



DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE
FAKULTET
BACHELOROPPGAVE

Studieprogram/studieretning:	Vår semesteret, 2023
Energi- og petroleumsteknologi	Åpen
Forfattere: Amalie Frafjord Andersen & Sara Marlen Kolstø	
Fagansvarlig ved UiS: Kjell Kåre Fjelde	
Tittel på oppgaven: Energibrønner	
Engelsk tittel: Shallow geothermal wells	
Studiepoeng: 20	
Emneord: Geotermisk energi, energibrønn, varmepumpe, fornybart, boring, kollektor, varmeledningsevne, oppvarming, kjøling	Sidetall: 93 Stavanger, 15.05.2023

Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet våren 2023 ved Institutt for energi- og petroleumsteknologi ved Universitetet i Stavanger. Bacheloroppgaven utgjør avslutningen av vår ingeniørutdanning i energi- og petroleumsteknologi.

Vi vil rette en stor takk til veilederen vår, Kjell Kåre Fjelde, som har bidratt med å definere oppgaven, samt komme med innspill til arbeidet og oppgaveskrivingen. Vi vil også takke Ketil Solvik Olsen og Hans Christian Hannevig fra Seabrokers Fundamentering AS som viste oss rundt på lokalene deres og svarte på alt vi hadde av spørsmål om energibrønner. Takk til Sondre Nævdal fra Båsum Boring som tok seg til å ha et møte med oss om energibrønner. I tillegg til Torstein Helliesen fra ABK-Qviller AS, Mohsen Assadi og Fredrik Skaug Fadnes fra Universitetet i Stavanger som ga oss utfyllende svar på e-post. Til slutt vil vi takke familiene våre for god støtte gjennom hele våren og spesielt takk til Egil Kolstø som har hjulpet oss med struktur og rettskriving av bacheloroppgaven.

Sammendrag

Det foreligger i dag et stort behov for å finne nye grønne energikilder som er bærekraftige. Vi trenger nye energikilder som ikke påvirker miljøet negativt og som i tillegg gir stabil tilførsel av energi gjennom hele året. Geotermisk energi er en slik fornybar energikilde og et alternativ til fossile energikilder som olje og gass. Utvinning av geotermisk energi via en energibrønn er blitt gradvis mer benyttet til oppvarming og kjøling av bygninger. Dette skyldes at dette er en energikilde som gir en langvarig og stabil tilførsel av energi gjennom hele året, uavhengig av vær og vind.

En energibrønn er et smalt og relativt grunt borehull, hvor det installeres en kollektor med kollektorvæske. En kan forklare hvordan en energibrønn fungerer ved fysiske lover innen termodynamikk, varmeoverføring og fluiddynamikk. Disse lovene gir grunnlaget for å utnytte geotermisk energi på en effektiv og bærekraftig måte. Geologiske faktorene vil også påvirke effekten til energibrønnen. Høy varmeledningsevne og grunnvannsstrømning i berggrunnen, øker ytelsen til energibrønnen.

Energibrønner henter varme fra grunnen og gir via en væske-til-vann-varmepumpe både oppvarming og kjøling til boliger og bygninger. Varmepumpen har fire komponenter: kompressor, kondensator, strupeventil og fordamper. I systemet sirkulerer det et arbeidsmedium gjennom de ulike komponentene. Varmepumpeeffekten (COP_{VP}) avhenger av forholdet mellom varmen varmepumpen leverer og hvor mye elektrisitet man bruker på å drifte varmepumpen.

Selv om energibrønner er en stabil og bærekraftig energikilde, finnes det også utfordringer ved slike brønner. Plassering, dimensjonering, konflikter med nærliggende infrastruktur og uforutsette problemer under boring er eksempler på slike utfordringer. I tillegg er kostnadene med boring og installasjon høye. Aktuell forskning tar sikte på å identifisere og utvikle mer energieffektive løsninger for energibrønner og varmepumper, og da særlig med fokus på å minimere varmetap og redusere kostnader.

Innholdsfortegnelse

FORORD	II
SAMMENDRAG	III
NOMENKLATUR	1
FIGURER	3
TABELLER	5
1 INTRODUKSJON	6
1.1 FORMÅL	7
1.2 HVA ER EN ENERGIBRØNN?	8
2 TERMODYNAMIKK	10
2.1 VARME OG ARBEID	10
2.2 INDRE ENERGI, TEMPERATUR OG LATENT VARME	11
2.3 VARMEOVERFØRING	13
2.3.1 <i>Varmeledning</i>	13
2.3.2 <i>Konveksjon</i>	14
2.3.3 <i>Stråling</i>	15
2.4 TRYKK	15
2.4.1 <i>Hydrostatisk trykk</i>	16
2.4.2 <i>Trykk i gass og gasslovene</i>	17
2.4.3 <i>Damptrykk og kokepunkt</i>	18
2.5 ENERGIBEVARINGSPRINSIPPET	19
2.6 TERMOFYSIKKENS FØRSTE LOV	21
2.7 TERMOFYSIKKENS ANDRE LOV	21
2.8 ENTALPI	23
2.9 SYSTEMER	24
2.10 CARNOT-SYKLUSEN	25
3 VARMEPUMPE	27
3.1 HVA ER EN VARMEPUMPE?	28
3.2 EFFEKTFAKTOR (COP_{VP})	29
3.3 ULIKE SYSTEMER	30
3.3.1 <i>Luft-til-luft-varmepumpe</i>	30
3.3.2 <i>Luft-til-vann-varmepumpe</i>	31
3.3.3 <i>Væske-til-vann-varmepumpe</i>	32
3.4 SYKLUSPROSESSEN	33
3.5 INVERTERTSTYRT KOMPRESSOR OG AV/PÅ-KOMPRESSOR	35
3.6 ARBEIDSMEDIUM	35
4 GEOTERMISK ENERGI OG GEOLOGI	38
4.1 DYP GEOTERMISK ENERGI	38
4.2 GRUNNVARME	39
4.3 PORØSITET OG PERMEABILITET	39
4.4 VARMELEDNINGSEVNE I BERGARTER	40
4.5 GRUNNVANN	41
4.6 FLUIDDYNAMIKK	42
4.6.1 <i>Viskositet</i>	42
4.6.2 <i>Strømming</i>	44
4.7 TERMISK MOTSTAND	45
5 ENERGIBRØNN	47
5.1 ULIKE SYSTEMER	47
5.1.1 <i>Åpne systemer</i>	47
5.1.2 <i>Lukkede systemer</i>	48
5.1.3 <i>Brønnparker</i>	49

5.2	KOLLEKTORTYPER	50
5.2.1	<i>U-rørkollektor</i>	52
5.2.2	<i>Koaksial kollektor</i>	53
5.3	KOLLEKTORVÆSKE	54
5.4	BOREPROSESSEN	55
5.4.1	<i>Forberedning</i>	56
5.4.2	<i>Simulering</i>	58
5.4.3	<i>Termisk responstest</i>	58
5.4.4	<i>Dimensjonering</i>	59
5.4.5	<i>Boremetoder</i>	61
5.4.6	<i>Borekroner</i>	64
5.4.7	<i>Fyllmasse</i>	66
5.5	LIVSSYKLUS	68
6	UTFORDRINGER OG MULIGHETER	70
6.1	INFRASTRUKTUR, PLASSERING OG DIMENSJONERING	70
6.1.1	<i>Konflikter med bygninger og infrastruktur</i>	70
6.1.2	<i>Feil dimensjonering</i>	71
6.1.3	<i>Arealutfordringer og dypere energibrønner</i>	71
6.2	UTFORDRINGER VED BORING OG INSTALLASJON	73
6.3	KOLLEKTOR	74
6.4	KOLLEKTORVÆSKER	77
6.5	KOSTNADSEFFEKTIVITET	79
6.6	GEOTERMOS	81
6.7	MILJØPÅVIRKNING	82
7	AVSLUTNING	83
8	KILDER	85

