9
Energi uttak [W]	5762,5	5354,2	5733,3	5412,5
Energiuttak pr. m aktivt borehull [W]	44,3	-	22,05	20,8

Observerer at avgitt energi fra varmpumpe varierer fra 170 til 187 kWh/d og prosentandel varmtvann varierer fra 11,6 % og 16,3 %. Det er noe variasjon mellom dataene fra de forskjellige testdøgnene, men vurdert som sammenlignbare.



Figur 6-1 Historikk fra brønntest 24. til 27. januar

6.1.1 En brønn u/jordkollektor

Fremgår av tabell 6-1 at det i løpet av testens første døgn (24. jan) ble hentet ut 138,3 kWh varmeenergi fra brønnen. I dette tilfellet driftes kun med en brønn på 130 m, noe som tilsvarer 44,3 W/m aktivt borehull. Konsekvens av å belaste brønnen med dette energiuttaket er at temperaturen på KB-inn synker fra 8 °C og stabiliserer seg rundt frysepunktet. Observerer også at grafen har en gradvis fallende trend. Dersom KB-inn synker under frysepunktet, vil brønnen over tid kunne utvikle permafrost. Permafrost kan være en konsekvens av en underdimensjonert brønn, dette er derfor ikke et driftsområde det er ønskelig å operere i. Registrerte data fra dette testdøgnet og en forenklet versjon av formel 3.1, ble lagt til grunn for å anslå den termiske konduktiviteten til berget. (Da dette bare er en antagelse er det ikke tatt høyde for tykkelse og areal i denne utregningen.)

$$\lambda = \frac{Q_{\text{borehull}}}{m(T_2 - T_1)} \quad (3.1)$$

$$\lambda = \frac{44}{281,25 - 276,05} \frac{W}{mK} = 5,5 \frac{W}{mK} \quad (3.1)$$

$$Q = 44 \text{ W/m}$$

$$T_1 = 0,2 + 273,15 = 276,05 \text{ K}$$

$$T_2 = 8,1 + 273,15 = 281,25 \text{ K}$$

Antar fra utregning over at den termiske konduktiviteten til berget ligger rundt 5,5 W/mK. Bergarten i dette området er fyllitt, som nevnt i kapittel 4 så varierer den termiske konduktiviteten til fyllitt fra 1,5 W/mK til 4,5 W/mK og vil øke dersom berget er vannfylt.

6.1.2 En brønn m/jordkolektor

Den 25. januar ble det byttet om på hvilken brønn som var i drift. Umiddelbart etter omlegging ble kuldebærer inn målt til 8,1 °C som er sammenfallende med uforstyrret grunntemperatur. Dette indikerer et så stort tilsig av varme at brønnen kan "nullstille" seg på under ett døgn.

Observerer av graf at KB-inn stabiliserer seg på 2,9 °C dvs. 2,7 grader over testen dagen før. Forklaring på dette er at jordvarmesløyfe, på tross av lav utetemperatur, bidrar som en forvarmer på KB.

Bidrag pr. meter jordsløyfe og brønn vil i dette tilfellet være spekulasjon, men antatt til å bidra med et temperaturløft på én grad eller 25 % av energitilførselen. Anvender formel 4.1, en brønn og jordsløyfe i drift under forsøket, og uttrykket forenkles:

$$Q_{avgitt} = Q_{brønn} + Q_{jordsløyfe} \quad (4.1)$$

Fra tabell ser man at Q_{avgitt} i snitt var 5354 W. Finner bidrag fra brønn, ved å snu formel 3.2.

$$Q_{\frac{borehull}{m}} = \lambda * \Delta T = 5,5 \frac{W}{mK} * (8,1 - 2,9) K = 28,6 \frac{W}{m} \quad (3.2)$$

For å finne bidraget til hele brønnen multipliseres lengden med watt per meter aktivt borehull

$$Q_{brønn} = Q_{\frac{borehull}{m}} * l = 28,6 \frac{W}{m} * 130 m = 3718 W \quad (3.1)$$

Beregner så bidrag fra jordsløyfe ved å snu formel 4.1

$$Q_{jordsløyfe} = Q_{total} - Q_{brønn} = 5354,16 W - 3718 W = 1636,1 W \quad (4.1)$$

Kan da anta at KB henter 1636 W fra jordsløyfen.

Jordsløyfen er på 2 x 80 m = 160 m og hentet varmeenergi pr. meter blir da 10,22 W/m.

Energibalanse

Etter utført kalibrering ble det foretatt en beregning av energibalanse basert på data registrert i tabell 6-2.

Tabell 6-2

Enhet	kommentar	gj.snitt data fra 25. jan
Volum [dm ³]	volum 1m kollektor PE40	0,96
ρ [kg/dm ³]	tetthet HX35	0,955
C [J/kg K]	varmekapasitet HX35	4200
P _{KB} pådrag [%]	basert på snitt	100
flow [m/s]	hastighet på væske i KB	0,30
m [l/s]	volum flow	0,29
m [kg/s]	masse flow	0,28
T _{KB-inn} [°C]	Temperatur inn KB	2,9
T _{KB-ut} [°C]	Temperatur ut KB	-1,3
T _{rom} [°C]	Temperatur ut av jordsløyfe	2,7
T _{rom kal} [°C]	Justert for 2,7 grader feilvisning	0
Δ KB Veksler [K]	Delta over KB-varmeveksler	4,2
Δ jord [K]	Delta over jordsløyfe	1,3
Δ brønn [K]	Delta over brønn	2,9
Q _{jord} [Js]	Hentet varmeenergi fra jord	1517
Q _{Brønn} [Js]	Hentet varmeenergi fra brønn	3383
Q _{total} [Js]	totalt avgitt energi fra KB-sløyfe	4900

Varmeenergi fra jordkollektor og energibrønn er beregnet ut fra formel 3.2. Ser fra beregning at ca. 69 % av energien hentes fra brønnen, mens 31 % hentes fra jordsløyfen.

Watt per meter aktivt borehull vil i dette tilfellet bli:

$$Q_{borehull/m} = \frac{Q_{brønn}}{l_{brønn}} = \frac{3383 \text{ W}}{130 \text{ m}} = 26,03 \frac{\text{W}}{\text{m}} \quad (3.1)$$

Har ikke den termiske konduktiviteten til jordsmonnet. Denne vil variere i stor grad da den blir påvirket av nedbør og temperatur. Kan uttrykke et estimat på W/m for jordkollektoren.

$$Q_{\frac{jord}{m}} = \frac{Q_{jord}}{l_{jordkolektor}} = \frac{1517 W}{(2 * 80) m} = 9,47 \frac{W}{m} \quad (3.1)$$

Ved sammenligning av de to utregningene for antall W/m hentet ut fra jordsløyfen, med utgangspunkt i termisk konduktivitet beregning, får en et varmeenergiuttak tilsvarende 10,22 W/m. Beregning utført på grunnlag av data fra tabell 6-2 blir varmeuttaket på 9,47 W/m. Det er 7 % forskjell mellom de to beregningene.

6.1.3 To brønner u/jordkolektor

26. januar er begge brønnene (260 m aktivt borehull) i drift uten jordsløyfe. Ser av tabell at det er hentet ut 137,6 kWh dette døgnet, som tilsvarer et energiuttak på 22 W/m aktivt borehull. Differansen mellom uforstyrret grunntemperatur og stabil KB-inn er i dette tilfellet er fire grader, halvparten av temperaturdifferansen registrert den 24. januar, og antall W/m aktivt borehull er også halvert. Dette kan tyde på en lineær sammenheng mellom de to faktorene.

For å kontrollere den termiske konduktiviteten for berget så foretas utregningen også med data fra to brønner i drift:

$$\lambda = \frac{22}{281,25 - 277,25} \frac{W}{mK} = 5,5 \frac{W}{mK} \quad (3.2)$$

$$Q = 22 \text{ W/m}$$

$$T_1 = 4,1 + 273,15 = 277,25 \text{ K}$$

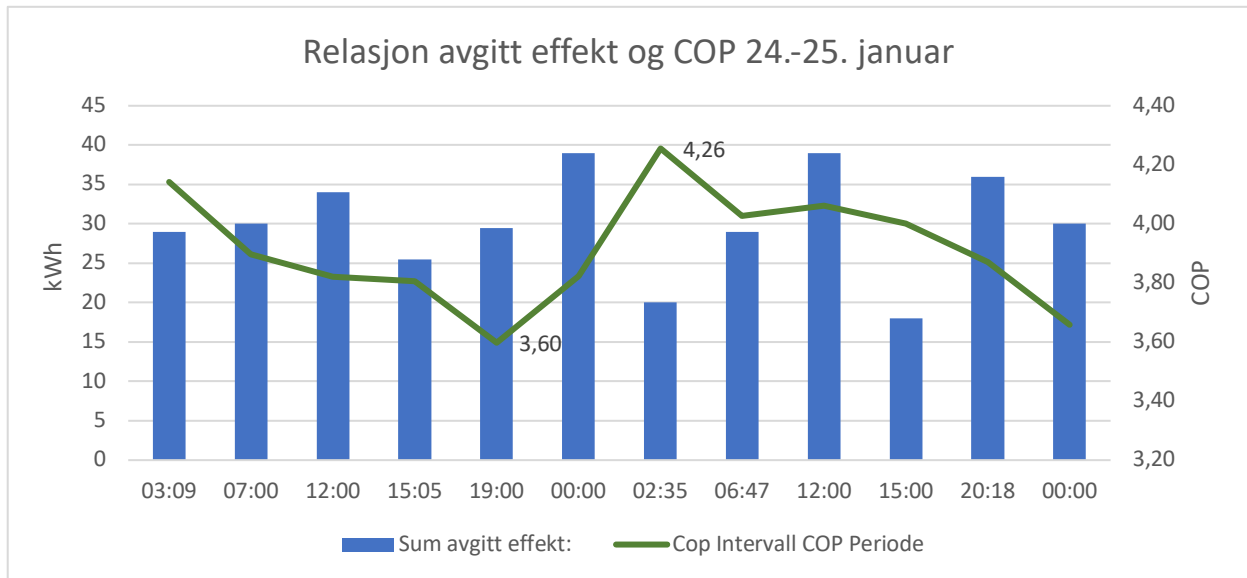
$$T_2 = 8,1 + 273,15 = 281,25 \text{ K}$$

6.1.4 To brønner u/jordkolektor selvvalgt ΔT

Den 27. januar avviker driften fra auto oppsett ved å sette en selvvalgt deltatemperatur på 7 grader over kuldebærer. Observerer i graf 6.1 at spriket mellom KB-inn og KB-ut øker, men at KB temperaturene har en fallende trend i løpet av døgnet. Dette viser at temperaturen i brønnene blir dratt ned og over tid vil en slik drift kjøle brønnene.

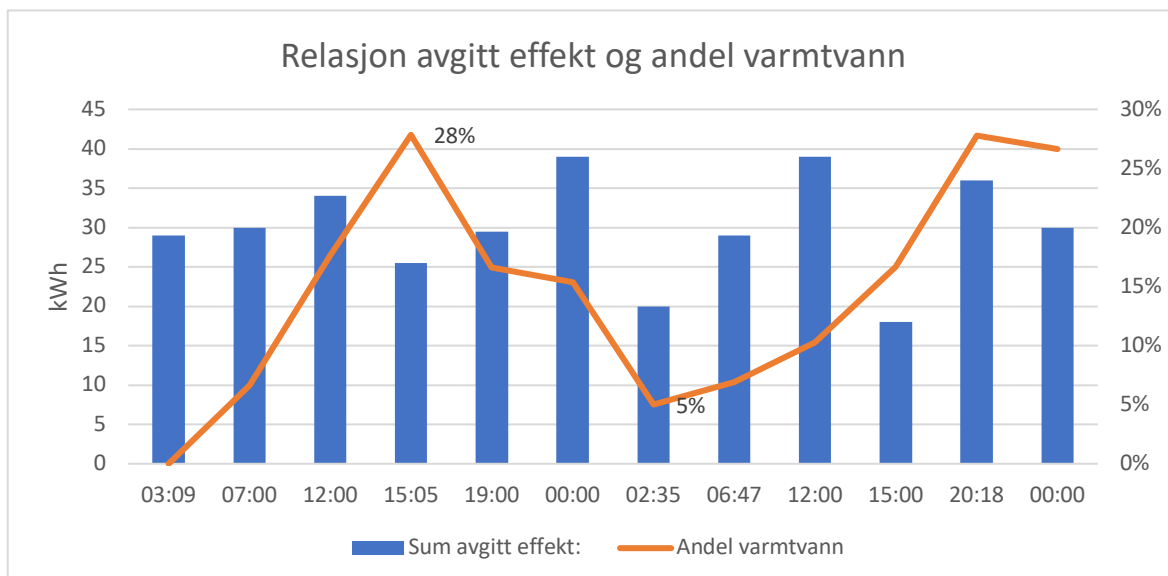
6.1.5 Analyse av resultat

Figur 6-2 viser sammenheng mellom den avgitte effekten til boligen og oppnådd COP i tidsrommet fra 24. januar til 25. januar. I figuren under observeres det at COP ligger noe høyere den 25. januar enn den 24. januar.



Figur 6-2 Relasjon mellom avgitt effekt og COP fra 24. tom. 25. jan 2021

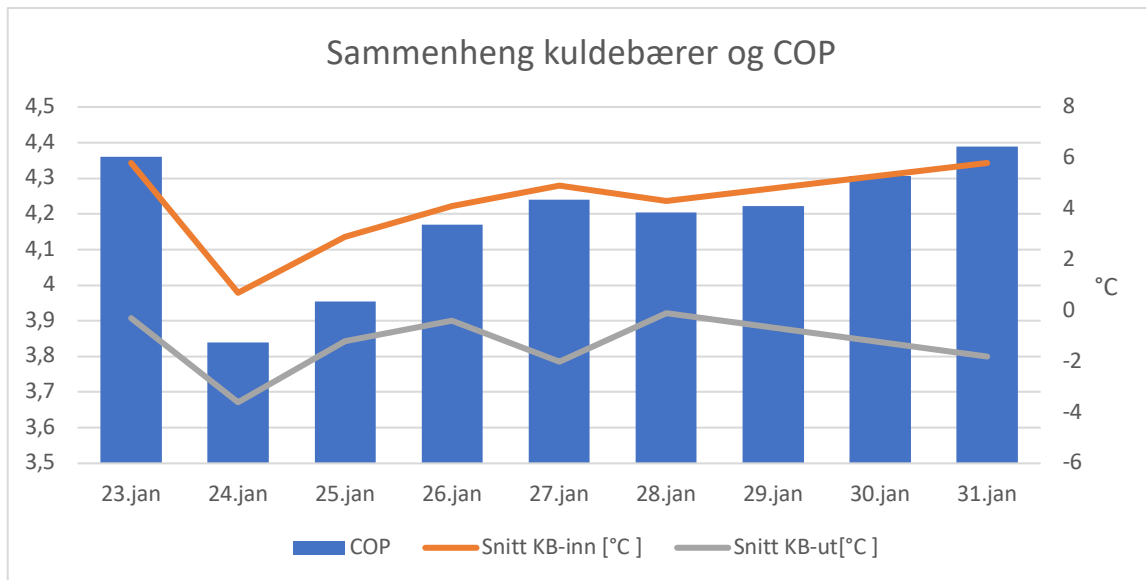
Figur 6-3 under viser hvor stor andel av den avgitte effekten i samme periode som gikk til produksjon av varmtvann. Observerer at den høyeste oppnådde COP-en sammenfaller med liten andel produsert varmtvann.



Figur 6-3 Relasjon mellom avgitt effekt og andel varmtvann fra 24. tom. 25. jan 2021

I figur 6-4 er det illustrert sammenhengen mellom deltatemperaturen over kuldebærer sløyfen og den oppnådde effektfaktoren. I figuren ser man at temperaturen til KB-inn og COP følger hverandre. Ved en synkende KB-inn synker COP og motsatt.

Dette kan tyde på at kuldebærer-inn har mer å si for effektfaktoren til varmepumpen enn det KB-ut har.



Figur 6-4 Sammenheng mellom kuldebærer og COP

Når en observerer resultat fra alle testdøgnene samlet så kan en se at varmepumpen oppnår en høyere COP med begge brønnene og jordvarmesløyfen i drift.

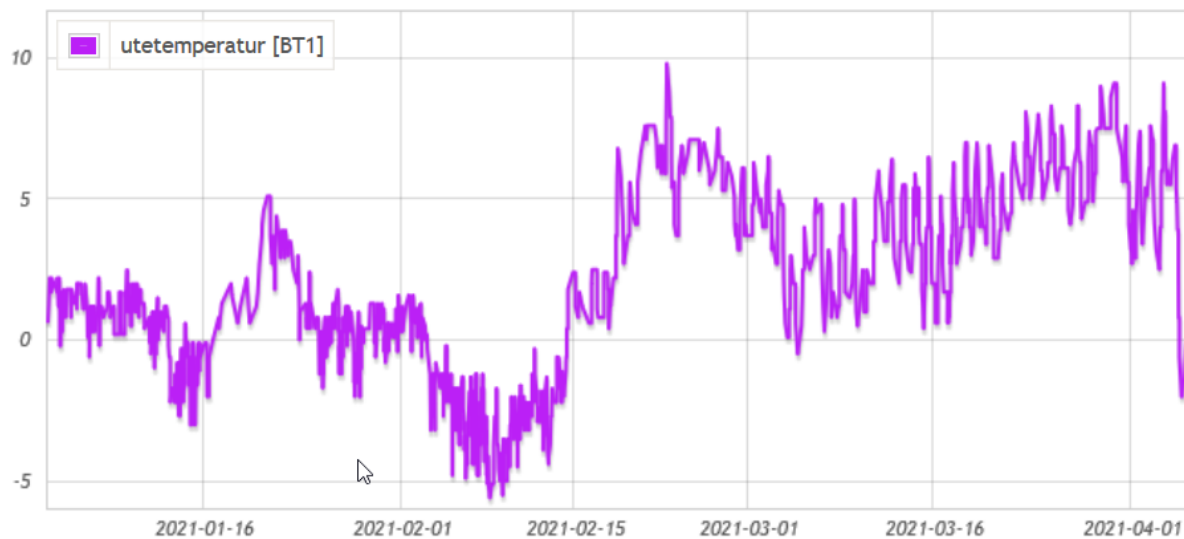
6.2 Kontinuerlig drift og parameteroptimalisering

Utvikler av varmepumpen har lagt til grunn at den i auto skal operere med en ønsket deltatemperatur på 4 °C over KB-varmeveksler. Rasjonale bak valg av en deltatemperatur på 4 °C er trolig basert på en avveining mellom tilført energi til kompressormodul og avgitt energi fra varmeveksler.

I et normalt bergvarmeanlegg bestående av kun én energibrønn vil en ved å redusere KB-hastighet oppnå en større deltatemperatur over varmeveksleren. Her må man samtidig være oppmerksom på at lav gjennomstrømning kan medføre et ujevnt energiopptak, slik at det oppstår en kjøle-effekt i øvre del av brønnen. Om man ser vekk i fra energiforbruket til KB-pumpen så vil man ved et normalt oppsett ønske å kjøre pumpen med fullt pådrag. Her må det foretas en avveining mellom hvor mye energi det er ønskelig å tilføre, sett opp mot det en

klarer å hente. Siden varmepumpene leveres med et standard oppsett er det grunn til å anta at Nibe har konkludert med at mest optimal drift oppnås ved en deltatemperatur på nettopp 4 °C.

Anlegget i Fjellstølveien er sammensatt av både berg- og jordvarme og har derfor andre driftsforutsetninger. Av nevnte grunn innføres de lokale klimaforhold som enda en variabel som vil påvirke effektfaktoren til varmepumpen. Utetemperaturen i testperioden er illustrert i figur 6-5 under.

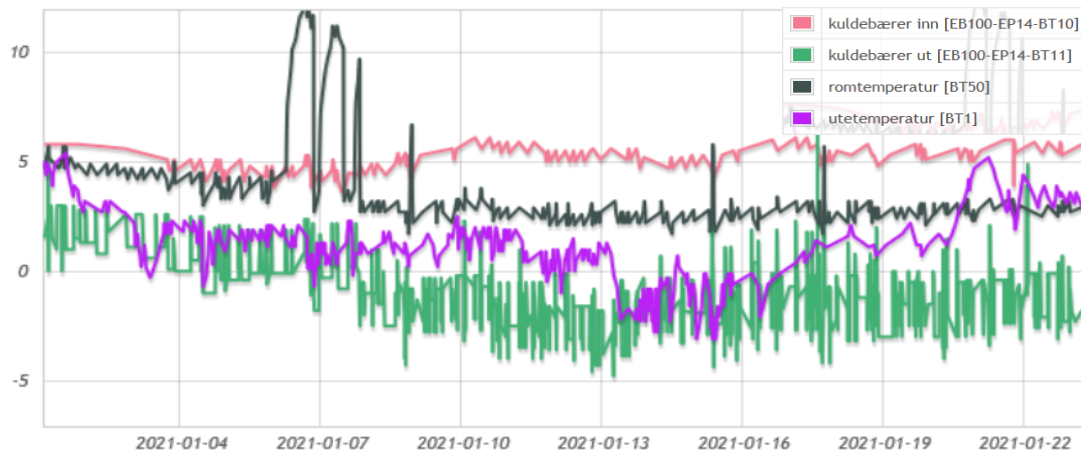


Figur 6-5 Historikk over utetemperatur under testperiode

Gitt at KB-ut er lavere enn utetemperaturen så vil jordsløyfen ta opp energi fra bakken og dermed fungere som en forvarmer, før kuldebærer-mediet går ned i brønnen. Forvarmingen vil redusere kjølevekslereffekt i øvre del av brønnen og i perioder med varmt vær bidra til temperaturøkning. Videre forsøk har som hensikt å finne optimale driftsparametere, i det som er den kaldeste perioden av året.

6.2.1 Endring av deltatemperatur og pådrag KB-pumpe

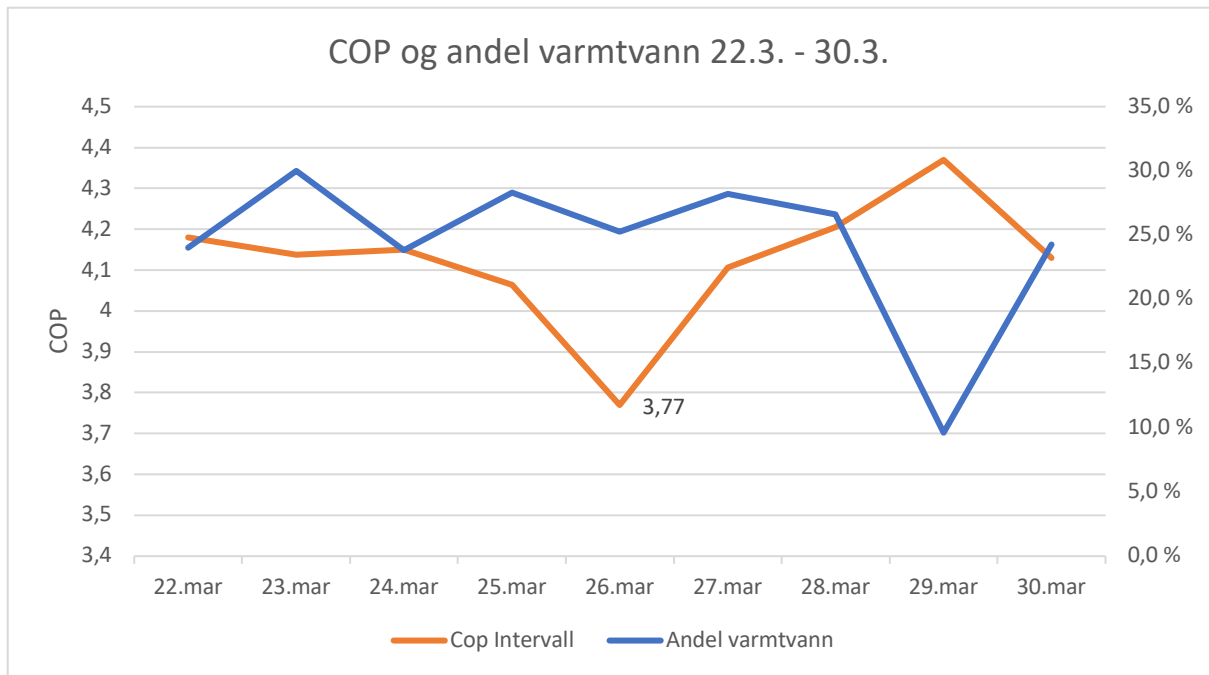
Figuren under er en grafisk fremstilling av sammenheng mellom de forskjellige temperaturmålingene oppgitt.



Figur 6-6 Nibe uplink trendlogg, periode 01.01. - 23.01.

Den lille kurven i grafen over viser en fallende utetemperatur frem til midten av januar. KB-pumpen går i auto. I perioden 6. - 9. januar gjøres det forsøk med å drifte uten jordsløyfe, noe som bidrar til å senke temperaturen på kuldebærer inn. Valgte derfor å koble inn jordsløyfen igjen, for så å gradvis øke deltatemperaturen over KB-veksleren. Ved justering av deltatemperatur ble det gjort følgende funn. En økende ΔT bidrar til en økt COP, frem til en når en deltatemperatur på 8 – 9 grader da snur COP-en og begynner å falle. Senket derfor skal-verdien til kuldebærerregulatoren igjen til $\Delta 7$ °C. Etter endringen blir det observert at COP øker.

Ved en mildere utetemperatur vil behovet for rom-oppvarming være mindre, og andel varmtvann vil øke. Figuren under illustrerer observasjoner fra den 23. til 30. mars. Også i denne testen ble det justert på deltatemperatur over kuldebærer. Startet morgenen den 22. mars med å sette en deltatemperatur på 7 °C, de påfølgende døgnene ble deltatemperatur over kuldebærer økt med en grad frem til den 25.03.

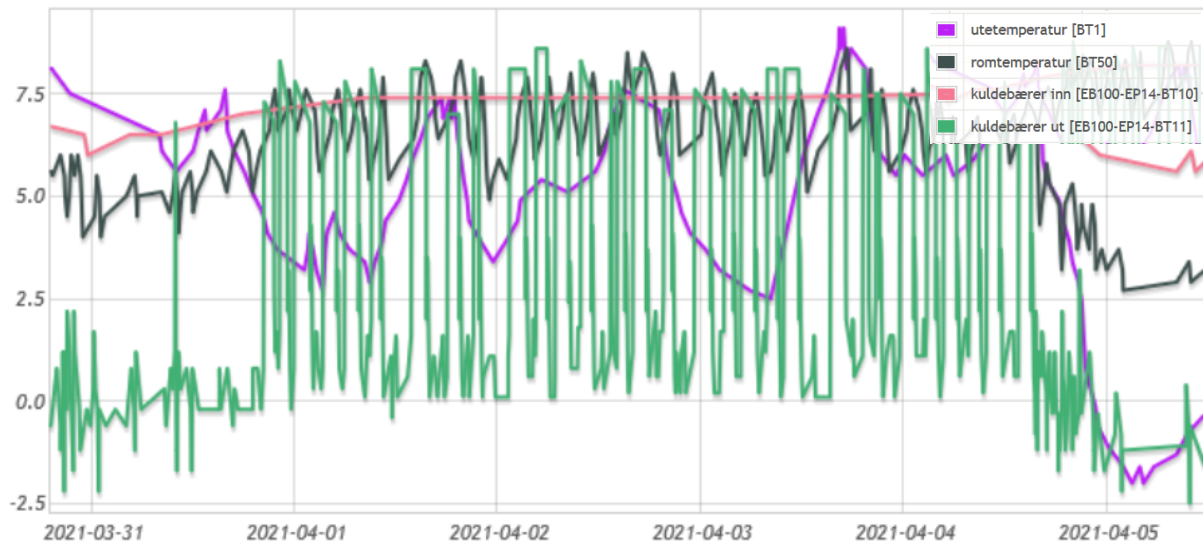


Figur 6-7 COP og andel varmtvann 22.3.-30.3.

Fra den 25. til den 26. mars ble pådrag til kuldebærererpumpen bestemt ut fra en innskreven prosent. KB-sirkulasjonspumpen ble den 25.03 satt i manuell med 100 % pådrag. Den 26.03. ble pådraget senket til 80 %. Observerte at COP den 26. mars utviklet seg i negativ retning. Observerer figur 6-7 at i perioder med lite energiuttak så vil energiforbruket til sirkulasjonspumpen i større grad påvirke COP. Som vist i figur 6-7, den 26. mars, vil et stort pådrag på KB-pumpen føre til en fallende COP.

6.2.2 Ending av varmebærerkrrets

Historisk trendlogg fra 31.03. til 05.04. oppsettet berg og jordvarme

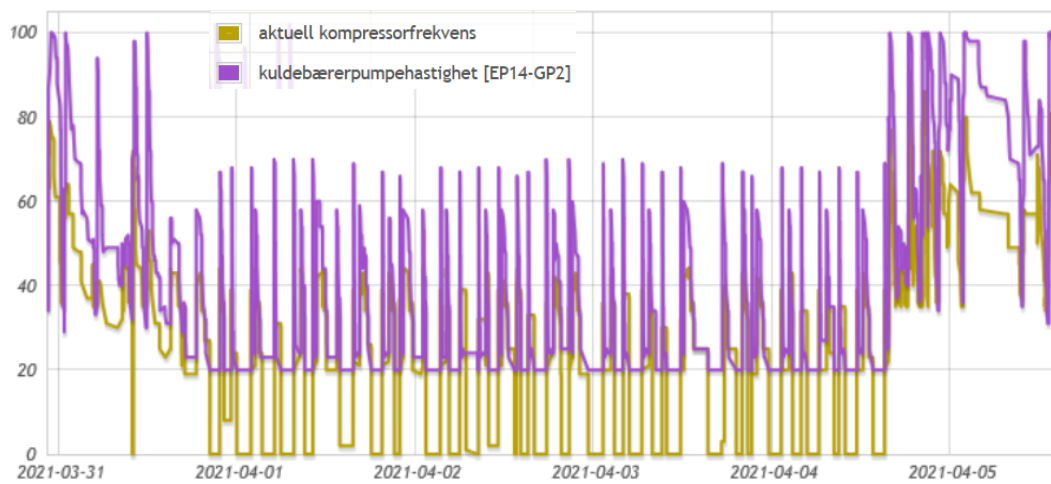


Figur 6-8 Historisk trendlogg fra 31.mars til 5.april

Loggen beskriver hva som skjedde da alle manuelle ventiler til distribusjon av varmebærer krets i hoved boligen ble manuelt stengt rundt kl. 11. Energibehovet er da begrenset til oppvarming og varmtvann til leiligheten i boligen. Situasjon er da at det totale varmebehovet er lavere enn det minste varmepumpen klarer å drifte kontinuerlig med. Dette betyr at kompressoren stopper i påvente av behov for varmeproduksjon.

Ved stopp av kompressor er KB-pumpen programmert til å gå med 20 % pådrag og tilsvarende 15 % for VB-pumpe. Kompressorens frekvens og KB-pumpens prosentpådrag er illustrert i figur 6-9 under.