Nomenklatur

Symbol	Forklaring	Enhet
A	Areal	m ²
A _s	Overflateareal	m ²
COP _{VP}	Effektfaktor for varmepumpe	-
D	Diameter	m
E	Energi	kJ
E _K	Kinetisk energi	kJ
E _{masse}	Masseenergi	kJ
E _P	Potensiell energi	kJ
E _{System}	Energi i systemet	kJ
F	Kraft	N
H	Entalpi	kJ
h	Høyde (s.14)	m
h'	Spesifikk entalpi	kJ/kg
h _v	Varmeoverføringskonstant	W/(m ² ·K)
k	Materialets varmeledningsevne	W/(m·K)
L	Latent varme	kJ/kg
l	Lengde	m
m _c	Masse som gjennomgår en faseovergang	kg
n	Antall molekyler	mol
P	Trykk	Pa
P _{hydro}	Hydrostatisk trykk	Pa
P ₀	Atmosfærisk trykk	Pa
Q	Varme	kJ
Q _H	Varme fra høytemperaturkilde	kJ
Q _{kond}	Varmeoverføring med varmeledning	W
Q _{konv}	Varmeoverføring med konveksjon	W
Q _L	Varme fra lavtemperaturkilde	kJ
q	Varmehastighet	W/m
r	Hastighetsgradient	1/s
R	Den molare gasskonstanten	J/(mol·K)
R _b	Termisk borehullsmotstand	Km/W
R _{berggrunn}	Termisk motstand i berggrunnen	Km/W
R _T	Energibrønnens totale termiske motstand	Km/W
Re	Reynolds tall	
S	Entropi	kJ/K
S _{omgivelsene}	Entropien til omgivelsene	kJ/K
S _{system}	Entropien til systemet	kJ/K
S _{total}	Total entropi	kJ/K
T	Temperatur	K
T _{Berggrunn}	Temperaturen til borehullsvegg	K
T _f	Gjennomsnittstemperatur kollektorvæske	K
T _s	Overflatetemperatur	K
T _∞	Temperaturen til omgivelsene	K
$\frac{dT}{dx}$	Temperaturgradient	K/m

U	Indre energi	kJ
V	Volum	m ³
v	Fart	m/s
W	Arbeid	kJ
x	Tykkelsen på lag	m
U	Indre energi	kJ
Δ	Endring	
η_D	Dynamisk viskositet	kg/(m·s)
η_K	Kinematisk viskositet	m ² /s
ρ	Massetetthet	kg/m ³
τ	Skjærspenning	N/A

Figurer

FIGUR 1.1: ENERGIBRØNN KOBLET TIL EN VARMEPUMPE	8
FIGUR 2.1: SYSTEM SOM KOMPRIMERES OG EKSPANDERES	11
FIGUR 2.2: ENERGI OG TEMPERATUR GRAF FOR VANN (H ₂ O).....	11
FIGUR 2.3: FASEOVERGANGER.....	12
FIGUR 2.4: VARMELEDNING GJENNOM ET LAG	13
FIGUR 2.5: OPPDRIFTSKREFTER PÅ EN SYLINDER.....	16
FIGUR 2.6: FASEDIAGRAM FOR CO ₂	18
FIGUR 2.7: VARME OG ARBEID INN OG UT AV SYSTEMET (GETTIS, KELLER OG SKOVE 1989)	20
FIGUR 2.8: VARME OG ENTROPI INN OG UT AV SYSTEMET	22
FIGUR 2.9: VARME OG ENTALPI INN OG UT AV SYSTEMET	23
FIGUR 2.10: ISOLERT, LUKKET OG ÅPENT SYSTEM	24
FIGUR 2.11: ISOTERMISK EKSPANSJON I FORDAMPEREN.....	25
FIGUR 2.12: ADIABATISK KOMPRESJON I KOMPRESSOREN.....	25
FIGUR 2.13: ISOTERMISK KONDENSASJON I KONDENSATOREN.....	26
FIGUR 2.14: ADIABATISK EKSPANSJON I STRUPEVENTILEN	26
FIGUR 2.15: CARNOT-SYKLUS FOR VARMEPUMPE A) PV- DIAGRAM B) TS- DIAGRAM.....	26
FIGUR 3.1: SIRKELDIAGRAMMENE ILLUSTRERER ENERGIFORBRUKET BRUKT TIL OPPVARMING OG KJØLING I NORGE. TALL HENTET FRA (VIAK 2020) ..	27
FIGUR 3.2: VARMEPUMPE MED KOMPONENTER, LAVTEMPERATURKILDE OG HØYTEMPERATURKILDE.....	28
FIGUR 3.3: COP _{VP} -VERDIEN VED ULIKE UTETEMPERATURER (°C). INNETEMPERATUR ER SATT TIL: 23 °C.	30
FIGUR 3.4: INNEDELEN TIL EN LUFT-TIL-VANN-VARMEPUMPE/VÆSKE-TIL- VANN-VARMEPUMPE. HENTET FRA (CTC 2023).....	31
FIGUR 3.5: VARMEPUMPE-SYKLUSEN	33
FIGUR 3.6: PH'-DIAGRAM FOR VARMEPUMPE	34
FIGUR 3.7: PV- DIAGRAM FOR EN VARMEPUMPE	34
FIGUR 4.1: TVERRSNITTET TIL JORDENS INDRE.....	38
FIGUR 4.2: PORØSITET OG PERMABILITET.....	40
FIGUR 4.3: BERGGRUNNEN INNDELTE I UMETTET SONE, GRUNNVANSSPEIL OG METTET SONE.....	42
FIGUR 4.4: DYNAMISK VISKOSITET	43
FIGUR 4.5: REYNOLDSTALL VED LAMINÆR OG TURBULENT STRØMNING.	44
FIGUR 4.6: BOREHULLSMOTSTANDEN I EN U-RØR KOLLEKTOR.....	46
FIGUR 5.1: ULIKE SYSTEMER. A) ÅPENT SYSTEM, B) LUKKET SYSTEM, C) BRØNNPARK	47
FIGUR 5.2: ÅPENT SYSTEM	48
FIGUR 5.3: KOMPONENTENE I ET LUKKET SYSTEM	49
FIGUR 5.4: BRØNNPARK. HENTET FRA (EARTH ENERGY DESIGNER 2023).....	50

FIGUR 5.5: ENDEN AV EN U-RØR KOLLEKTOR HVOR LODDET HENGES. BILDE TATT HOS SEABROKERS FUNDAMENTERING AS	51
FIGUR 5.6: BILDE AV EN U-RØRKOLLEKTOR. TATT HOS SEABROKERS FUNDAMENTERING AS.....	52
FIGUR 5.7: A) TVERRSNITTET TIL EN TYPISK U-RØRKOLLEKTOR, B) PILENE STRØMNINGSRETNINGEN TIL U-RØRKOLLEKTOREN	52
FIGUR 5.8: A) TVERRSNITTSAREALET AV KOAKSIAL KOLLEKTOREN, B) STRØMNINGSRETNINGEN FOR OPPVARMING OG KJØLING AV EN KOAKSIAL KOLLEKTOR.....	53
FIGUR 5.9: FORENKLET GEOLOGISK BERGGRUNNSKART OVER NORGE HENTET FRA (NGU 2023).....	57
FIGUR 5.10: TERMISK RESPONS TEST	59
FIGUR 5.11: PROSESSEN TIL ODEX BORING. BILDE ER HENTET FRA (PRD RIGS 2023).....	61
FIGUR 5.12: KOMPONENTENE TIL HAMMERBORING	62
FIGUR 5.13: EN LITEN BORERIGG FOR INSTALLASJON AV EN ENERGIBRØNN ...	63
FIGUR 5.14: BILDE AV DE ULIKE BOREKRONENE BRUKT TIL Å BORE EN ENERGIBRØNN, HENTET FRA (DALER 2016)	65
FIGUR 5.15: BOREHULLET SITT TVERRSNITTET TIL DE ULIKE KOLLEKTORTYPENE SOM ER OMRINGET AV FYLLMASSE.....	66
FIGUR 5.16: FORANKRET FORINGSRØR I FJELLET.	67
FIGUR 5.17: VISER DE ULIKE PROSESSENE I EN LIVSSYKLUSANALYSE.....	68
FIGUR 6.1: STRØMNING I ENERGIBRØNNEN.....	72
FIGUR 6.2: GJENNOMSNITTSTEMPERATUR I U-RØR (ACUÑA OG PALM 2010).....	75
FIGUR 6.3: EN U-RØR KOLLEKTOR VED ET STØRRE NEDSTRØMNINGSRØR OG ET MINDRE OPPSTRØMNINGSRØR.....	76
FIGUR 6.4: GJENNOMSNITTSTEMPERATUR FOR KOAKSIAL KOLLEKTOR (ACUÑA OG PALM 2010)).....	76
FIGUR 6.5: ENERGIFORBRUKET I KWH ETTER 10 ÅR	78
FIGUR 6.6: COP-VERDIER FOR ULIKE FRYSEVÆSKER.....	79
FIGUR 7.1: OVERSIKT OVER EN ENERGIBRØNN	83

Tabeller

TABELL 5.1: EGENSKAPENE TIL ULIKE FROSTVÆSKER VED 0 GRADER CELSIUS (VANN VED 5 GRADER CELIUS). HENTET FRA (BANKS 2012), DATA FOR HX35 ER HENTET FRA (BÅSUM BORING AS 2023)	55
TABELL 5.2: INNDELING AV KLIMASONENE (HELLIESEN / ABK- QVILLER AS 2023).....	60
TABELL 5.3: GEOLOGISK KARTLEGGING AV BORINGSMETODE FOR ET UTVALG AV ULIKE BERGARTER I EUROPA. HENTET FRA (GALGARO, ET AL. 2022) ..	64
TABELL 5.4: OVERSIKT OVER HVILKE BOREMETODE OG BOREKRONE MAN BRUKER I DE ULIKE BERGARTENE.....	65
TABELL 6.1: OVERSIKT OVER TEMPERATURGRADIENNTEN VED ULIKE BRØNNDYBDER. DATA HENTET FRA (ELVEBAKK 2018).....	72
TABELL 6.2: OVERSIKT OVER ENERGIFORBRUKET TIL ULIKE FRYSEVÆSKER OVER EN TIDSPERIODE. (SOLTANI, ET AL. 2021).....	78
TABELL 6.3: KOSTANDER KNYTTET TIL INSTALLERING VED EN ENERGIBRØNN (BOLIGSMART 2023)	80

1 Introduksjon

Det er ikke tvil om at dagens energiindustri trenger et grønt skifte for å redusere klimagassutslipp. Økt befolkning og industriell vekst har ført til høyere utslipp av klimagassene karbondioksid, metan og lystgass. Utslipet fra menneskeskapt aktivitet har ført til en stigende global gjennomsnittstemperatur som igjen har skapt flere klimaendringer. Havet stiger, isen smelter, det blir mer ekstremvær og flere naturkatastrofer. For å stoppe eller i hvert fall bremse denne globale utviklingen vedtok FNs klimapanel Parisavtalen av 12. desember 2015. Parisavtalen er en internasjonal avtale som fastsetter at alle land må begrense temperaturstigningen til maksimalt 2 grader celsius, helst 1,5 grader celsius og oppnå klimanøytralitet innen 2100 (FN-sambandet 2020).

I følge «Emissions gap report» fra FNs miljørapport stod karbondioksid (CO₂) for 74% av verdens klimagassutslipp (UNEP Copenhagen Climate Centre 2021). Bruken av petroleum og kull er en av de største årsakene til det skyhøye CO₂ utslippet. Ved forbrenning av fossile brensler frigjøres store mengder karbondioksid (CO₂) som slippes ut i atmosfæren og forsterker drivhuseffekten. Mindre varme slippes ut gjennom atmosfæren og dette fører til økt global temperatur. Ved å redusere bruken av fossile brensler og heller konvertere til fornybare energikilder vil en sikre en bærekraftig utvikling som er avgjørende for å nå FNs klimamål. De siste årene har satsingen på teknologiutvikling innenfor fornybar energi økt betraktelig.

Geotermisk energi blir stadig mer benyttet som alternativ til fossil energi. Geotermisk energi i jordskorpen er anslått til å utgjøre 35 milliarder ganger verdens årlige energiforbruk (Spjeldnæs og Fossen 2023) Effektiv utnyttelse av geotermisk energi er derimot en utfordring mange steder i verden på grunn av geografiske forhold. Det er derfor fokus på forskning for å finne mer energieffektive og kostnadsbesparende løsninger.

Rekordhøye strømpriser fører til større interesse for grunnvarme og man leter nå etter strømbesparende måter å varme opp bygninger på (Sandberg 2021). En av de disse løsningene er energibrønner, som utnytter energien i berggrunnen. Energibrønner er en form for geotermisk energi som har fått økt interesse de siste årene og brukes til oppvarming og kjøling av boliger og bygninger. Den økende interessen skyldes lave oppvarmings- og kjølekostnader, samt reduksjon av klimautslipp.

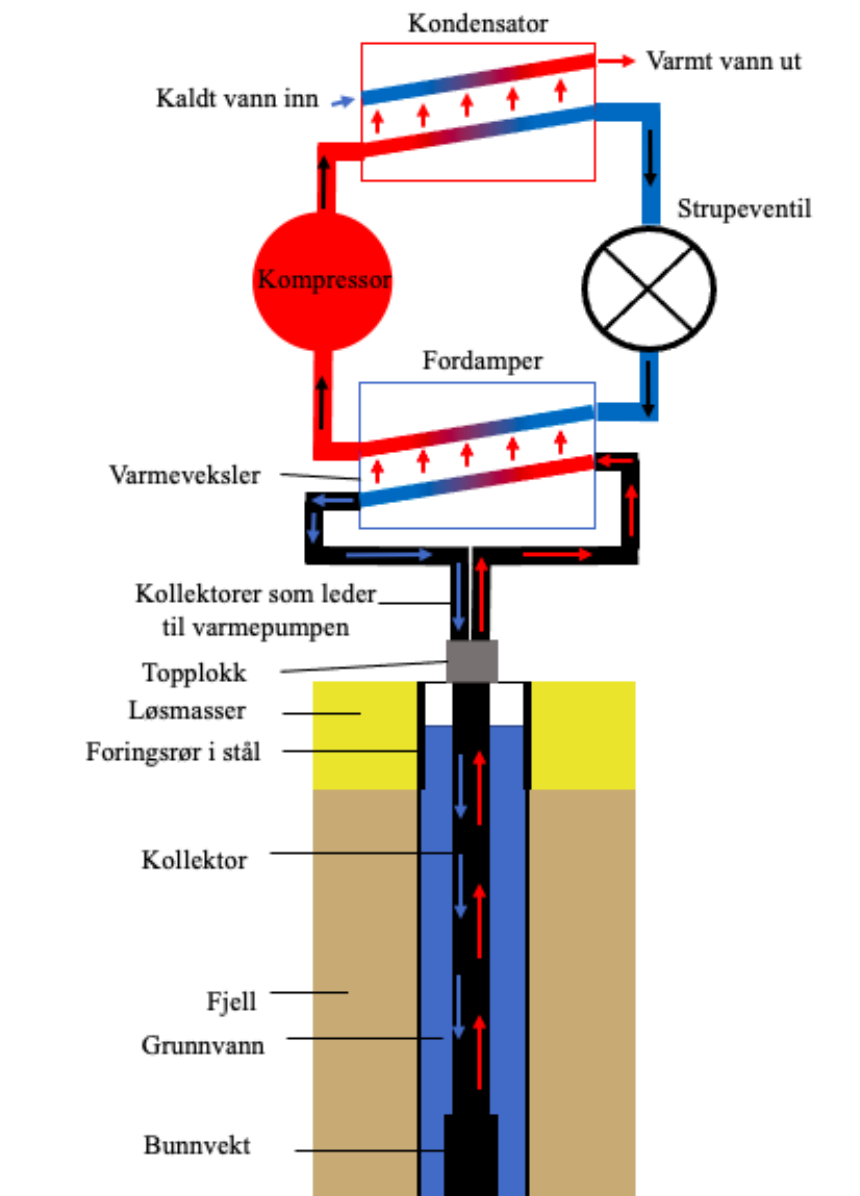
1.1 Formål

Denne bacheloroppgaven har til formål å beskrive en energibrønn, samt hovedkomponentene som brukes til å utvinne grunnvarmen. Dette inkluderer varmepumpen, kollektoren og kollektorvæsken.

Termofysikk, fluiddynamikk og geologi er viktige faktorer for utnyttelsen av en energibrønn. Vi vil først redegjøre for nødvendig teori for å kunne forstå prosessene som foregår i en energibrønn. Deretter vil vi forklare hva geotermisk energi er, og hvordan ulike geologiske faktorer påvirker en energibrønn. Vi vil hovedsakelig sette søkelys på oppbygning og installasjon av energibrønnen. I tillegg vil vi se på utfordringene knyttet til energibrønnen og peke på noen muligheter for å gjøre energibrønner mer energi- og kostnadseffektive.

1.2 Hva er en energibrønn?

En energibrønn er et smalt og relativt grunt (rundt 200 meter) borehull i grunnen som brukes til å utvinne grunnvarme. Energibrønner utnytter lavtemperaturrenergi i grunnen, som hovedsakelig kommer fra solenergi, og omgjør den lave temperaturen til høy temperatur ved hjelp av en varmepumpe (Rosvold og Hofstad 2019) (NOVAP 2023).



Figur 1.1: Energibrønn koblet til en varmepumpe

For å kunne utnytte en energibrønn må man installere en varmepumpe i bygningen som kobles til energibrønnen. I figur 1.1 illustreres alle komponentene i en energibrønn koblet til en varmepumpe. Det installeres en kollektor i energibrønnen som fylles av kollektorvæske.

Kollektorvæsken sirkuleres opp og ned i brønnen. Varmen som sirkuleres opp fra energibrønnen fordamper arbeidsmediet i varmepumpen, via en varmeveksler. Varmepumpen leverer varmtvann til radiatorer, gulvvarme, bad og dusj.

Dybden på en energibrønn varierer med hvilken hensikt brønnen har. En energibrønn som skal dekke energibehovet til en bolig er et par hundre meter dyp, mens de dypeste geotermiske brønnene kan være flere tusen meter ned i grunnen. De dype brønnene utnytter at temperaturen stiger desto dypere man kommer i jordskorpen og man kan derfor hente mer energi fra slike brønner. De grunne energibrønnene utnytter energien som er lagret i de øvre sjiktene i jordskorpen, hvor temperaturen er lavere og de gir derfor mindre energi (Rosvold og Hofstad 2019) (NGU 2023).