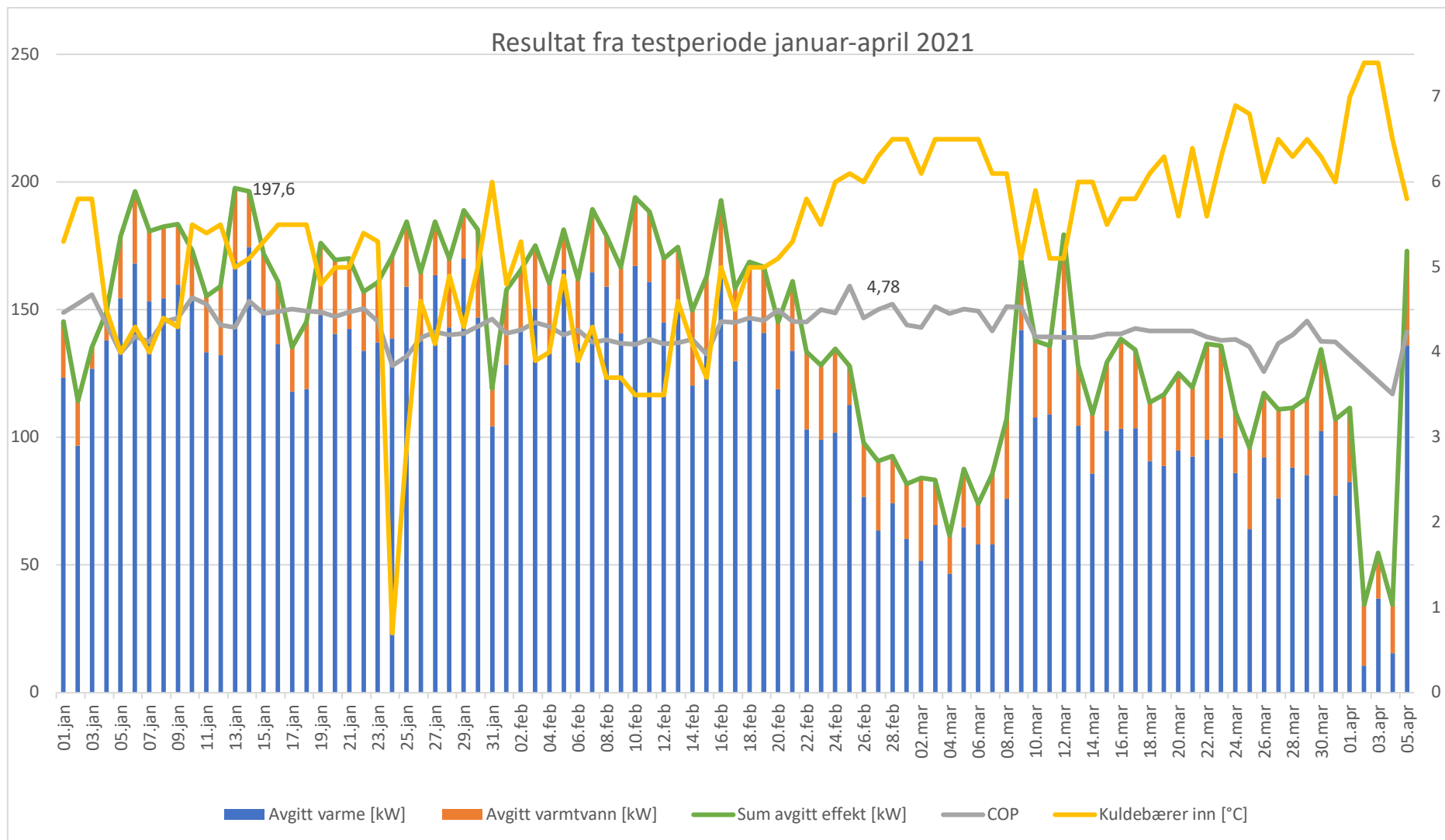
Følgen av en slik drift er at energi i stor grad hentes fra jordsløyfe, ved tilsvarende beregning som i tabell 6-2 kom det frem at 73 % av energibidraget hentes fra jordsløyfen. Brønnen vil da få naturlig tilsig av varme fra berget og gradvis stige til uforstyrret grunntemperatur. Siden romtemperatur ikke stiger over KB-inn så kalles dette en hvile/avlastnings tilstand. Dersom utetemperaturen hadde vært høyere slik at romtemperatur overstiger KB-inn ville det vært en situasjon der brønnen ble ladet.



Figur 6-9 Kompressor og KB-hastighet

I denne perioden har kompressoren driftet i snitt 15 t pr. døgn 65 % av tiden. For videre kommentering se resultat fra hele perioden samlet.

6.3 Resultat fra hele testperioden samlet



Figur 6-10 Data fra hele testperioden samlet

Figur 6-10 illustrerer sammenheng mellom total avgitt effekt (avgitt varme og avgitt varmtvann) sammen med beregnet COP og kuldebærer inn fra hele testperioden. Interessante observasjoner kommenteres i delkapitlene under.

6.3.1 Avgitt effekt

Som man kan se av figur 6-10 så har varmpumpen på det meste avgitt 197,6 kWh i løpet av ett døgn. Andel varmtvann i dette døgnet tilsvarte 14,8 % og COP ble beregnet til 4,3.

Sammenlignet med den laveste avgitte effekten til varmpumpa som var den 2. og 4. april tilsvarende 34,5 kWh med henholdsvis 69 % og 55 % andel varmtvann. COP i disse dagene er 3,5. Dette illustrerer pumpen sitt vide arbeidsområde og evne til å opprettholde en relativt god COP.

Høyest oppnådd COP var 4,78 den 25. februar. Figur 6-10 illustrerer at høy COP sammenfaller med en relativt høy temperatur på KB-inn og en lav andel varmtvann (12 %).

Nibe sin brukermanual oppgir under "sparetips" at en endring av innetemperaturen med en grad vil medføre en endring i energiforbruket med ca. 5 % [1]. I dette forsøket ligger fokus på ending av temperaturen til kuldebærer. Ønsker derfor å finne sammenheng mellom tilført energi og temperaturendring av kuldebærer-inn.

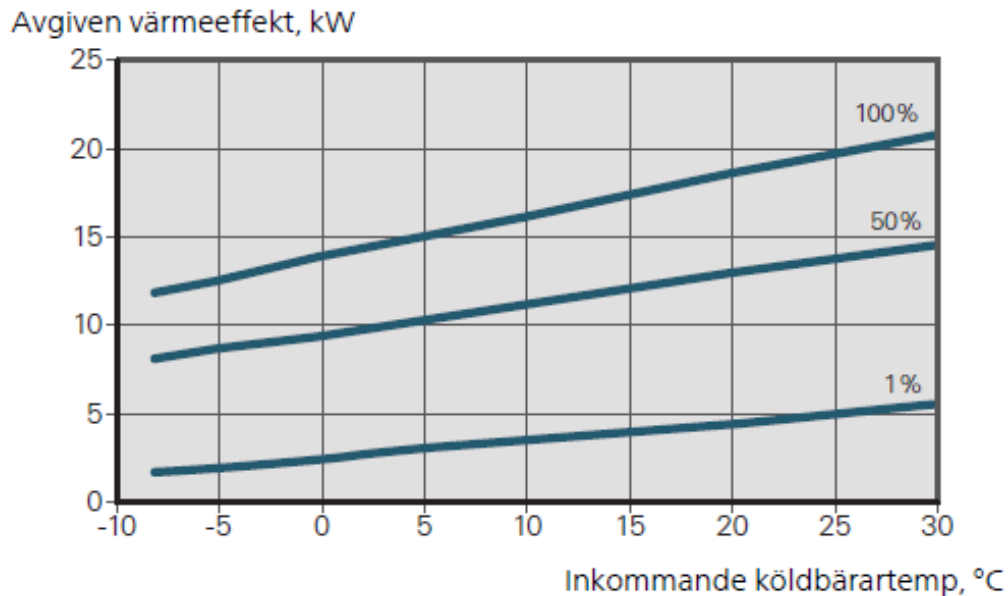
Tabell 6-3 Sammenheng mellom temperaturendring i KB-inn og energiforbruk

Dato	KB-inn	VV	COP	Differanse	Energiendring pr. grad
24.jan	0,5	13,9 %	3,839	-	-
25.jan	3	16,3 %	3,95	2,9 %	1,16 %
26.jan	4,3	11,6 %	4,17	8,6 %	2,27 %
08.mar	5,5	13,6 %	4,53	18,0 %	3,60 %
12.jan	5,25	13,9 %	4,32	12,5 %	2,64 %
01.jan	6	13,7 %	4,46	16,2 %	2,94 %
18.apr	6,8	17,0 %	4,38	14,1 %	2,24 %
08.feb	3,7	13,3 %	4,14	7,8 %	2,45 %

Beregninger er utført med utgangspunkt i data registrert den 24. januar. Sammenligner med datoer med omtrent samme andel varmtvannsforbruk (vv). Beregning viser at energiforbruket endrer seg med omtrent 2,3 % per grad celsius endring i KB-inn.

Som det kommer frem av metode så er prinsippet for vitenskapelig arbeid en stadig runddans mellom innhenting av informasjon, utførte målinger, analyser, konklusjon og hypotese. Funnene over vekket derfor interessen for figur 6-11 hentet fra Nibe installasjonsmanual som illustrerer sammenheng mellom varmepumpens avgitte effekt, gitt temperatur på kuldebærer inn.

F1255-12



Figur 6-11 Varmepumpen sitt arbeidsområde fra Nibe sin brukermanual [16]

Ved avgitt effekt på 12 kW og en COP 5,4 [16, s.12] så vil det tilsvare en tilført effekt på 2,2 kW. Antatt maksimal ytelse på alle komponenter som inngår i varmepumpen vil den tilførte effekten være konstant.

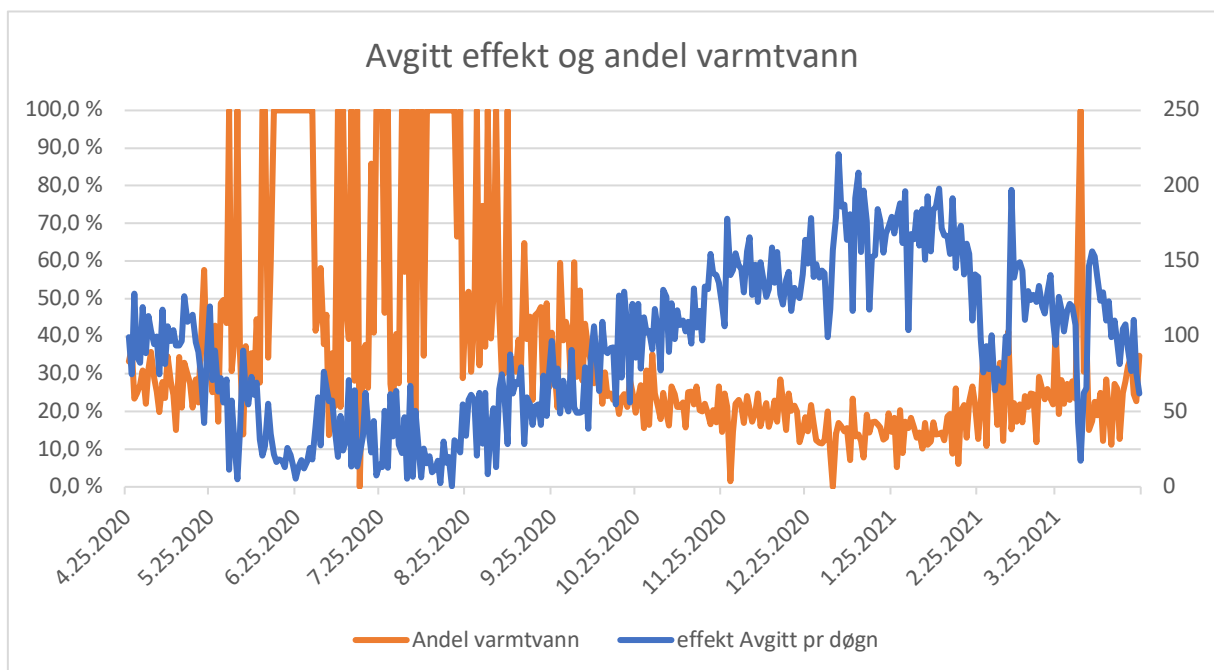
Tilsvarende for en KB-inn 10 °C og en tilført effekt på 2,2 kW leverer varmepumpen en effekt tilsvarende 16 kW.

Oppnår da 4 kW høyere effekt når KB-inn heves med 18 grader, fra -8 °C til 10 °C. En økning i avgitt effekt på 4 kW tilsvarer en 33 % forbedring. Om en fordeler forbedret effekt pr grad temperaturøkning så vil dette tilsvare 1,9 % økt effektivitet per grad.

Beregningen over illustrerer sammenheng mellom KB-inn og COP, tilsvarende 1,9%. Sammenlignet med resultat fra side 44, som var 2,3%, så er disse resultatene omtrent sammenfallende.

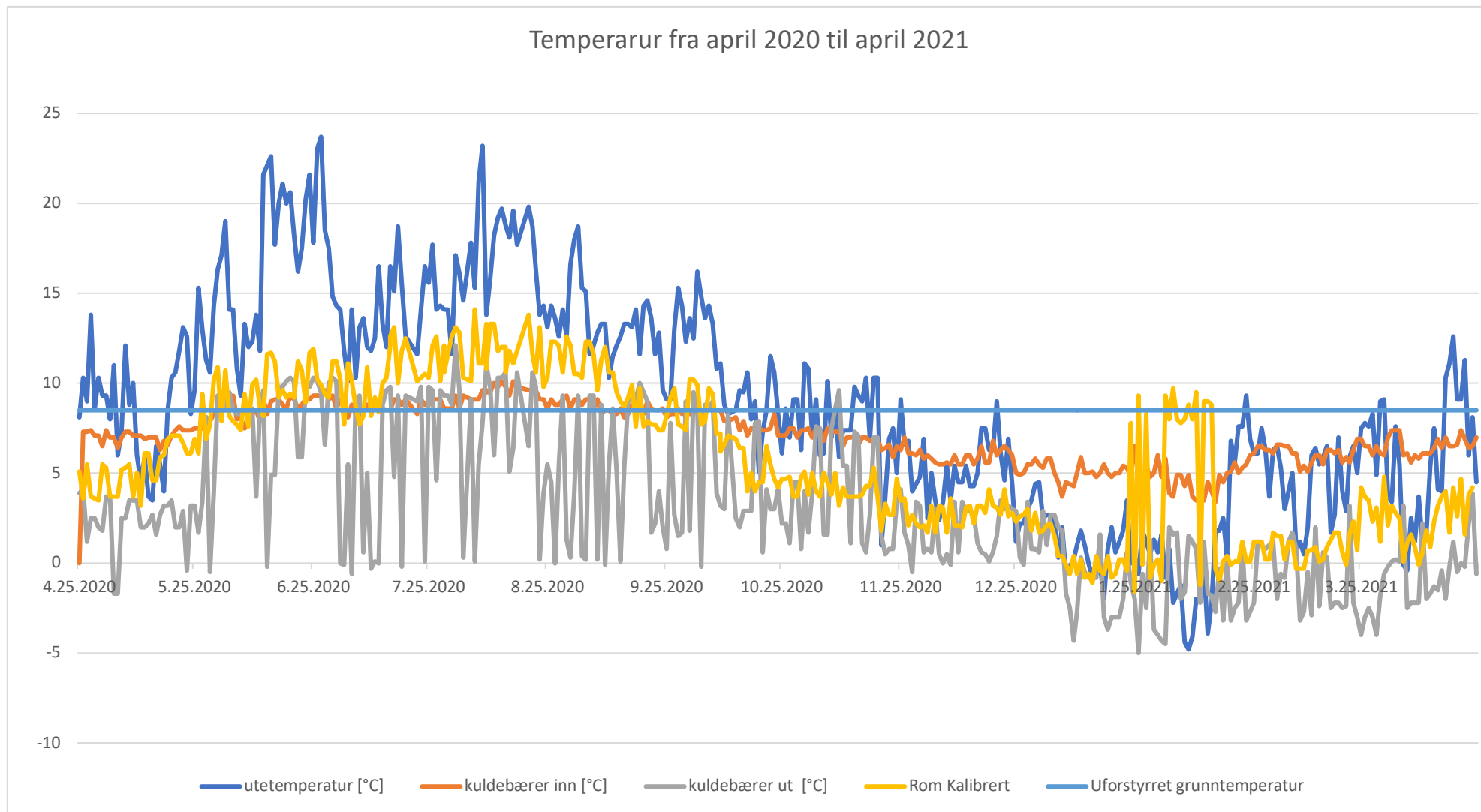
6.3.2 Observasjoner siste år

Den 2. april 2021 gikk all avgitt effekt med til produksjon av varmtvann og drift av kulde- og varmbærerpumpe. Det var m.a.o. ingen effekt som gikk med til boligoppvarming. På tross av dette holdt leiligheten i kjelleren en romtemperatur på 23 °C. Figuren under illustrerer at det i perioden juli - august 2020 også var lengre perioder der andel varmtvann utgjorde 100 % av kompressorens driftstid. Årsaken til at underetasjen holdes varm på tross av null tilført effekt er å finne i utforming av varmbærerretsen og effektiv distribusjon av varme. Gulvene i de to øverste etasjene, vil grunnet store vinduer, fungere som solfangere og lagre varmeenergi når utsatt for direkte sollys. Siden det ikke er installert termostater er vil varmbærermediet som sirkulere i rørene fungere som en varmeveksler. Oppnår dermed en svakt kjølede effekt, da overskuddsvarme transporteres bort og blir avgitt til leilighet, garasje og bunkers.



Figur 6-12 Avgitt effekt og andel varmtvann

Figuren under er loggede temperaturer over ett år. Den horisontale blå streken illustrerer den uforstyrrede grunntemperaturen til berget. Som man ser så løftes KB-inn over den blå linjen i de varme sommermånedene, dette er klare indikasjoner på at det kan lagres en liten mengde energi i et kortere tidsrom.



Figur 6-13 Årsoversikt temperatur

6.4 Analyse av forbruk fra oppstart november 2016 til mai 2021

Fra anlegget ble satt i drift den 18. november 2016 har det pågått en kontinuerlig forbedring og optimalisering av både ytelsen og forbruket til anlegget. Avgitt effekt til både varmtvann og oppvarming er angitt i tabell 6-4 under.

Tabell 6-4 Oversikt over forbruk fra oppstart

Dato	Avlest (inkl.tilvarme)		Sum intervall				antall dager	Forb. pr dag [kWh]
	Varme [kWh]	VV [kWh]	Varme [kWh]	VV [kWh]	Sum [kWh]	% VV		
18.11.2016	0	0						
13.05.2019	79554	19744	79554	19744	99298	19,9 %	906	109,6
13.05.2020	108582	27112	29028	7368	36396	20,2 %	366	99,4
13.05.2021	134328	35493	25746	8381	34127	24,6 %	365	93,5

Nibe Uplink lagrer historikk opptil to år, tabellen over er derfor inndelt i ulike intervall.

Perioden fra oppstart i november og frem til den 13. mai 2019 var på 906 dager og gjennomsnittlig energiforbruk pr. dag i denne perioden var på 109,6 kWh pr. døgn.

I perioden fra 2019 til 2020 ser man fra tabell 6-4 at energiforbruket har blitt redusert med ca. 10 %. Dette skyldes at en har gått bort fra utekompensering og muligens har senket varmbærer temperatur med 1 °C. Observerer av tabell at også i perioden fra 2020 til 2021 så har energiforbruket blitt ytterligere redusert i boligen.

7 Økonomisk betraktning

Et bergvarmeanlegg er en relativt stor investering. For å kunne investere i et slikt anlegg så må en både ha tilgjengelige midler og være villig til å bruke dem. Et varmepumpeanlegg krever et relativt langsiktig tidsperspektiv, da man over tid vil merke den økonomiske besparelsen et slikt anlegg fører med seg. I et forsøk på å tallfeste hvilken avkastning investeringen i Fjellstølveien over tid vil gi ble det besluttet å inkludere dette kapittelet i oppgaven. Først vurdering av innkjøp, boring og installasjon.

7.1 Investeringskostnader Fjellstølveien

Oppsettet under er hentet fra innkjøp utført under byggeperioden i 2016:

Investering

boring	kr 70 000
Varmepumpe	kr 70 000
Rørøpplegg, Selensio plater	kr 100 000,-
Sum eks mva.	kr 240 000,-
<u>mva.</u>	<u>kr 60 000,-</u>
Sum ca.	kr 300 000

Fradrag

All alternativ oppvarming

Varmekabler (bunkers, teknisk, gang, to bad)	kr 25 000,-
Varmekabler – Leilighet 70 m ² 5 kretser – Kr 5 000,-	kr 25 000,-
Varmtvannstank	kr 10 000,-
<u>Varmeovner termostater etc.</u>	<u>kr 20 000,-</u>
Sum Alternativ investering tillegg for oppvarming	kr 80 000,-

Reell merkostnad for vannbåren varme

Investering ca.	kr 300 000
Enova støtte til pumpe	Kr - 40 000
<u>Alternativ invistering oppvarming</u>	<u>kr – 80 000</u>
Virkelig kost	kr 180 000,-

Som det fremgår av oppsettet over ble kostnaden omtrent kr 300 000,-. I betraktningen må det tas med at det ble fremforhandlet gunstige innkjøp, en stor grad av egeninnsats og i tillegg var en heldig med tidspunktet for når det ble søkt om og innvilget Enova-støtte.

I oppgaven til Mol og Willumsen er det oppgitt en tabell som indikerer kostnader forbundet med investering i bergvarme, i denne tabellen kom de frem til at en pumpe med en størrelse på 12 kW ville ende med en totalpris på 217 150 kr [22]. Dette stemmer godt overens med prisen på installasjon av anlegget i Fjellstølveien.

Beregnet besparelse pr. år med en COP på 4,27 – Mai 2021 avgitt effekt ca. 34 200 kWh/år, se tabell 6-4. Tilsvarende en besparelse på ca. 26 200 kWh pr år.

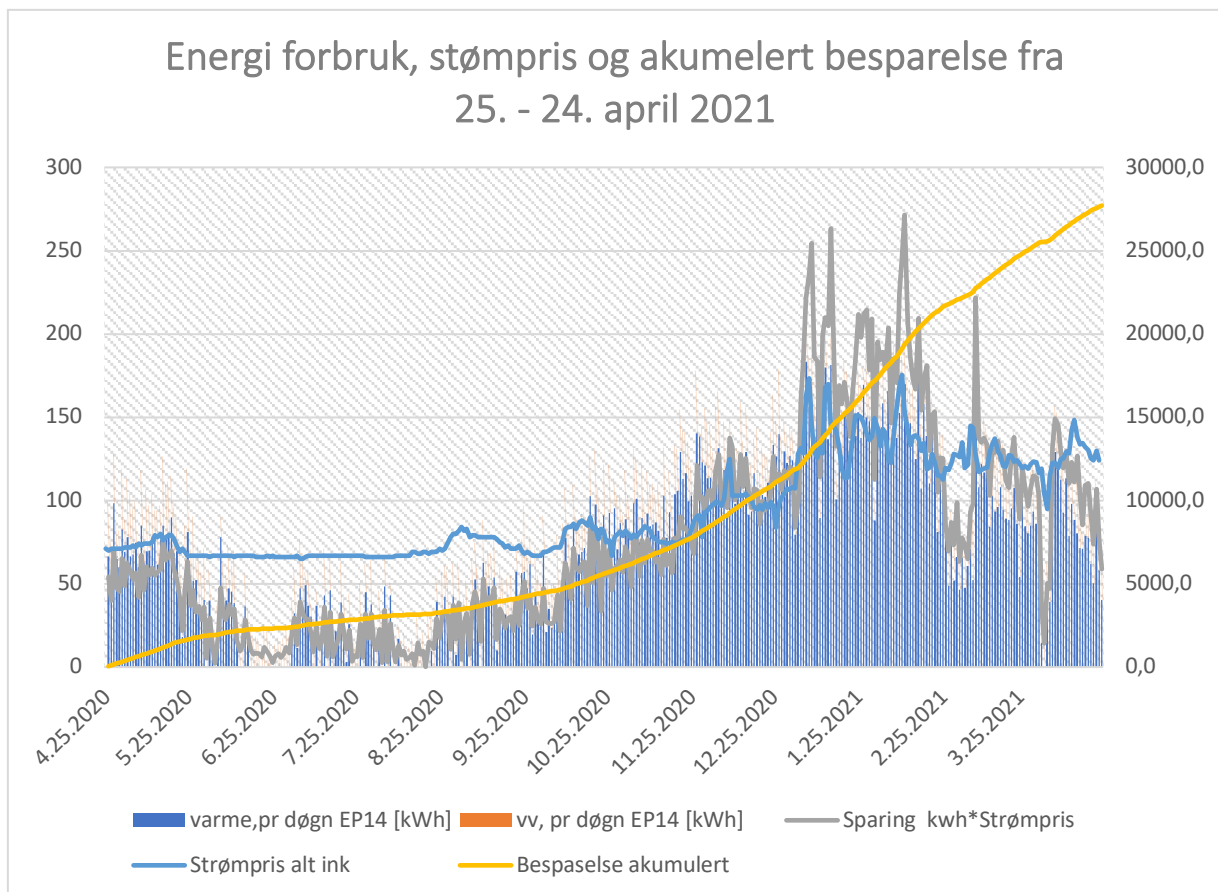
7.2 Operasjonskost

Alle maskiner og utstyr som roterer slites og må over tid vedlikeholdes. Varmepumpen i caset har gått kontinuerlig siden november 2016. Det eneste som har blitt utført av vedlikehold er rensing av «magnetittfilter» og tilsetning av bakteriedreper. Dette ble utført av huseier og kostnadene til kjemikalier utgjorde under kr 300,-

I forbindelse med utviding med jordkollektor ble det etterfylt en del HX35.

7.3 Virkelig forbruk og besparelse i løpet av et år

Vet at strømprisen som regel er høyest når utetemperaturen er på sitt laveste, dette er også da energibehovet til boligen er på sitt største. For å grafisk illustrere hva dette i praksis betyr for «lommeboken» er det i figuren under illustrert sammenheng mellom forbruk, strømpris og den akkumulerte økonomiske besparelsen.



Figur 7-1 Grafisk fremstilling akkumulert besparelse, strøm- pris og forbruk

Grafen over er basert på data hentet fra Nibe Uplink, i tillegg til at besparelse pr. dag har blitt illustrert med den grå grafen er det beregnet ut fra avgitt energi, multiplisert med periodens forventede «COP-1» og reell strømpris hentet fra strømleverandørens faktura (CSV dump). I tillegg har besparelsen pr. dag blitt akkumulert over et år, visualisert med den gule grafen. I dette konkrete oppsettet ble akkumulert besparelse siste år kr 27 700,-

Noe av det mest oppsiktsvekkende ved denne grafiske fremstillingen er at daglig besparelse omtrent ved nyttår øker betraktelig. Dette skyldes at nevnte parameter øker samtidig og vi får en slags «kvadratisk effekt». For å illustrere nevnes det at akkumulert besparelse fra årets to første måneder (Fra 1. januar til tom. 28. februar) utgjorde litt over kr 10 000,- eller omtrent 37 % av hele besparelsen siste år.

Nevnte graf er også hovedargumentet for å gå for en væske/vann-varmepumpe, som er dimensjonert med 100 % da den holder jevnt over en høy COP, gitt at kuldebærer holdes på et akseptabelt nivå.

7.4 Nåverdibetraktning og besparelse over tid

Oppsettet under illustrerer nåverdibetraktning med en engangsutbetaling pålydende kr 180 000,-. Gitt en strømpris inkl. tillegg kr 1,20 pr. kWh, som er snittet fra første kvartal i mai 2021 [23]. Antatt en lånerente og diskonteringsrente er satt til 2 % og en forventet inflasjon tilsvarende 2,5 %, vil nåverdien på bergvarmepumpa i Fjellstølveien være omtrent kr 369 500,- (Sagt på en annen måte, netto besparelse etter at investeringen er nedbetalt.)

Tabell 7-1 Nåverdibetraktning 20-årsperspektiv

	1,2055	1,2111	1,2169	1,2229	1,2291	1,2355	1,2420	1,2487	1,2557	1,2629	1,2703	1,2779	1,2857	1,2938	1,3022	1,3108	1,3197	1,3289	1,3384
	1,025	1,05063	1,07689	1,10381	1,13141	1,15969	1,18869	1,2184	1,24886	1,28008	1,31209	1,34489	1,37851	1,41297	1,4483	1,48451	1,52162	1,55966	1,59865
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
des. 21	des. 22	des. 23	des. 24	des. 25	des. 26	des. 27	des. 28	des. 29	des. 30	des. 31	des. 32	des. 33	des. 34	des. 35	des. 36	des. 37	des. 38	des. 39	des. 40
-180 000																			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31 429	31 572	31 720	31 872	32 029	32 191	32 357	32 529	32 705	32 888	33 075	33 269	33 468	33 674	33 887	34 105	34 331	34 564	34 805	35 053
	-116 999	-85 279	-53 406	-21 377	10 814	43 171	75 700	108 405	141 293	174 368	207 637	241 106	274 780	308 667	342 772	377 103	411 668	446 473	481 526
-148 571	31 572	31 720	31 872	32 029	32 191	32 357	32 529	32 705	32 888	33 075	33 269	33 468	33 674	33 887	34 105	34 331	34 564	34 805	35 053

Om en skal gi en pekepinn på hva COP vil bety for investeringen så vil en gjennomsnittlig COP på 2,44 tilsvare en nåverdi på 243 500,- over tilsvarende tidsperiode.

Har i beregningene antatt at hele investeringen skal avskrives på 20 år.

Varmepumpen har en antatt levetid på 20 år og må byttes etter denne perioden. Brønnen kan en argumentere for at har en lengre levetid og derfor har en stigende verdi for eiendommen og vil bidra til en enda bedre lønnsomhet. Ref. Nåverdiberegning.

Med gitte forutsetninger er investeringen nedbetalt på mindre enn 6 år.

8 Diskusjon

Velger innlede med "Stå på skuldrene" til kjemper» som er slagordet til Google scholar. Skuldrene å stå på er i dette tilfellet Enova SF sin rapport "Analyse av feltmålinger av varmepumper i boliger" [24].

Diskusjonskapittelet følger innledningsvis Enova sin rapport kronologisk der egne funn drøftes opp mot rapportens påstander. Mot slutten av kapittelet oppsummeres egne tanker og funn.

8.1 Sammenligning med Enova rapport

Omtalte rapport betraktes som en "kvantitativ" undersøkelse av 15 eneboliger i Oslo /Bærum området, sett oppimot den "kvalitative forskning" foretatt på en væske/vann-varmepumpe i Stavanger. Alle figurer i dette kapittelet er hentet fra Enova rapporten, har så lagt egne resultater oppå disse for å grafisk sammenligne anleggene.

Enova sin rapport konkluderte med at væske/vann-varmepumpeanleggene har en gjennomsnittlig årsvarmefaktor på 2,44 med en variasjon fra 1,51 til 3,97. [24, s.52]

Sammendraget til rapporten innledes med "*Enova ønsket å vite hva som kjennetegner gode og dårlige varmepumpeanlegg i praktisk bruk*" [24, s.2].

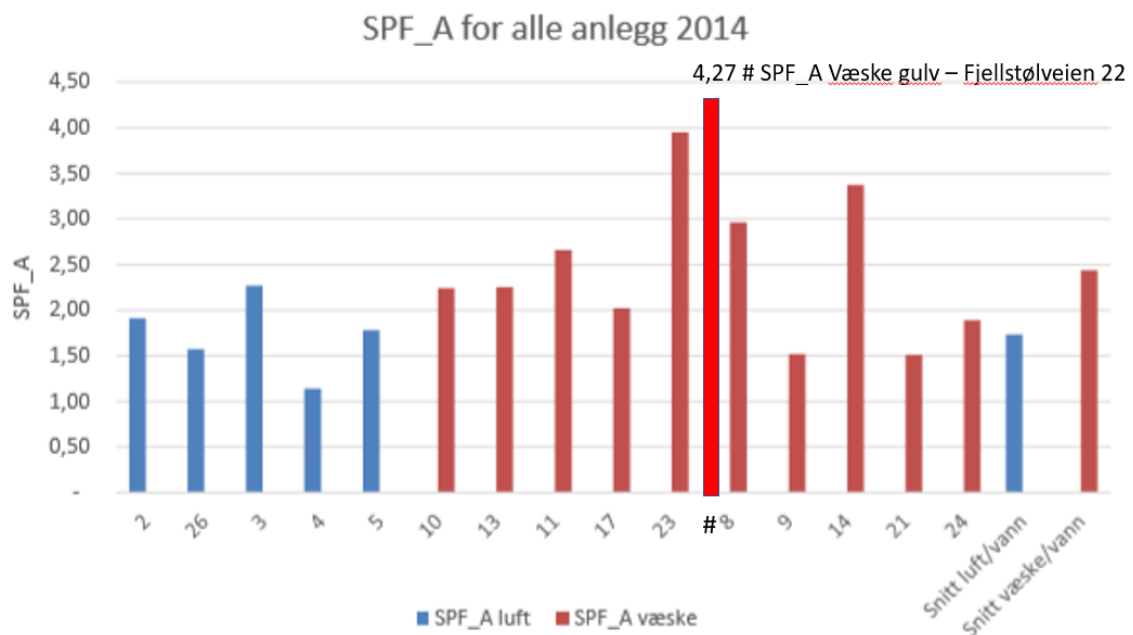
Nibe F1255 nevnes i rapporten som den varmepumpen med høyest COP. Det henvises også til en rapport fra Svenske energimyndigheter der nevnte pumpe var testvinner.