I denne bacheloroppgaven vil vi fokusere på de grunne energibrønnene.

2 Termodynamikk

Ved hjelp av termodynamiske prinsipper kan man forklare hvordan varmpumper og energibrønner fungerer. Termodynamikk forklarer sammenhengen mellom energi, varme og arbeid.

2.1 Varme og arbeid

Varme er energi som blir overført fra et sted til et annet på grunn av temperaturskjell, Q . Varme vil derfor alltid gå fra et sted med høyere temperatur til et sted med lavere temperatur. Det foregår en energiutveksling mellom to systemer med ulik temperatur. Dette har sammenheng med termofysikkens nulte lov: *Hvis to systemer er i termisk likevekt med et tredje system, så er de også i termisk likevekt med hverandre* (Zohuri 2018). Først når temperaturen er i likevekt i to systemer stopper energiutvekslingen. Den energien som er i et lukket system, for eksempel i en varmpumpe, kalles for indre energi og kan ikke betegnes som varme før energien slippes ut av systemet (Pedersen, varme 2017).

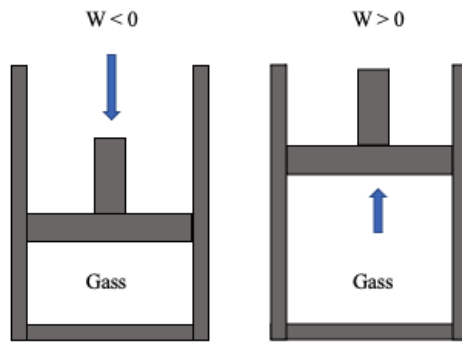
Arbeid, W , er en form for energioverføring ved at en kraft virker på en gjenstand. Se for deg en innestengt gass i en sylinder med et bevegelig stempel. Når stempelet beveger seg nedover, blir volumet mindre og gassen komprimeres. Da utfører stempelet et arbeid på gassen ($W < 0$). Hvis en derimot skyver stempelet oppover, øker volumet og gassen ekspanderer. Da gjør gassen et arbeid på stempelet ($W > 0$) (Grøn 2018). Arbeid har enhet joule og kan defineres slik:

$$W = P\Delta V \quad (2.1)$$

Hvor

P = Trykket til gassen [Pa]

ΔV = Endring i volum

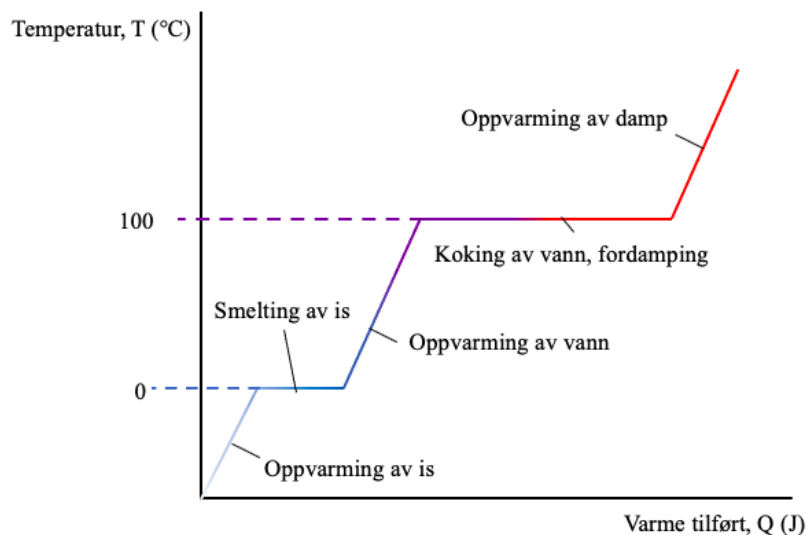


Figur 2.1: System som komprimeres og ekspanderes

Figur 2.1 illustrerer et system som komprimeres og ekspanderes på grunn av et arbeid utført på systemet og et arbeid utført av systemet.

2.2 Indre energi, temperatur og latent varme

Indre energi, U , er summen av termisk energi og kjemisk energi. Termisk energi er den energien som et stoff har på grunn av temperaturen. Temperaturen til stoffet avhenger av den kinetiske temperaturen til partikler i stoffet. Det betyr at en høyere kinetisk energi, vil medføre høyere temperatur. Kjemisk energi handler om den energien som er bundet i bindinger mellom partikler. Bindingene skyldes elektriske krefter mellom molekylene og energien som holder dem sammen. Indre energi er stort sett knyttet til temperatur og latent varme (Bøe 2022).



Figur 2.2: Energi og temperatur graf for vann (H_2O).

Grafen i figur 2.2 viser hvordan temperaturen til vann (H₂O) endrer seg ved tilført energi. Tilfører man varmeenergi til et stoff vil temperaturen øke i stoffet. Temperaturen øker helt frem til man når et punkt hvor den indre energien heller knyttes mot kjemisk energi. Da vil bindingene i stoffet endres, og man får en faseovergang med konstant temperatur. Den varmen som må tilføres eller avgis for at et stoff skal gjennomgå en faseovergang kaller man latent varme. Latent varme kan man regne ut ved følgende formel (Sorteberg 2023):

$$L = \frac{Q}{m_c} \quad (2.2)$$

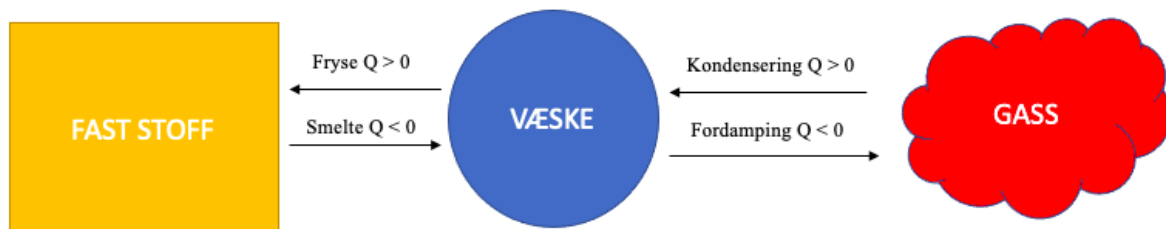
Hvor

L = Den spesifikke latente varmen [kJ/kg]

Q = Varmen som enten blir frigitt (Q > 0) eller tilført (Q < 0) i kilojoule [kJ]

m_c = Massen av stoffet som skifter fase i kilogram [kg] (Sorteberg 2023) (Bøe 2022).

Vann (H₂O) må tilføres omtrent 2260 kJ/kg varme for å fordampe fra væske til gass. Da vil den latente varmen bindes opp i gassen (Datt 2011). Når gassen kondenserer frigis samme mengde varme som ble tilført for at væsken skulle fordampes (Pedersen, faseovergang 2020).



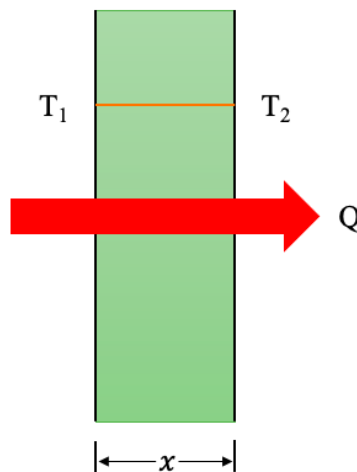
Figur 2.3: Faseoverganger

2.3 Varmeoverføring

Det finnes tre måter å overføre varme på: varmeledning, konveksjon og stråling.

2.3.1 Varmeledning

Ved varmeledning overføres varmeenergi til og fra molekyler. Siden molekylenes bevegelser øker i takt med temperaturen øker også kollisjonene mellom atomene i stoffet (Fooladi og Isnes 2009).



Figur 2.4: Varmeledning gjennom et lag

Kollisjonene med omliggende molekyler og atomer overfører varmeenergi slik at varmen fordeler seg jevnere i stoffet. Varmeoverføring gjennom et lag kan beskrives ved denne formelen (Kanoglu, Cengel og Cimbala 2020):

$$Q_{kond} = -kA \frac{\Delta T}{x} \quad (2.3)$$

Hvor

Q_{kond} = Varmeoverføring ved varmeledning gjennom et lag [W]

ΔT = Temperaturforskjellen mellom lagene [K]

A = Arealet på laget [m^2]

x = Tykkelsen på laget [m]

k = Materialets varmeledningskonstant [W/(m·K)]

Fra formelen vet vi at varmeoverføringen gjennom et lag er proporsjonal med temperaturforskjellen og arealet, og omvendt proporsjonalt med tykkelsen på laget. Det betyr at større areal og temperaturforskjell gir mer varmeoverføring, mens tykkere lag gir mindre

varmeoverføring. Materialets varmeledningskonstant, k , avhenger av hvor godt materialet leder varme og er unikt for hvert materiale. Siden temperaturen vil synke gjennom laget vil temperaturforskjellen være negativ og man setter dermed et minustegn foran formelen for å få positiv verdi for varmeoverføring (Kanoglu, Cengel og Cimbala 2020).