Data fra væske/vann-varmepumpen i Fjellstølveien er loggført fra januar 2018 og frem til april 2021. Anlegget har i løpet av nevnt perioden levert 168 489 kWh, derav 13 3391 kWh til oppvarming og 35 098 kWh til varmtvann. Dette gir en andel varmtvann på 20,8 % og en total SPF på 4,27. Drøfter disse tallene opp mot resultatene i Enova rapporten.

8.1.1 SPF faktor over året

Fra forsøk har det blitt observert at COP er avhengig av flere faktorer. I perioder hvor varmepumpen skal levere mye energi har selve energiforbruket til KB-pumpen relativt sett liten betydning. Derimot har inngående temperatur til kuldebærer-varmeveksler vist å ha en større påvirkning. Som beskrevet over så bør man i perioder der omgivelsestemperatur er under grunntemperatur (ca.8,1 grader) etterstrebtes å holde en deltatemperatur på rundt 6 – 7 grader. I perioder med et lavt energibehov vil derimot energiforbruket til KB-pumpen ha et relativt stort utslag på effektfaktoren.

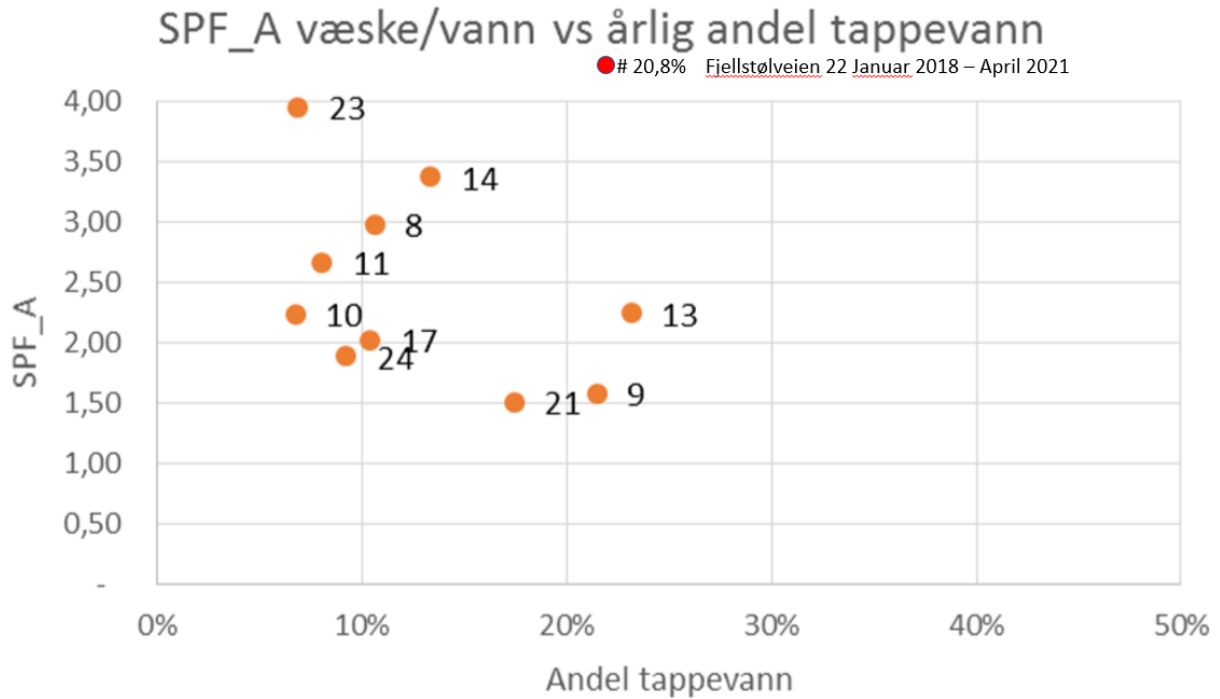
I rapporten til Norsk energi er det anlegg nr. 23 som kom best ut, med en SPF på 3,95. Ved nærmere undersøkelse i vedlegg «sjekklister befaring» ble det observert at dette anlegget også hadde en væske/vann-varmepumpe levert av Nibe. Når resultat fra dette forsøket sammenlignes med rapporten så kommer anlegget i Fjellstølveien klart bedre ut.



Figur 8-1 Sammenligning Fjellstølveien vs. Enova rapport SPF_A_luft og SPF_A_væske

8.1.2 Årlig andel tappevann

Resultat fra egne beregninger har vist at andel tappevann har stor betydning for oppnådd SPF. Figuren under viser at Fjellstølveien 22 har den høyeste SPF-en på tross av en relativt høy andel varmtvann 20,8%. I dette tilfellet er det anlegg nr. 9 og 13 som er mest sammenlignbare.

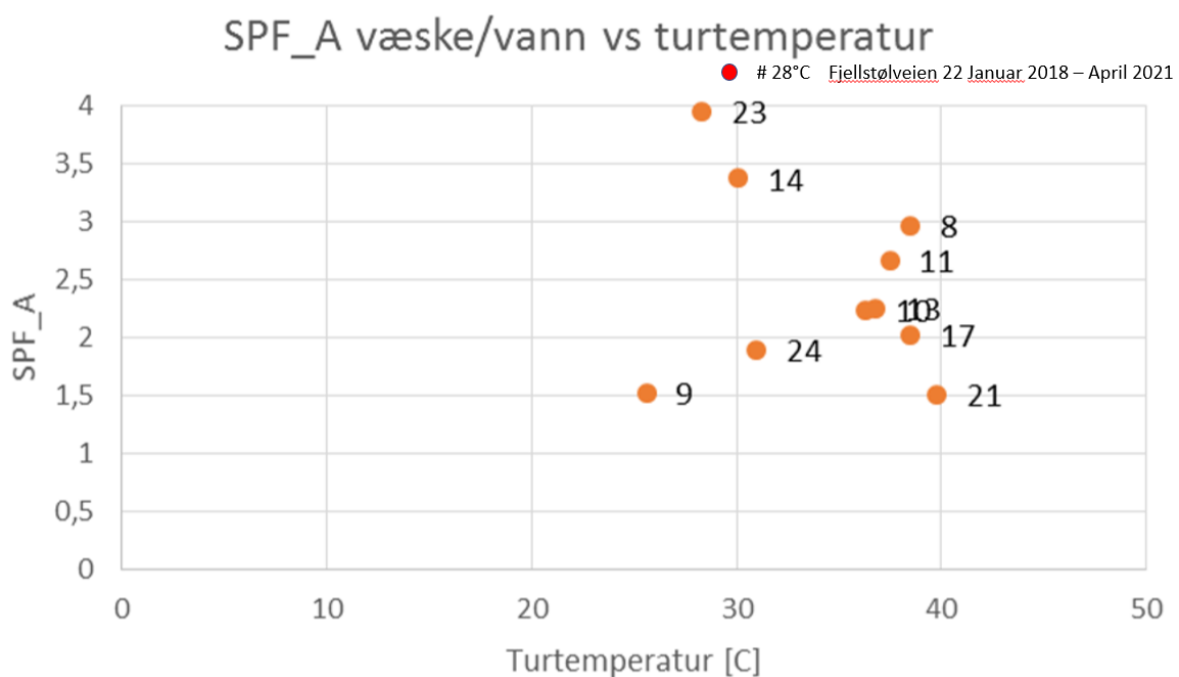


Figur 8-2 Sammenligning Fjellstølveien vs Enova rapport, årlig andel tappevann

8.1.3 Væske/vann vs. varmebærer turtemperatur

En lavere turtemperatur vil gi en høyere COP, samtidig må turtemperaturen på varmebærer være høy nok til å oppnå ønsket innetemperatur. Faktorer som påvirker varmeavgivelse:

- Varmeavgivelse (gulvvarme eller radiator)
- Lengde på rør
- Varmeledningsevne til gulvmaterialet
- Ventilasjon og hastighet på luftutskiftning
- Isolasjonsgrad i bolig

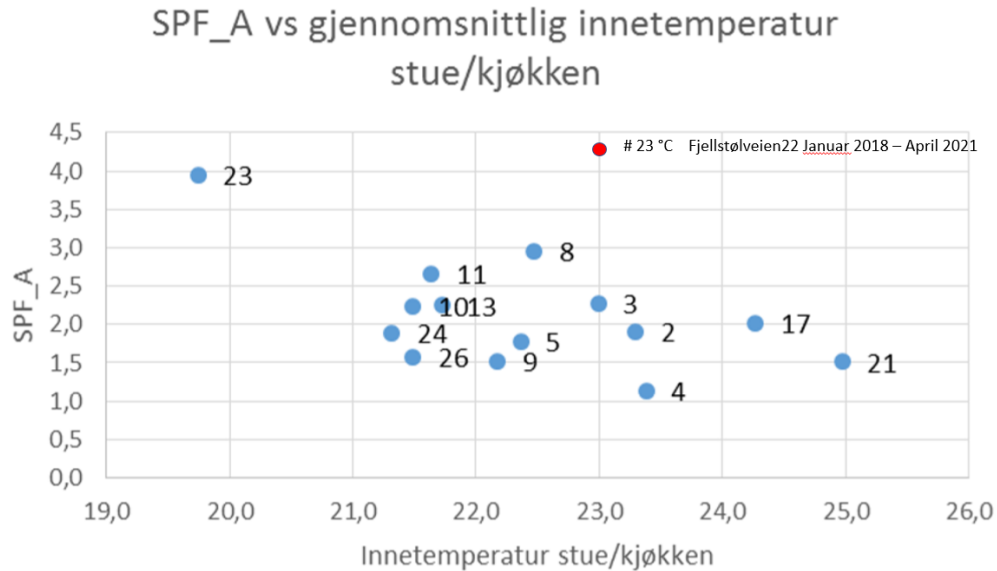


Figur 8-3 Sammenligning Fjellstølveien vs Enova rapport, turtemperatur

Varmebærer i Fjellstølveien holdes ved 28 – 29 grader på vinterhalvåret. Sammenlignet med anleggene i testen så er dette i det nedre sjiktet. Her er det grunnlag for å hevde at et mildt vestkystklima, god isolasjonsevne og fraværende termostatventiler er grunner til at varmebæreren kan holdes noe lavere enn de andre anleggene.

8.1.4 Gjennomsnittlig innetemperatur

Innetemperaturen i Fjellstølveien ligger rundt 23 grader, med unntak av soverom der manuelle ventiler er strupete. Ved å sammenligne Fjellstølveien med anleggene i rapporten ser en at temperaturen ligger noe høyere.

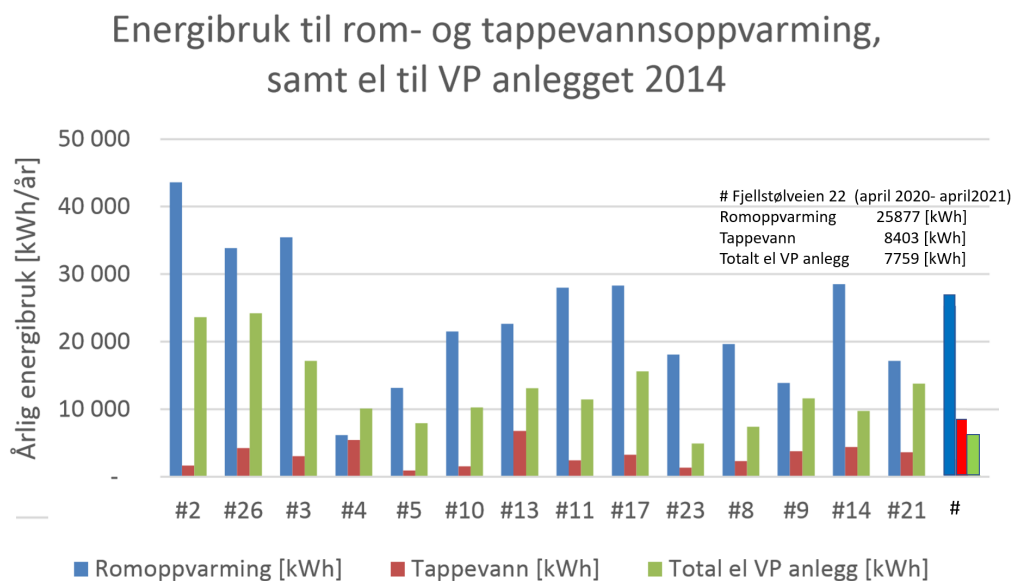


Figur 8-4 Sammenligning Fjellstølveien og Enova rapport innetemperatur

En digresjon: Det fremgår av rapporten at bolig #23 er anlegget som kom best ut og har den laveste innetemperaturen. Boligen har også installert radiatorer som oppvarmingskilde. Radiator vil under normale forhold, grunnet relativt mindre overflate i forhold til gulv, kreve en høyere turtemperatur. I rapporten fremgår det at anlegg 23 er blitt utbedret i testperioden ved å installere en akkumulatortank, noe som kan tolkes som et tiltak for å oppnå høyest mulig SPF.

8.1.5 Energibruk

Rapporten oppgir en variasjon i årlig energibehov per bolig mellom 6 150 kWh/år og 43 600 kWh/år. Fjellstølveien har med årene hatt et fallende energiforbruk, se tabell 4-6. De første årene, frem til april 2019 var gjennomsnittlig energiforbruk tilsvarende 40 000 kWh / år. I tidsintervallet april 2019-april 202 ble energiforbruket redusert til 36 300 kWh pr år og i løpet av det siste året har det blitt ytterligere redusert til ca. 34 200 kWh. Boligen i Fjellstølveien, sammenlignet med de andre anleggene, legger seg på tross av å være en større bolig omtrent på snittet.

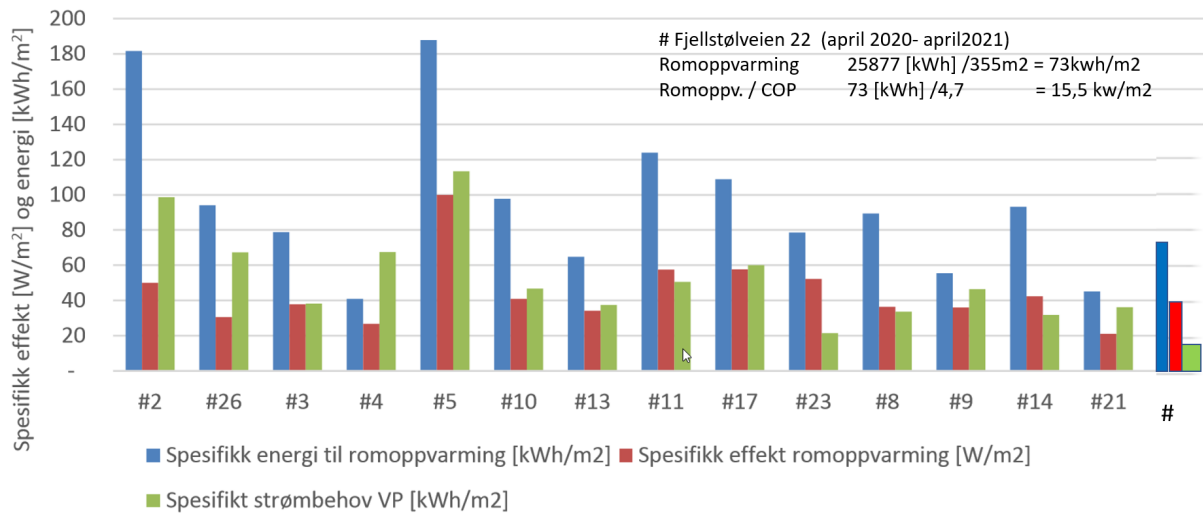


Figur 8-5 Energiforbruk til rom og tappevann

Forbruk av tappevann i Fjellstølveien har fra oppstart holdt seg stabilt på ca. 22 kWh pr. døgn. Andelen tappevann i boligen har relativt sett vært økende grunnet er lavere energiforbruk til oppvarming. Som figur 8-5 viser så er andelen tappevann høyere enn de andre anleggene. Dette kan skyldes to grunner, den ene er at det er to boenheter i boligen, som medfølger et høyt forbruk av varmtvann til både dusj og badekar. Den andre grunnen er at det ikke er installert en ekstern varmtvannstank, og erfaring tilsier at varmepumpen leverer tilstrekkelig med varmtvann.