Man kan også uttrykke varmeoverføringen med temperaturgradient istedenfor temperaturforskjell og tykkelse på laget. Da får man *Fourierloven* (Kanoglu, Cengel og Cimbala 2020):

$$Q_{kond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.4)$$

Hvor

$$\frac{dT}{dx} = \text{Temperaturgradienten [K/m]}$$

Temperaturgradienten er en verdi for hvor mye temperaturen endrer seg gjennom et medium i en bestemt retning (Hofstad, gradient (temperaturgradient) 2019). Øker temperaturgradienten øker også varmeoverføringen ved varmeledning (Kanoglu, Cengel og Cimbala 2020).

2.3.2 Konveksjon

Konveksjon er når varmeenergi blir overført fra et sted til et annet ved hjelp av en strøm av væske eller gass. Blandinger av små gass- eller væskemasser med ulik temperatur beveger seg fra ett sted til et annet. Konveksjon betyr at varme molekyler beveger seg, og disse vil derfor være flytende. Molekyler i væsker og gasser med høy temperatur har raskere bevegelser og tar opp mer plass. Formelen for massetetthet, $\rho = \frac{m}{V}$, forteller oss at når volumet blir større synker massetettheten (Hofstad, massetetthet 2021). Da vil molekylene stige opp og vi får bevegelse (Fooladi og Isnes 2009).

Varmeoverføringer i form av faseendringer er også en konveksjon på grunn av bevegelse i molekylene under prosessene. Når vann går fra væske til gass, koker vannet og gassen stiger. For å beskrive varmeoverføring ved konveksjon brukes Newtons avkjølingslov (Kanoglu, Cengel og Cimbala 2020):

$$Q_{konv} = h_v A_s (T_s - T_\infty) \quad (2.5)$$

Hvor

Q_{konv} = Varmeoverføring ved konveksjon [W]

T_s = Temperaturen til overflaten [K]

T_{∞} = Temperaturen til omgivelsene [K]

A_s = Arealet til overflaten [m^2]

h_v = Varmeoverføringskonstanten [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]

Formelen viser at varmeoverføringen er proporsjonal med temperaturforskjellen mellom overflaten og omgivelsene. Øker arealet til overflaten øker også varmeoverføringen (Kanoglu, Cengel og Cimbala 2020). Varmeoverføringskonstanten, h , er avhengig av en rekke forhold, slik som fluidets bevegelse, fluidets viskositet, varmeledningsevne og varmekapasitet (Vincent Thue 2019).

2.3.3 Stråling

Stråling er varmeoverføring ved elektromagnetiske bølger. Elektromagnetiske bølger blir generert ved at atomer og molekyler sendes ut som fotoner. Stråling skiller seg fra varmeledning og konveksjon ved at det ikke er fysisk kontakt mellom stoffer. Ved varmeoverføring er det den termiske strålingen som er viktig. Denne skiller seg fra andre type strålinger som radiobølger og røntgenstråling som ikke overfører varme. Alle legemer som har temperatur over det absolutte nullpunktet, avgir termisk stråling (Kanoglu, Cengel og Cimbala 2020).

2.4 Trykk

Trykk er forholdet mellom kraft som virker vinkelrett på en flate og flatens areal. Trykket kan beskrives slik:

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.6)$$

Hvor

P = Trykk [Pa]

F = Kraft som virker vinkelrett på flaten [N]

A = Arealet til flaten [m^2]

Trykk er en skalar, som vil si at det er en størrelse uten retning (Store Norske Leksikon 2019).

2.4.1 Hydrostatisk trykk

For en væske som er i ro, øker trykket med dybden på grunn av tyngdekraften og væskens vekt. Dette trykket kaller man hydrostatisk trykk og uttrykkes ved denne formelen:

$$P_{hydro} = P_0 + \rho gh \quad (2.7)$$

Hvor

P_{hydro} = Det hydrostatiske trykket [Pa]

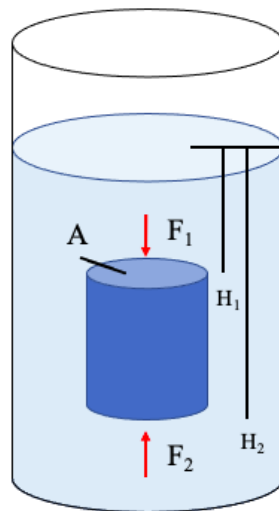
h = Dybden [m]

ρ = Massetetthet [kg/m^3]

P_0 = Det atmosfæriske trykket [Pa]

Man legger til det atmosfæriske trykket fordi det ligger over væsken og øker trykket (Store Norske Leksikon 2019).

Hydrostatisk trykk kan brukes til å forklare Arkimedes lov om oppdrift som sier: «*En gjenstand som er helt eller delvis nedsenket i en væske eller gass får en oppdrift lik tyngden av den væskemengden som gjenstanden fortrenger*» (Pedersen, arkimedesloven 2020).



Figur 2.5: Oppdriftskrefter på en sylinder

Oppdriften er en kraft som virker vertikalt oppover og kan defineres ved hjelp av formelen for det hydrostatiske trykket. Ser man for seg en sylinder nedsenket i vann som i figur 2.5 vil krefter virke på sylindere fra alle kanter, på grunn av trykket i vannet. Siden sylindere er senket vertikalt nuller kreftene på sidene hverandre ut. Da finner man oppdriftskraften ved å finne forskjellen mellom kreftene oppe og nede ved sylindere.

$$F = F_2 - F_1 \quad (2.8)$$

Hvor

F = Vertikale trykkrefter som virker på sylindere [N]

F_2 = Krefter som virker på undersiden av sylindere [N]

F_1 = Krefter som virker på oversiden av sylindere [N]

Vi kan fra formel 2.8 bytte ut F_2 og F_1 med trykk og areal:

$$F = (P_2 - P_1) \cdot A \quad (2.9)$$

Setter vi da inn formelen for hydrostatisk trykk får vi til slutt formelen for oppdrift (Øyro 2018) (Helseth, oppdrift 2024):

$$F = ((P_0 + \rho g h_2) - (P_0 + \rho g h_1)) \cdot A = \rho g (h_2 - h_1) \cdot A = \rho g V \quad (2.10)$$

Hvor

ρ = Massetetthet til væsken [kg/m^3]

g = Tyngdekraftakselerasjon [m/s^2]

V = Volumet til sylindere [m^3]

h = Høyde [m]

2.4.2 Trykk i gass og gasslovene

Studerer vi en lukket beholder med gass ser vi at molekylene i gassen utøver krefter på veggene i beholderen. Det er summen av alle kreftene som molekylene bruker på veggene som utgjør trykket i beholderen. I ideelle gasser kan vi neglisjere krefter mellom molekylene og volumet til molekylene. Sammenhengen mellom temperatur, volum, og trykk er gitt ved tilstandslikningen (Store Norske Leksikon 2019):

$$P = \frac{nRT}{V} \quad (2.11)$$

Hvor

n = Antall molekyler [mol]

R = Den molare gasskonstanten [$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$]

Gay-Lussacs lov sier at volumet av en bestemt gasmengde ved konstant trykk er proporsjonalt med temperaturen (Aarnes, Gasslovene 2021). Så når P er konstant er:

$$\frac{V}{T} = \text{konstant} \quad (2.12)$$

Boyle-Mariottes lov sier at ved en konstant temperatur er produktet av trykk og volum for en gass konstant (Aarnes, Gasslovene 2021). Så når T er konstant er:

$$PV = \text{konstant} \quad (2.13)$$

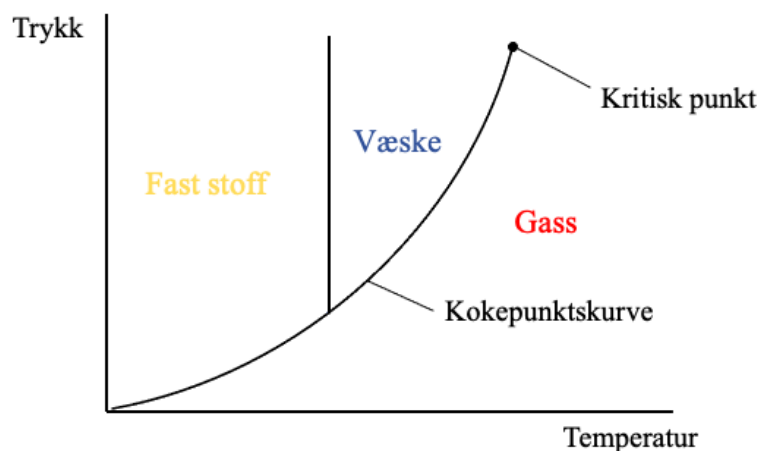
Kombinerer vi disse to lovene får vi den ideelle gassloven på følgende måte (Aarnes, Gasslovene 2021):

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (2.14)$$

Denne formelen beskriver sammenhengen mellom trykk, volum og temperatur.