Det er også interessant å sammenligne beregninger mottatt fra varmepumpeleverandør som tilbake i 2016 anslo energi behovet til 32 961 kWh/år, der av 7 665 kWh/år til varmtvann. se vedlegg 11.4. Dette er noe lavere enn det som fremgår av beregningen over. Forklaringen er muligens at oppvarming av «bunkers» og garasje, et areal tilsvarende 100 m² ikke ble kommunisert til de som utførte beregningene og derfor ikke tatt med i beregningene

Spesifikk effekt- og energibruk til romoppvarming 2014

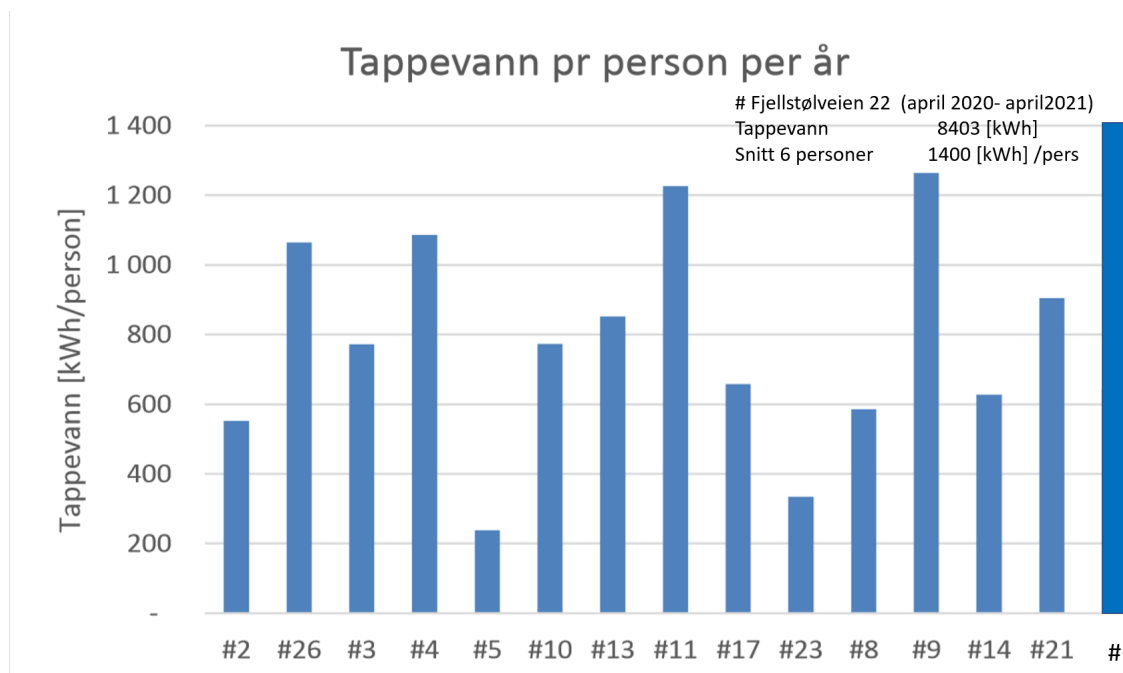


Figur 8-6 Spesifikk effekt og energiforbruk

Det røde søylen er tolket som spesifikk installert effekt i gulv. I Fjellstølveien er det installert varmfordelingsrør i ca. 300 m². Dersom varmepumpen bruker all effekt på oppvarming så tilsvarer dette omtrent $12 \text{ kW}/300 \text{ m}^2 = 40 \text{ W/m}^2$

Det som ikke stemmer like godt er vedlagte energirapport fra Enova utført av deres lokale representant. Her ansås husets årlige energibehov til 126,4 kWh/m² pr. år.

Om energibehov til både oppvarming og forbruksvann summeres er årlig energiforbruk oppe i rundt 97 kWh/m² pr. år. Det kan tenkes at deler av forklaringen er at det kun var hovedetasjen som ble tatt med i beregningen og at når også utleiedelen inngår i beregningen vil hele boligen fremstå som mer energi gjerrig. Se vedlegg 11.1



Figur 8-7 Forbruk tappevann pr beboer

8.1.6 Videre analyser av varmepumpeanlegg

Enova rapporten presiserer at de ikke har sett på innregulering og skriver at innregulering og styring kan være interessant i forhold til oppnådd årsvarmefaktor.

Som nevnt innledningsvis så består varmepumpen av tre hoveddeler. Når det er snakk om innregulering, så har case Fjellstølveien illustrert at det er mye å hente.

Dette er faktorer som har blitt nøye studert i Fjellstølveien og konklusjonen er at best virkningsgrad COP oppnås uten automatisk regulering. Teorien er enkel, jo større flate som benyttes til å avgi varme, dess lavere kan turtemperatur senkes.

8.2 Gode og dårlige varmepumpeanlegg

Rapportens kapittel 8 innleder med å rette søkelys mot kritiske faktorer for om anlegget skal få en høy eller lav årsvarmefaktor, velger derfor å kommentere hvert enkelt punkt. Kritiske faktorer for dimensjonering av brønn som vil påvirke COP.

8.2.1 Valg av varmepumpesystem

Hele rapporten til Enova taler for at en væske/vann-varmepumpe er foretrukket løsning. På tross av det kan rapporten likevel ikke konkludere med hvilken type som gir best økonomi i løpet av pumpens levetid. Om en skal sammenligne investeringskostnad er en væske/vann- og luft/vann-varmepumpe fra samme leverandør med tilsvarende ytelse omtrent identisk i pris.

Forskjellen i total kostnad kommer av brønnboring som også må legges til ved investering i en væske/vann-varmepumpe.

Basert på erfaringstall fra Fjellstølveien er investeringskostnader forbundet med varmepumpeanlegg fordelt ca. 1/3 brønnboring, 1/3 Varmepumpe og 1/3 distribusjon varmebærerrets. Når hele investeringen representerer kr 300 000,- blir kostnaden omtrent kr 100 000,- pr del. Om en så legger til grunn Enova rapportens ytelser for den beste luft/vann-varmepumpen med SPF lik 2,27 og beregner nåverdi over 20 år tilsvarer den omtrent kr 200 000,- eller 100 % avkastning på investert beløp. Tilsvarende for en væske vann SPF lik 3,95 som over 20 år vil gi en avkastning tilsvarende litt mer enn 100 % av investert beløp. Et noenlunde siste års strømforbruk i Fjellstølveien og en strømpris kr 1,2 kr/kWh lagt til grunn. Med dette som bakgrunn vil brønnen bli nedbetalt mer enn en gang i sin levetid. Når en også legger til lave vedlikeholdskostnader og betydelig lenger forventet levetid på en væske/vann-varmepumpe er det liten tvil om hva som er det økonomisk smarte valget.

8.2.2 Varmepumpemodell

Ved valg av varmepumpemodell bør en følge anbefalinger fra offentlige og/eller uavhengige instanser.

8.2.3 Størrelse på varmepumpe

I rapporten til Enova konkluderer de med at en bør ha effektdekningsgrad på 40-60 % for bergvarmepumper og 60-120 % for luftvarmepumper. Resultat oppnådd i denne oppgaven motstrider funn fra Enova, i dette eksempelet er det mest gunstige å ha en bergvarmepumpe med 100 % effektdekningsgrad.

- a. For optimal drift av anlegget er inverterstyring en viktig faktor.
- b. Relativt liten prisforskjell mellom pumpestørrelsene. Ut fra resultat bør denne dimensjoneres med 100 % dekning.
- c. Krever en viss størrelse på bolig.

8.2.4 Systemoppbygning og styring

Som illustrert i denne oppgaven er det viktig å kontrollere at ytelsen til VP er i henhold til forventninger. Nevner foran koblet strømmåler, endring av deltatemperatur over kuldebærer og mulighet til å senke temperatur på tappevann.

Rapporten sier at de ikke har sett noe på innregulering av anleggene eller styring av pådragsorgan, dette kan være av interesse i forhold til årsvarmefaktor. Som nevnt i beskrivelse av anlegget så er det ingen automatisk regulering av temperatur i rom. Det derfor utført forsøk på nevnt problemstilling under testperioden.

Manuelle ventiler ble satt i ca. 40 % åpning i kjeller/bunkers. Observasjon over tid viste at dersom forbruk av varmtvann økte, ble det prioritert mer tid til produksjon av varmtvann, noe som førte til temperaturfall i ekstern turlledning. Pumpen måtte da jobbe hardere for å oppnå ønsket romtemperatur, som så resulterte i temperaturfall i kuldebærerets. Dette støtter Nibe sin instruksjonsbok side 23 Sparetips[1], der konklusjonen er at ventilene skal ha full åpning.

Har erfart at KB-inn i kalde perioder driftes mest optimalt med en KB-pumpe som har en deltatemperatur på 7 °C. Ved å drifte på denne måten fungerer jordsløyfen som en forvarmer og demper før kuldebærer går inn i brønnen. Forutsetning for at jordsløyfen skal kunne hente energi fra omgivelsene er at temperatur på KB-ut er lavere enn den i omgivelsene.

Styring av varmepumpens kompressor skal ha mest mulig kontinuerlig drift, men kuldebærerens hastighets har også stor innvirkning på COP. For å justere på dette så kreves innsikt og forståelse av hvert enkelt anlegg. I dette tilfellet med kombinert jordsløyfe og brønn kan varme perioder bidra til at overskudd varme går til oppvarming av brønn, mens i kaldere perioder kan krets driftes med en høyere delta temperatur (lavere hastighet).

8.2.5 Varmebærer

Som nevnt tidligere så vil endring av innetemperaturen med en grad tilsvare en endring i effektforbruket med 5 %. Unngå termostater, ha tilstrekkelig med sløyfer i gulv og sørg for best mulig gjennomstrømning.

Under beskrivelse av gode varmepumpeanlegg har Enova rapporten konkludert med følgende utsagn. "Varmepumper med frekvensomformer oppnår gode årsvarmefaktorer uten akkumulator tank" [24, s.51]. Samtidig skriver de også i rapporten at varmepumpene uten frekvensomformer har akkumulatortank.

Anlegget i Fjellstølveien har, som beskrevet i kap. 4, en akkumulatortank. I tillegg er varmerør i hele førsteetasje og to bad i de øvrige etasjer støpt inn, noe som også vil gi en «akkumulator effekt» og er med på å holde romtemperaturen stabil under produksjon av varmtvann. Dette gir en stabil og skånsom drift av anlegget.

8.2.6 Kuldebærer

Har beregnet i oppgaven at en grad endring i temperatur tilsvarer omtrent 2,3 % endring i effektforbruk. En høyere temperatur på KB vil gi redusert effektforbruk og dermed en høyere COP. Dette kan oppnås ved å tilpasse kuldebærerkollekor.

To brønner i parallell bidrar til et mindre mottrykk og legger dermed til rette for å kunne utvide anlegget med jordsløyfe.

PS!

For lang singel brønn vil både bidra til unødig mottrykk og høy belastning på KB-pumpe og «varmevekslereffekt» mellom parallelle kollekte rør, som vil føre til en lavere KB-inn temperatur og redusert COP.

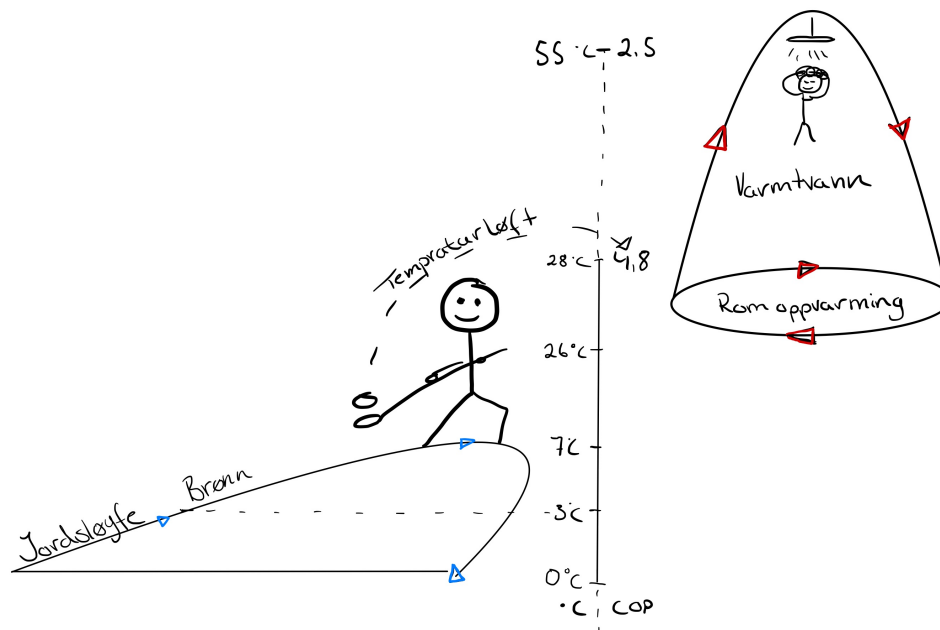
For kort brønn vil kunne medføre en lav KB-temperatur og i verste tilfelle føre til permafrost i brønn.

Kuldebærerpumpe

- Bør være inverter styrt og bli tunet.
- Foran koblet energimåler

8.3 Oppsummering av sammenligning – Konklusjon

Sammenlignet med Enova sin bestillingsrapport over 15 eneboliger i Oslo/Bærum, så presterer varmepumpeanlegget i Fjellstølveien bedre enn resultatene som kommer frem i denne rapporten. Fjellstølveien har høyere andel varmtvann og en høyere innetemperatur, faktorer som skulle tale imot. Figuren under illustrerer prinsippet for temperaturløft i varmepumpeanlegget, og hvorfor dette er mulig.



Figur 8-8 illustrasjon over temperaturløft

Som figur 8-8 illustrerer så bidrar jordsløyfen med en forvarming av kuldebærer som så løftes videre av brønnen. Dette bidrar til at kompressor, illustrert med "Mr. Varmepumpe", krever mindre arbeid for å løfte temperatur til både dusjvann og romoppvarming.

Det som taler til fordel for Fjellstølveien er det milde klimaet på Jæren, som ved beskrevet oppsett utnytter dette. Som beskrevet i kap. 6 viser funn at 1 °C heving av kuldebærer inn tilsvarer ca. 2 % reduksjon av varmepumpens tilførte effekt.

Har på grunnlag av innhentet teori og utførte forsøk erfart at mange variabler må tas hensyn til for å kunne oppnå en COP på nivå med det som oppgis av fabrikantene. Det huseier kan gjøre er å sørge for tilstrekkelig distribusjon av energien som skal fordeles, og unngå å sette inn reguleringsventiler og lange varmesløyfer.

8.4 Feilkilder

Som det nevnes innledningsvis så er alle beregninger utført på grunnlag av data hentet fra Nibe Uplink. Energiberegning er basert på fysiske målinger av flow og temperatur. Siden dette er standardkomponenter som medfølger utstyret så er det liten grunn til å tro at dette er utstyr med høy presisjon. Det kan være grunnlag for å hevde at fabrikant har et insentiv for å oppgi høyere levert effekt enn det som er reelt.

For å vurdere usikkerheten til oppgitte data, ble det utført kalibrering av strømningshastighet og temperatur målinger på kuldebærerkræts.

Oppløsningen i f.eks. produksjon av varmtvann er oppgitt i hele kWh, slik at beregninger over korte tidsintervall kan bli unøyaktige.

Sirkulasjonspumpen, med en effekt i størrelsesorden 40 W/h, inngår ikke i målt energiforbruk. Denne er installert for å kunne fordele varmen på en effektiv måte i en relativt stor bolig.

Målefeil i loggeutstyret.

Under test av forskjellige KB-oppsett (24.01. - 27.01.) oppstod det en del elektromagnetisk støy som fikk grafene til å hoppe. Dette begynte ved påbegynt brønntest og stoppet i det brønnen ble satt tilbake til normal drift. Dette kan føre til unøyaktige målinger og avlesninger.

9 Konklusjon

Rapportens formål var å undersøke om betingelser for å kunne oppnå best mulig årsvarmefaktor ble lagt til grunn under prosjektering av varmepumpeanlegget i Fjellstølveien.

Anlegget leverer resultat som er tett opp mot leverandørens oppgitte SCOP. Årsaken til dette kan ikke påstås å være grundig prosjektering, da både termostatregulering for varmekretser og en singel brønn lå som anbefaling fra leverandør.

Det som derimot har bidratt til anleggets høye SPF er at rådet, om å bore to korte brønner, fra brønnbore Jensen ble tatt til etterretning.

Kuldebærerens løftehøyde har begrensninger. To brønner koblet i parallell gir mindre mottrykk, som både reduserer energiforbruk og muliggjør utvidelse av kuldebærersløyfe med jordkolektor.

Grunnet det milde klimaet på Sør-Vestlandet vil jordsløyfen i store deler av året bidra til å heve temperatur på KB-inn, som igjen gir økt COP. Under forsøk ble det observert at best COP ble oppnådd ved en deltatemperatur mellom seks til syv grader, avhengig av utetemperaturen.

Gjenvinning av avgitt varmeenergi, avgitt fra kuldebærer til varmepumpen, er et komplisert samspill mellom strømningshastighet og temperaturfall over varmepumpens fordampere. Overvåking og justering av skal-verdi som bestemmer pådraget til kuldebærerens løyfe, er derfor vesentlig for å kunne sanke mest mulig energi ut fra jordsløyfen.

Om en skal oppnå COP opp mot det fabrikanten lover vil det derfor kreve at huseier er over middels interessert. Det er også viktig at en velger å installere egen strømmåler for varmepumpen, slik at en har muligheten til å loggføre og utføre tiltak.

I forhold til lagring av energi i berggrunn, er det grunnlag for å hevde at energi i liten grad kan lagres i berget. Dette grunnet at naturlig varmetransport vil sørge for tilbakeføring til grunnens uforstyrrede temperatur. På tross av dette er det observert at det er mulig å heve temperaturen i berget med 1,5 – 2 grader i et kort tidsrom.

Når det kommer til avgivelse av varmeenergi til bygning og forbruksvann er prinsippene tilsvarende som beskrevet for kuldebærer. En må både under prosjektering og drift sørge for at varmemærerpumpen opererer under best mulig driftsbetingelser. Det vil si lavest mulig mottrykk, som oppnås ved flere korte varmesløyfer i parallell og ingen reguleringsventiler.

En bør tilrettelegge for en gunstig drift av kompressoren. Dette oppnås ved minst mulig temperaturløft dvs. en høy KB-inn og lav KB-ut. I tillegg vil justering av driftsparameter kunne bidra til kontinuerlig drift og færrest mulig driftsavbrudd. Noe som også tilrettelegger for å gi kompressor, kuldebærer- og varmemærerpumpe stabile driftsforhold. Dette fører til mindre slitasje og vil trolig øker levetiden til utstyret.

9.1 Videre forskning

På grunnlag av tester ble det utført en forenklet beregning av den termiske motstanden til berget, ble beregnet til å være 5,5 W/mK. På dette grunnlag bør det forskes på om det i perioder av året der KB-inn temperatur overstiger grunnens «uforstyrrede temperatur», ved å kjøre kun med en brønn, ville oppnå en enda høyere temperatur på KB-inn.

På grunnlag av funn, kunne det være av interesse å utvikle en simulator som viser varmetransport og samspill mellom berg og jordvarme. Slik at en da kan finne ideell kombinasjon av KB-sløyfe.

10 Referanser:

- [1] Nibe, *Bergvarmepumpe brukerhåndbok*, 2020. [Online]. Available: <https://www.nibe.eu/assets/documents/27878/231714-8.pdf>.
- [2] N. varmepumpeforening. "Bergvarme som energikilde." <https://www.varmepumpeinfo.no/energikilder-for-varmepumper/bergvarme> (accessed 06.01.2021).
- [3] R. I. Mytting Hagemoen, "Varmepumpemarkedet i Norge," 2018. [Online]. Available: <https://klimaostfold.no/wp-content/uploads/2018/01/Varmepumper-i-Norge-Klimasmart-Landbruk.pdf>.
- [4] A. H. Tjora, *Kvalitative forskningsmetoder i praksis*, 2. utg. ed. Oslo: Gyldendal akademisk, 2012.
- [5] W. L. Neuman, *Social Research Methods: Qualitative and Quantitative Approaches*. Harlow: Harlow: Pearson Education, Limited, 2013.
- [6] Y. A. Çengel, J. M. Cimbala, and R. H. Turner, *Fundamentals of thermal-fluid sciences*, Fifth ed. Si units. ed. (Thermal-fluid sciences). New York, N. Y: McGraw-Hill Education, 2017.
- [7] Norges Geologiske Undersøkelse. "Energibrønn." <https://www.ngu.no/grunnvanninorge/bore-en-bronn/energibrønn> (accessed 09.01.2021).
- [8] N. g. undersøkelse. "Grunnvarme." <https://www.ngu.no/emne/grunnvarme> (accessed).
- [9] A. M. Farstad, "Frostens utvikling mellom tunnel og bergmasse.: Felt-og laboratoriemålinger med WG Tunnelhvelv T100," Institutt for geologi og bergteknikk, 2012. [Online]. Available: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/236072>
- [10] R. Myra, "Energieffektivisering av pumpestasjoner i Oslo kommunes drikkevannsnett," Norwegian University of Life Science, Ås, 2016.
- [11] N. varmepumpeforening. "Nyttige begreper." <https://www.varmepumpeinfo.no/verdt-a-vite-om-varmepumper/nyttige-begreper> (accessed 22.02.2021).
- [12] K. G. Hoff and M. Helbæk, *Bedriftens økonomi*, 8. utg. ed. Oslo: Universitetsforl., 2016.
- [13] H. finasns. "Investeringsanalyse." Hageland Finans. <https://haglandfinans.no/tjenester/okonomiske-analyser/investeringsanalyse/> (accessed 20.04.2021, 2021).
- [14] T. Pedersen. "Clean heating- green electricity." <https://spabol.sparebank1.no/2017/clean-heating> (accessed 27.04.2021).
- [15] Basum. "En miljøvennlig etanolbasert kuldebærer for varmepumper." https://basum.no/wp-content/uploads/HX_brosjyreark-1.pdf (accessed).
- [16] Nibe, "Varvtalsstyrd bergvarmepump med inbyggd varmvattenberedare," 2016.
- [17] Norges Geologiske Undersøkelse. "Berggrunn." ngu. <http://geo.ngu.no/kart/berggrunn/> (accessed 21.04, 2021).
- [18] J. Grotzinger and T. H. Jordan, *Understanding earth*, 7th ed. ed. New York: W.H.Freeman & Co Ltd., 2014.

- [19] n. g. undersøkelse. "Varmeledningsevne målt på bergarter." <https://www.ngu.no/filearchive/91/Varmeledningstabell.pdf> (accessed 25.04.2021, 2021).
- [20] D. Saxon. "In praise of Lord Kelvin." physicsworld. <https://physicsworld.com/a/in-praise-of-lord-kelvin/> (accessed 02.03.2021).
- [21] Forbrukerrådet. "Norske årsmiddeltemperaturer: I rangert rekkefølge." https://fil.forbrukerradet.no/wp-content/uploads/2015/11/VP_2015_%C3%85rsmiddel_Rangert.pdf (accessed 17.03.21).
- [22] K. Mol and S. Wilhelmsen, "Sammenlikning av to kollektorer for bruk i bergvarmesystemer til oppvarmings- og nedkjølingsformål ved analyse av termisk responstest," Master, Norges miljø- og biovitenskaplige universitet, 2015.
- [23] NTB. "Dobbelt så høy strømpris i første kvartal." E24. <https://e24.no/naeringsliv/i/X8ryzE/dobbelt-saa-hoey-stroempris-i-foerste-kvartal?referer=https%3A%2F%2Fwww.vg.no> (accessed 14.05.2021).
- [24] L. L. Haugerud, Ingvild "Analyse av feltmålinger av varmepumper i bolig," 2015. [Online]. Available: https://www.enova.no/upload_images/A39CCBB0659E45289D1FFC54EBF71CFA.pdf

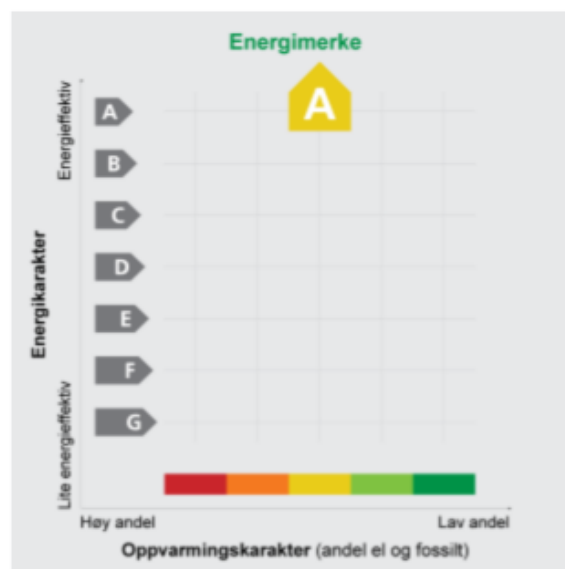
11 Vedlegg

11.1 Energiattest Fjellstølveien 22A



ENOVA

Adresse	Fjellstølveien 22 A
Postnr	4027
Sted	STAVANGER
Leilighetsnr.	
Gnr.	28
Bnr.	2334
Seksjonsnr.	
Festenr.	
Bygn. nr.	4375327
Bolignr.	
Merkenr.	A2017-778413
Dato	26.05.2017



Eier	Privat
Innmeldt av	Hans-Jacob Guldberg

Energiattesten er bekreftet og offisiell. Bygningens eierforhold er ikke bekreftet fra Matrikkelen

Energimerket angir boligens energistandard. Energimerket består av en energikarakter og en oppvarmingskarakter, se figuren. Energimerket symboliseres med et hus, hvor fargen viser oppvarmingskarakter, og bokstaven viser energikarakter.

Energikarakteren angir hvor energieffektiv boligen er, inkludert oppvarmingsanlegget. Energikarakteren er beregnet ut fra den typiske energibruken for boligtypen. Beregningene er gjort ut fra normal bruk ved et gjennomsnittlig klima. Det er boligens energimessige standard og ikke bruken som bestemmer energikarakteren. A betyr at boligen er energieffektiv, mens G betyr at

boligen er lite energieffektiv. En bolig bygget etter byggeforskriftene vedtatt i 2010 vil normalt få C.

Oppvarmingskarakteren forteller hvor stor andel av oppvarmingsbehovet (romoppvarming og varmtvann) som dekkes av elektrisitet, olje eller gass. Grønn farge betyr lav andel el, olje og gass, mens rød farge betyr høy andel el, olje og gass. Oppvarmingskarakteren skal stimulere til økt bruk av varmepumper, solenergi, biobrensel og fjernvarme.

Om bakgrunnen for beregningene, se www.energimerking.no

Målt energibruk

Brukeren har valgt å ikke oppgi målt energibruk.

Forklaring:

Beregningene under er basert på registreringene for din bolig (tilstand før tiltak, evt. også planlagte tiltak og gjennomførte tiltak). Beregningene viser hvordan boligen kommer ut sammenlignet med kriteriene for Enovastøtte. Forbedringer i måltallene fra boligens tilstand før tiltak, er et resultat av ambisjonsnivået på planlagte (og gjennomførte) tiltak. Alle tre kriterier må være oppfylte for at tiltakene skal være støtteberettigede. Beregnet årlig energibehov er en byggteknisk beregning som kan avvike noe fra boligens faktiske energibruk. Energimerket i høyre kolonne vises som en illustrasjon, og er ikke kriterium for støtte.

Energiberegning for Fjellstøveien 22 A, 4027 STAVANGER, G.nr 28, B.nr 2334, Bygn.nr 4375327

Energiberegning:	Varmetapstall, W/m ² - K	Netto energibehov, kWh/m ² - år	Oppvarming, andel fornybar	Energimerke
Tilstand før tiltak	1,51	252,13	20,00 %	
Tilstand etter planlagte tiltak	0,89	128,05	39,32 %	
Tilstand etter gjennomførte tiltak	0,88	126,41	39,32 %	

Kriterier for støtte:	Varmetapstall, W/m ² - K	Netto energibehov, kWh/m ² - år	Oppvarming, andel fornybar
Nivå 1	0,60	107,51	17,50 %
Nivå 2	0,81	132,51	17,50 %
Nivå 3	1,00	157,51	17,50 %

Forklaring:

Enkelte av kriteriene for støtte avhenger av boligens størrelse (areal - oppvarmet BRA). Kriteriene i denne tabellen er beregnet ut fra oppgitt areal for din bolig. I tillegg til disse kriteriene, krever Enova også at varmetapstallet reduseres med minst 30 % sammenlignet med boligens tilstand før tiltak.



Gjennomførte tiltak kvalifiserer til Enova-støtte, oppgradering av bolig nivå 3.

11.2 Kalibreringsbevis no. 21/30495 Temperatur

CERTIFICATE OF CALIBRATION



No. 21/30495

Page: 1 of 3
Ref. to records
21/30495

Date and place of calibration 01.03.2021 Tananger, temperature lab	Date of issue 04.03.2021
Calibration done by Geir Ingvaldsen	Authorized signatory Kai Heine Birkeland

Customer
IKM Laboratorium AS Utleie
Ljosheimveien 12
4051 SOLA
Norway

Calibration item

	Sensor	Reading device
Manufacturer	Fluke	Fluke
Model	5615	1524
Description	Pt-100 secondary standard	Reference thermometer
Serial no.	1003336	3500310
Tag/ID no.		
IKM ID	261671	261670
Location		
Range	-80 °C to 280 °C	

Accuracy $\pm 0.021^\circ\text{C}$ at 0°C , see manual
Additional info

Status after calibration

Refer to calibration results. Greatest measured deviation during calibration was $0,045^\circ\text{C}$.

The greatest uncertainty of measurement in the calibration is $U = \pm 50 \text{ mK}$ ($k=2$) $U = k \cdot u$

Project 139140
Customer PO 342937

Accredited for compliance with NS-EN ISO/IEC 17025 - Calibration. It states that the laboratory provide metrological traceability to the International System of Units (SI). The measurements results are traceable through calibrations provided by accredited laboratories or national metrological institutes under CIPM MRA. The results relate only to the item calibrated at the time and under the conditions that the calibration was performed. This report shall not be reproduced except in full.

ILAC-MRA (International Laboratory Accreditation Cooperation Mutual Recognition Arrangements) confirms mutual recognition of calibration certificates. Other signatories to ILAC-MRA are more than 60 countries world wide. Examples are National Association of Testing Authorities, Australia (NATA), Singapore Accreditation Council (SAC), United Kingdom Accreditation Service (UKAS), and many more. See full membership at www.ilac.org.