2.4.3 Damptrykk og kokepunkt

Damptrykk er det trykket en gass har i en lukket beholder hvor det også befinner seg en væske (Helseth, damptrykk 2023). Damptrykk oppstår ved det trykket hvor det er likevekt mellom gass og væske (i noen tilfeller fast stoff) i beholderen. Likevekt mellom gass og væske betyr at det er like mange molekyler som kondenserer, som fordamper (Helseth, damptrykk 2023).



Figur 2.6: Fasediagram for CO₂

Når damptrykket er like stort som lufttrykket, har man nådd kokepunktet. Derfor er kokepunktet lavere hvis lufttrykket er lavere, for eksempel på Mount Everets. Er det høyere lufttrykk må damptrykket også økes, da trengs mer energi for å nå kokepunktet.

Fasediagrammet i figur 2.6 viser hvordan kokepunktet endrer seg med temperatur og trykk. Kokepunktet er starten på faseovergangen fra væske til gass. Vi sier derfor at når trykket øker, øker kokepunktet og når trykket synker, synker kokepunktet som man ser i figur 2.6. Dette kaller man kokepunktloven (Ormestad og Pedersen 2022) (Christensen 2006).

Det kritiske punktet er hvor vi ikke lenger kan skille mellom to ulike faser. Punktet ligger, som vi ser i figur 2.6, på enden av kokepunktskurven og oppstår ved et spesielt kritisk trykk og kritisk temperatur. Når man kommer over det kritiske punktet på kokepunktskurven får vi det vi kaller en superkritisk væske, som har egenskaper både som gass og som væske (Pedersen, Fasediagram 2021) (Helmenstine 2022).

2.5 Energibevaringsprinsippet

Termodynamikkens 1. lov er om energibevaring og er definert som følgende: *Energi kan verken oppstå eller forsvinne, men kun endre form* (Cengel, Cimbala og Turner 2012). Dette betyr at energien i et system er konstant. Den generelle formelen for masse- og energibalanse gjelder for alle systemer og prosesser. Vi kaller denne formelen for energibevaringsprinsippet:

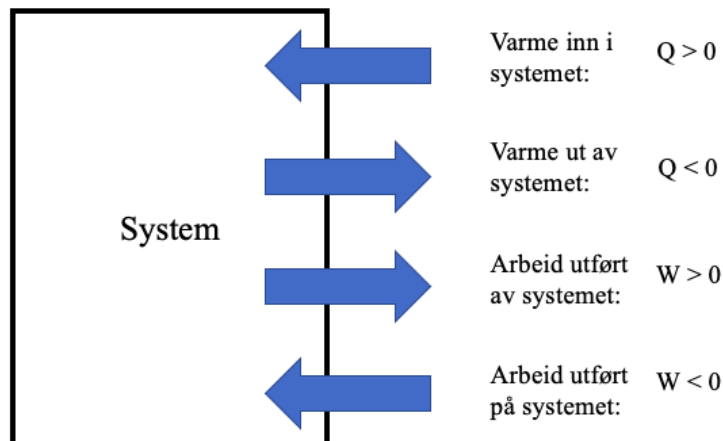
$$\Delta E_{system} = E_{inn} - E_{ut} \quad (2.15)$$

Hvor

ΔE_{system} = Endring i energi til systemet [kJ]

E_{inn} = Energi inn [kJ]

E_{ut} = Energi ut [kJ]



Figur 2.7: Varme og arbeid inn og ut av systemet (Gettis, Keller og Skove 1989)

Ved å la varme inn i systemet og arbeid, W , utført av systemet være positivt (se figur 2.7) vil energibalansen til et lukket system kunne skrives på følgende form (Cengel, Cimbala og Turner 2012):

$$\Delta E_{system} = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p \quad (2.16)$$

$$E_{inn} - E_{ut} = Q - W + E_{masse} \quad (2.17)$$

Hvor

E_k = Kinetisk energi [kJ]

E_p = Potensiell energi [kJ]

U = Indre energi [kJ]

E_{masse} = Massestrømningsenergi [kJ]

I likning 2.17 har vi definert en ny enhet, E_{masse} . Dette er energien knyttet til massestrømning. Når masse går inn i et system, øker energien i systemet fordi masse bærer energi. Vi vil få motsatt effekt dersom masse går ut av et system. Da vil energien i systemet minske ettersom massen tar ut noe av energien. ΔU er den indre energien som er knyttet til systemets energi på mikroskopisk nivå (Cengel, Cimbala og Turner 2012). Ved å sette sammen likning 2.16 og likning 2.17 får vi:

$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q - W + E_{masse} \quad (2.18)$$

Fra likning 2.18 ser vi at endring i indre energi, kinetisk energi og potensiell energi er lik netto energi overført av varme, arbeid og masse.

De fleste systemer er stasjonære, noe som betyr at fart og høyde er uendret gjennom prosessen (Cengel, Cimbala og Turner 2012). For stasjonære systemer er dermed endring i potensiell- og kinetisk energi neglisjerbare, $\Delta E_k = \Delta E_p = 0$ dermed er $\Delta E_{system} = \Delta U$.

2.6 Termofysikkens første lov

Termofysikkens første lov er et spesielt tilfelle for det generelle energibevareingsprinsippet. Formelen fokuserer på endring i intern energi i et termodynamisk system og defineres slik (Cengel, Cimbala og Turner 2012):

$$\Delta U = Q - W \quad (2.19)$$

Formelen sier at enhver prosess der varme tilføres og arbeid utføres på et system, vil den totale energien tilført være lik økningen i systemets indre energi. (Cengel, Cimbala og Turner 2012)

2.7 Termofysikkens andre lov

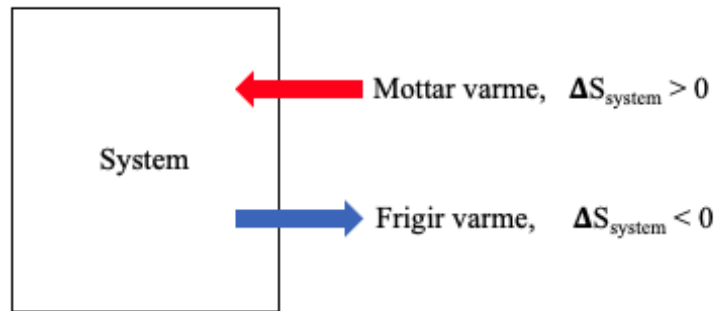
Termofysikkens andre lov refereres til som «entropiloven» og sier at entropien i et isolert system øker over tid eller som et minimum holder seg konstant. Loven kan defineres slik (Cengel, Cimbala og Turner 2012):

$$\Delta S_{total} = \Delta S_{system} + \Delta S_{omgivelsene} \geq 0 \quad (2.20)$$

Hvor

S = Entropi [kJ/K]

Likningen viser at endring i den totale entropien er lik summen av endring i entropi til systemet og omgivelsene, og den totale endring er større eller lik null (Øyås 2011) (Cengel, Cimbala og Turner 2012). Figur 2.8 illustrer et system som mottar varme, da øker entropien. Dersom systemet frigir varme, vil entropien til systemet minske.



Figur 2.8: Varme og entropi inn og ut av systemet

Entropi er et mål for uorden og viser hvor mye energi i et system som er utilgjengelig for å utføre arbeid. Uorden vil øke når et stoff smelter eller fordamper. Entropi angis i enheten kJ/K og kan defineres slik (Cengel, Cimbala og Turner 2012) (Aarnes, Entropi 2022):

$$\Delta S_{system} = \int_1^2 \frac{\Delta Q}{T} \quad (2.21)$$

Total endring entropi er en viktig faktor for å vurdere effektiviteten i en prosess. Vi ønsker å minimere total endring entropi for å kunne nyttiggjøre mest mulig av energien vi anvender. Følgende prinsipper gjelder for endring av total entropi (Cengel, Cimbala og Turner 2012):

Irreversibel prosess: $\Delta S_{total} > 0$

Reversibel prosess: $\Delta S_{total} = 0$

Umulig prosess: $\Delta S_{total} < 0$

En reversibel prosess er en ideell prosess og defineres som en prosess som kan gå tilbake til sin opprinnelige tilstand uten å frigjøre energi til omgivelsene. Den totale entropien ved en reversibel prosess vil derfor være lik 0, noe som betyr at all energi kan nyttiggjøres og effektiviteten vil derved være 100%. Selv om reversible prosesser er ønskelige, vil de aldri kunne oppnås som følge av energitap til omgivelsene, eksempelvis friksjon, varmeoverføring, elektrisk motstand og kjemiske reaksjoner. Prosesser med energitap kalles irreversible prosesser. Irreversible prosesser har en total entropi som er høyere enn 0. Her vil den totale entropien tilsvare den energimengden som ikke kan nyttiggjøres (Cengel, Cimbala og Turner 2012).