11.3 Kalibreringsbevis no. 20/20835 Flow

CERTIFICATE OF CALIBRATION

No.: 20/20835



Page: 1 of 3
Ref. to records:
20/20835

Date and place of calibration: 01.10.2020 Sola, flow/psv/pump lab	Date of issue: 01.10.2020
Calibration performed by: Tore Lindersen <i>Tore Lindersen</i>	Authorized signatory: Sindre Persson <i>Sindre Persson</i>

Customer:
IKM Laboratorium AS Utleie
Ljosheimveien 12
4051 SOLA
Norway

Contact:

Calibration item:

Manufacturer: Fuji Electric
Model: FLD22
Description: Flow Ultrasonic Flow Sensor
Serial no.: Q7B6497T
Tag/ID no.: 56019
IKM ID: 56019
Additional info -32 - 32 m/s

Conclusion of the results:

The results are within the instrument's specifications, taking the measurement uncertainty into account. (Pass)

Remarks:

Pipe data: 3" 316SS OD: 88,9mm, WT: 5,49mm
Sensor spacing: 65,5 mm
Calibration span:

Project:

Customer PO:

This certificate of calibration may not be reproduced other than in full.

Organization no. 952 245 503 MVA - IKM Laboratorium AS, Pb 124, 4098 Tananger - Phone: +47 51 71 95 00 - Email: IKMLab@IKM.no
Done by department Sola: Ljosheimveien 12, 4051 Sola - Phone +47 51 71 95 40/41 - email: Bjornar.Gitlesen@IKM.no
Departments in Stavanger, Bergen, Larvik, Raufoss og Oslo (Norway) and Perth (Australia)

11.4 Nibe tilbud/beregning F1255-12



INSTALLATØR

FORUTSETNINGER

Beregningen er basert på oppgitte opplysninger for å velge den riktige varmepumpen til anlegget. I tillegg er det gjort anslag om bygningen, byggeår, oppvarmet areal, energi- og effektbehov, temperaturer i anlegg, grunnforhold mm. Virkelige driftsforhold, ytelse samt besparing vil derfor kunne avvike fra beregninger. Besøk gjerne www.nibe.no for finne ut mer om NIBE's varmepumpeløsninger.

Vennlig Hilsen
ABK AS

KUNDE

ENERGIBEREGNING

BYGNINGSEVALUERING

Energibehov romoppvarming	32961 kWh/år
Varmtvann inngår med	7665 kWh/år
Energi fra ekstra forbruker	642 kWh/år
Varmebehov	13,2 kW

ETTER VARMEPUMPEINSTALLASJON

Energi å kjøpe	8390 kWh/år
----------------	-------------

BESPARING

Energi besparing	25213 kWh/år
CO ₂ Besparing	2242 kg/år

KLIMAFORHOLD

Årlig midlere utendørstemperatur	7,5 °C
Dimensjonerende utendørs temperatur (DUT)	-16,0 °C

BYGNINGSEVALUERING

Romtemperatur	22,0 °C
Romoppvarming skrus av	14,0 °C
Turtemperatur ved DUT	42 °C
Returtemperatur ved DUT	35 °C

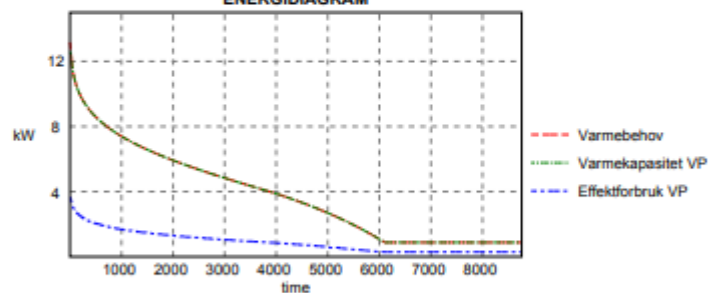
NIBE VARMEPUMPEMODELL

NIBE F1255-12	1 stk
---------------	-------

ENERGIPRESTASJON MED NIBE F1255-12

Energi levert VP	32950 kWh/år
Energi forbrukt VP	8051 kWh/år
Netto tilleggsenergi	0 kWh/år
Total tilleggsenergi	0 kWh/år
Energi for VB pumpe	339 kWh/år
Varmtvann ikke produsert av VP	0 kWh/år
Energidekningsgrad	100 %
Årsvarmefaktor, netto	4,1
Årsvarmefaktor, total	3,9
Fast eller flytende kondensering	Flytende
Varmekapasitet VP ved DUT	12,5 kW
Effektforbruk VP ved DUT	3,6 kW
Anbefalt tilleggseffekt	0,7 kW
Effektdekningsgrad	95 %

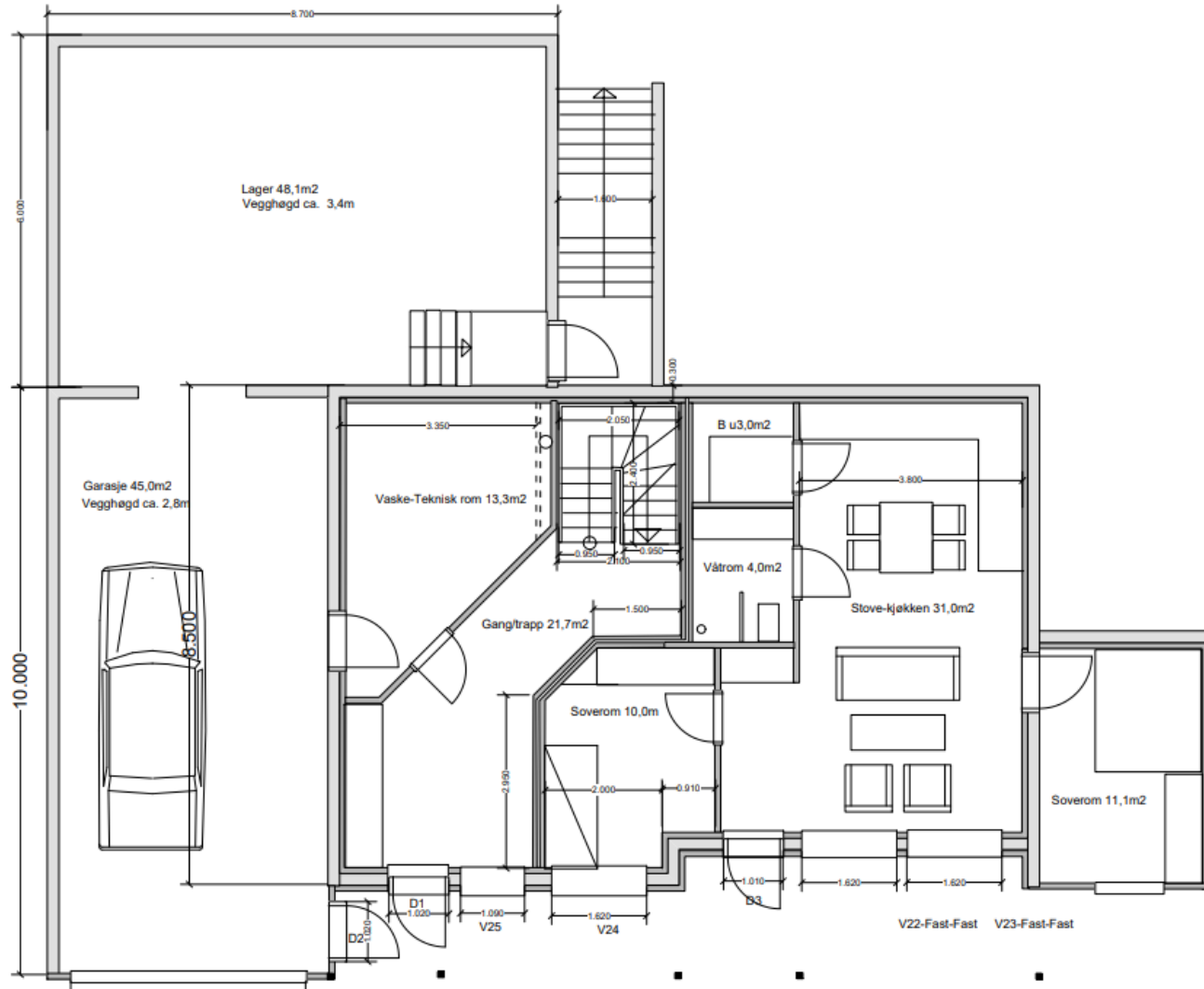
ENERGIDIAGRAM

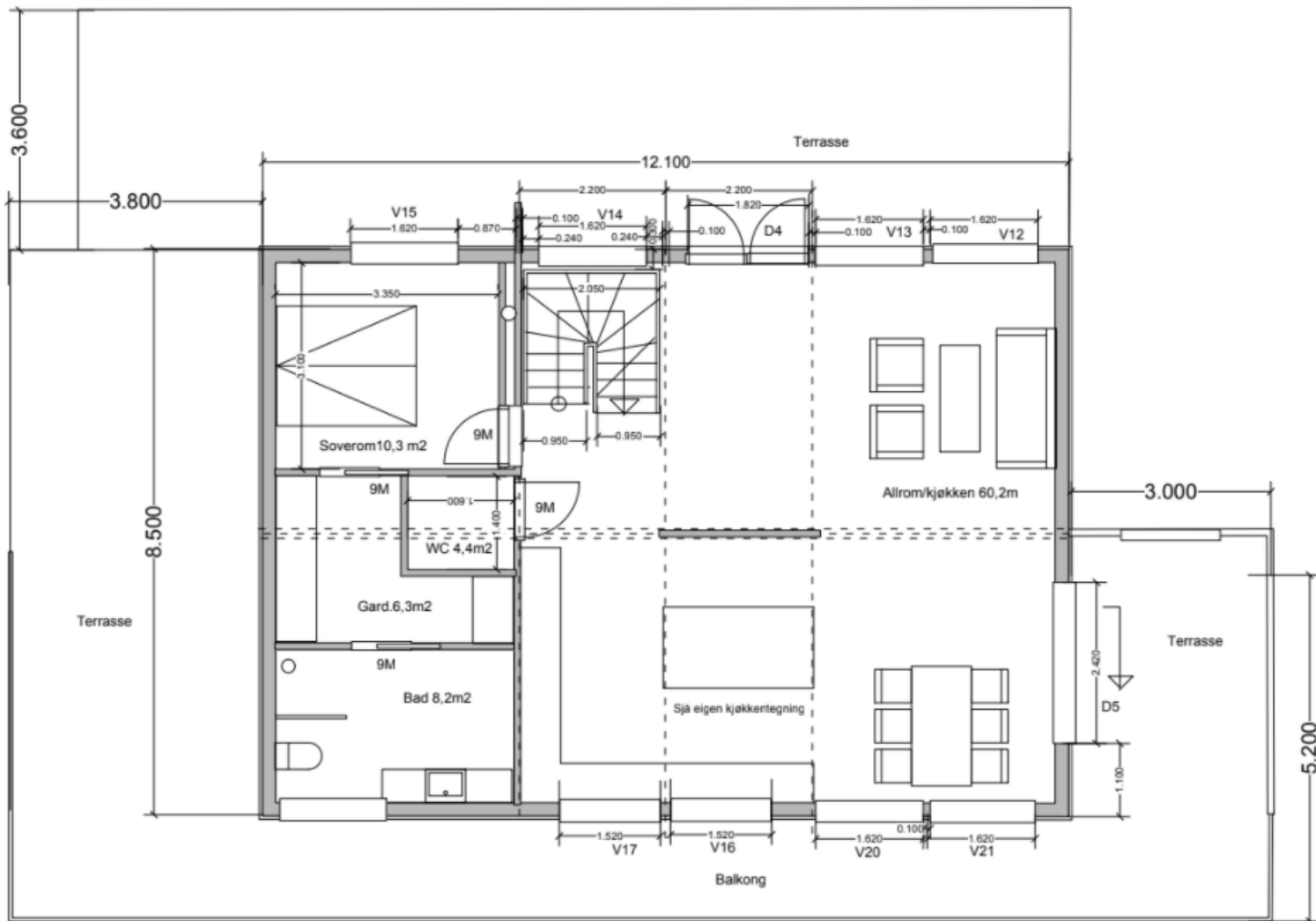


BERG KOLLEKTOR

Aktiv brønnbybde	163 m
Spesifikt energiuttak	155 kWh/m
Spesifikt effektuttak	33 W/m
Lambda berg	2,8 W/mK
Midlere innkommende brinetemperatur	0,0 °C

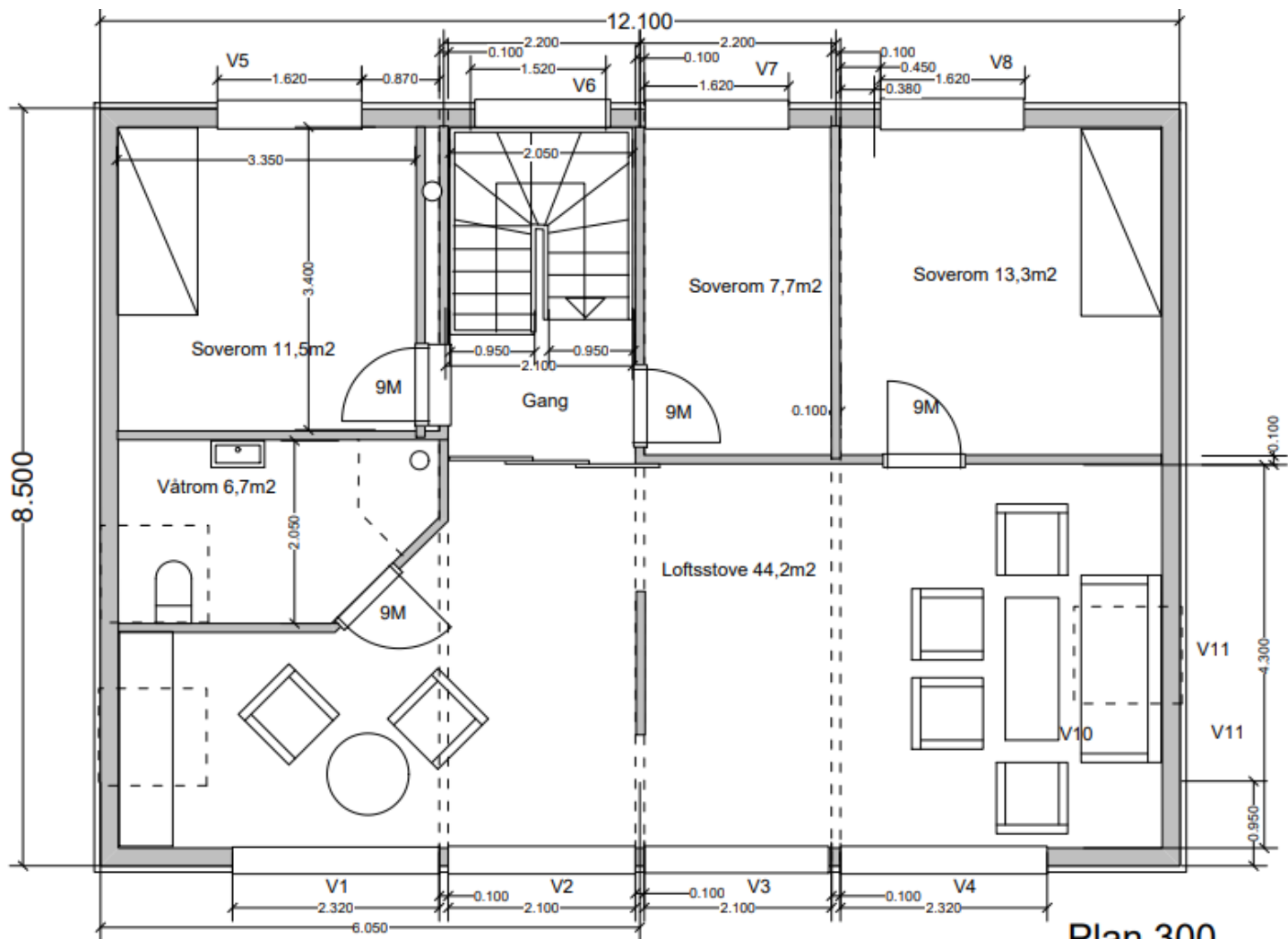
11.5 Plantegninger Fjellstølveien





Opprinneleg bruksareal: 95,1m²

Plan 200



Plan 300

Opprinnelig bruksareal: 27,5m²
 Nytt bruksareal: 70,0m²