2.8 Entalpi

Entalpi er et begrep i termofysikken som beskriver varmemengden i et system. Entalpi har symbol H med måleenhet kJ. Formelen til entalpi er definert slik (Cengel, Cimbala og Turner 2012):

$$H = U + PV \quad [\text{kJ}] \quad (2.22)$$

Formelen for endring i entalpi er definert slik:

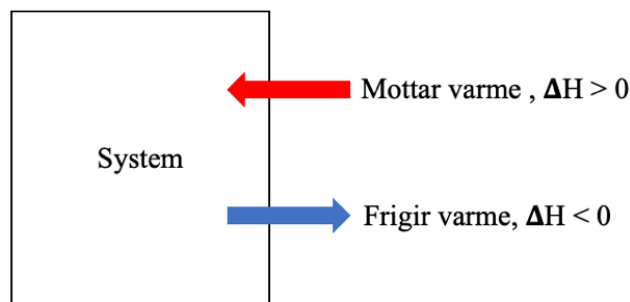
$$\Delta H = \Delta U + \Delta(PV) \quad [\text{kJ}] \quad (2.23)$$

Hvor

U = Indre energi [kJ]

P = Trykk [Pa]

V = Volum [m^3]



Figur 2.9: Varme og entalpi inn og ut av systemet

Figur 2.9 illustrerer at endring i entalpi (ΔH) vil medføre økt eller tapt varmemengde av systemet. Dersom endring i entalpi (ΔH) er negativ vil systemet avgi varme. Dette medfører at systemet frigir varme. Motsatt, ved positiv ΔH betyr det at systemet mottar varme. Entalpi brukes ofte til beregninger av isobariske prosesser, som betyr prosesser med konstant trykk. En faseovergang er et eksempel på en isobarisk prosess (Pedersen, entalpi 2022). Ved en isobarisk prosess kan vi utlede formelen for entalpi. (Institutt for biovitenskap 2011) Fra formel 2.19 for indre energi slått sammen med formel 2.23 gir:

$$\Delta H = Q - W + P\Delta V \quad (2.24)$$

Fra formel 2.1 kan vi bytte ut arbeid med trykk og volum:

$$\Delta H = Q - P\Delta V + P\Delta V \quad (2.25)$$

Da får vi formelen for endring i entalpi ved en isobarisk prosess:

$$\Delta H = Q \quad (2.26)$$

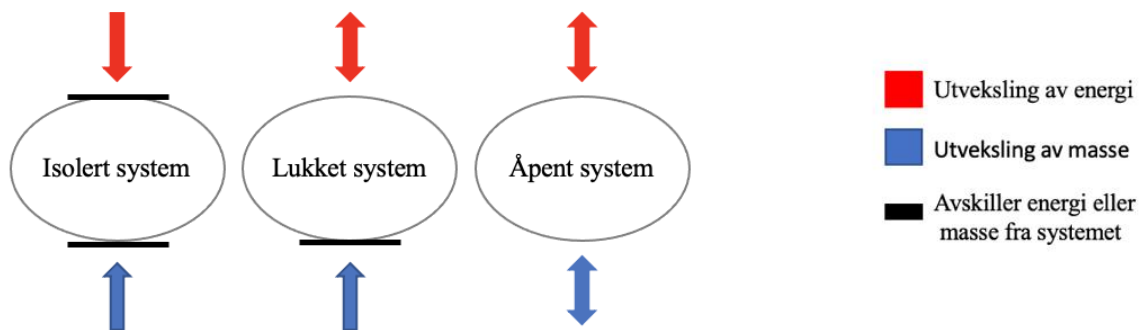
Hvor

Q = Varmer inn eller ut av systemet [kJ]

Formel 2.26 viser at ΔH tilsvarer varmeendringen til systemet ved en isobarisk prosess. For eksempel ved smelting må varme tilføres som betyr at ΔH blir positiv.

2.9 Systemer

I termodynamikken skiller vi mellom ulike typer systemer.



Figur 2.10: Isolert, lukket og åpent system

Figur 2.10 viser energi og masseoverføringen i et isolert, lukket og åpent system og omgivelsene. Røde piler viser utveksling av energi mellom systemet og omgivelsene. Blå piler viser utveksling av masse mellom systemet og omgivelsene. Det svarte tynne rektangelet representerer en skillevegg som avskiller energi og masse fra systemet.

Et åpent system kan utveksle både energi og masse med omgivelsene, slik som en kompressor. Kompressoren har en inngang og utgang hvor væske kommer inn og ut av systemet. Følgelig vil det foregå en energi- og masseoverføring (Cengel, Cimbala og Turner 2012).

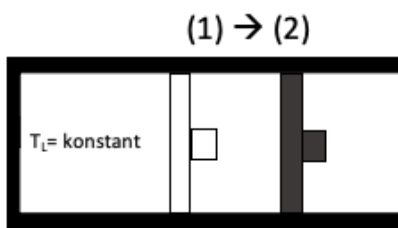
Et lukket system utveksler bare energi, ikke masse med omgivelsene. Det betyr at masse ikke kan gå inn eller ut av systemet. Energi, som varme og arbeid, kan derimot beveges inn og ut av systemet (Cengel, Cimbala og Turner 2012).

Dersom systemet ikke kan utveksle energi eller masse, kalles det et isolert system. Dette systemet er fullstendig avskilt fra omgivelsene, som for eksempel en termosflaske. Vi kan sammenlikne et adiabatisk system med et isolert system. Adiabatisk vil si det er isolert med hensyn på varme, og utveksler dermed ikke varme med omgivelsene (Cengel, Cimbala og Turner 2012).

2.10 Carnot-syklusen

Den reversible Carnot-syklusen er en teoretisk syklus som kan brukes til å beskrive hvordan en ideell varmepumpe skal fungere ved en ideell gass. Syklusen er basert på termodynamisk teori som beskriver en reversibel og adiabatisk prosess. En reversibel adiabatisk prosess kalles en isentropisk prosess, som betyr at entropien er konstant. Vi deler Carnot-syklusen inn i følgende fire trinn (Cengel, Cimbala og Turner 2012) (Novak 2023):

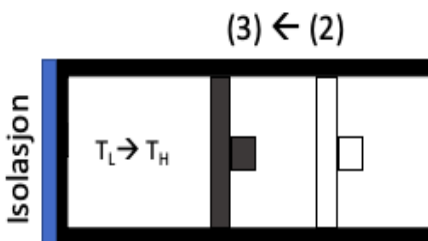
I dette tilfelle bruker vi en ideell gass som arbeidsmedium.



Figur 2.11: Isotermisk ekspansjon i fordampere

- **Prosess 1-2 (Reversibel isotermisk ekspansjon):**

Den ideelle gassen ekspanderer isotermisk ved konstant temperatur T_L fra en lavtemperaturkilde i fordampere. Volumet øker, og trykket synker. I denne prosessen absorberes det en mengde varme Q_{inn} fra lavtemperaturkilden.

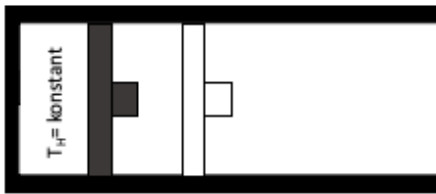


Figur 2.12: Adiabatisk kompresjon i kompressoren

- **Prosess 2-3 (Reversibel adiabatisk kompresjon):**

Den ideelle gassen komprimeres i kompressoren adiabatisk med en isolert kompressor. Ved å presse sammen den ideelle gassen synker volumet, mens trykket øker. Temperaturen øker fra lav temperatur, T_L , til høy temperatur, T_H . Deretter forlater den ideelle gassen kompressoren overopphetet. Dette er en isentropisk prosess dermed er entropien konstant.

(4) ← (3)

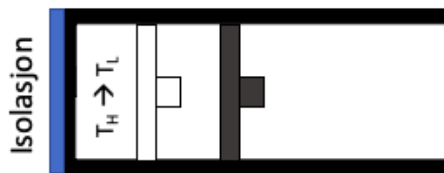


Figur 2.13: Isotermisk kondensasjon i kondensatoren

• **Prosess 3-4 (Reversibel isotermisk kompresjon):**

Den overopphetet gassen går gjennom kondensatoren som avkjøler og avgir varme, Q_{ut} , til den høye temperaturkilden. Det skjer en ideell ekspansjon under konstant temperatur T_H .

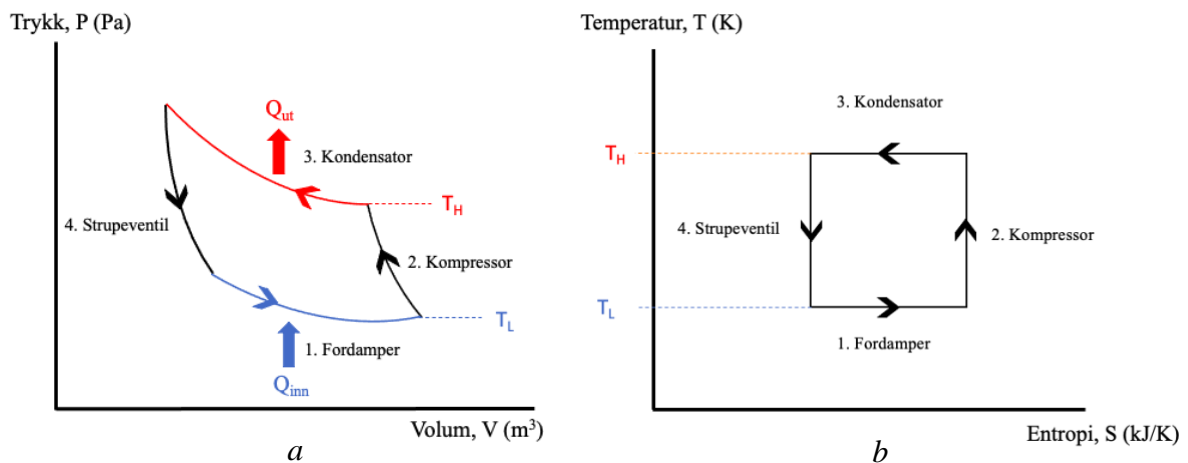
(4) → (1)



Figur 2.14: Adiabatisk ekspansjon i strupeventilen

• **Prosess 4-1 (Reversibel adiabatisk ekspansjon):**

Den ideelle gassen ekspanderer adiabatisk ved å bruke en isolert strupeventil. Volumet øker, trykket avtar og temperaturen synker fra T_H til T_L . Dette er en isentropisk prosess dermed er entropien konstant.

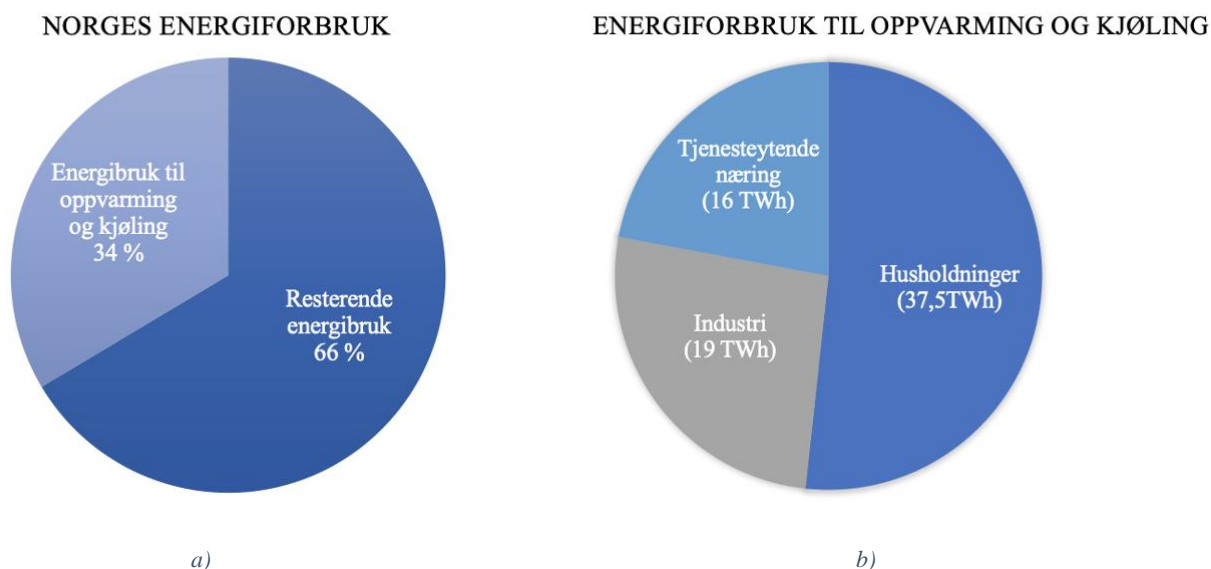


Figur 2.15: Carnot-syklus for varmpumpe a) PV- diagram b) TS-diagram

Figur 2.15 viser Carnot-syklusen til en varmpumpe som går mot klokken. Figur 2.15 a) viser et trykk-volum-(PV)-diagram hvor vi ser hvordan trykket og volumet endres ved de ulike fasene. Figur 2.15 b) viser temperatur-entropi-(TS)-diagram hvor temperatur og entropi endrer seg ved de ulike fasene. Carnot-syklusen for varmpumpe beskriver hvordan en ideell varmeoverføring skjer (Novak 2023). Et mer realistisk PV-diagram for varmpumpe vil bli vist i delkapittel 3.4 Syklusprosessen.

3 Varmepumpe

I Norge var det totale energiforbruket i 2018 på 216 terrawatt-timer (TWh). Oppvarming og kjøling av husholdninger, industri og tjenesteytende næring stod for 72,5 TWh av dette energiforbruket. Dette tilsvarer 34% av det totale energiforbruket (Viak 2020).



Figur 3.1: Sirkeldiagrammene illustrerer energiforbruket brukt til oppvarming og kjøling i Norge. Tall hentet fra (Viak 2020)

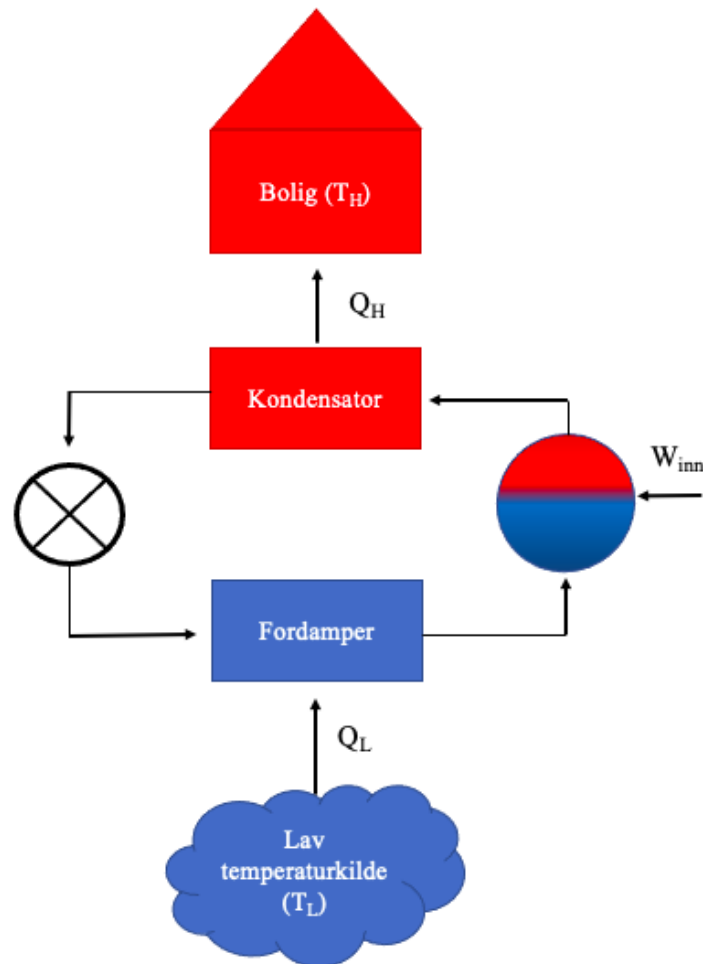
Diagrammet i figur 3.1 a) illustrerer andel av det totale energiforbruket brukt til oppvarming og kjøling. Dette viser at over en tredjedel av energiforbruket i Norge går til oppvarming og kjøling. I diagrammet i figur 3.1 b) vises fordelingen av energibruk til oppvarming og kjøling i de viktigste forbruksgruppene. Vi ser her at av energiforbruket i Norge går over halvparten til oppvarming og kjøling i husholdninger (Viak 2020).

Innenfor oppvarming og kjøling kommer omtrent 67 prosent av energien fra elektrisitet, 12 prosent fra biobrensel, 8 prosent fra fjernvarme og 6 prosent fra oljeprodukter. Elektrisitet er derved den viktigste kilden til oppvarming i Norge (Viak 2020). Generelt sett er varmepumper mer energieffektive enn elektriske oppvarmingssystemer. Dette fordi varmepumper trenger lite elektrisitet og utnytter energien som finnes i jord, berg og luft.

Fra 1 kilowattime (kWh) tilført elektrisitet, leverer en varmepumpe mellom 2-5 kWh varmeenergi (NOVAP 2023). En varmepumpe vil dermed redusere tilført energi med 40-80 prosent i forhold til et oppvarmingssystem basert på elektrisitet, gass, olje, bioenergi eller fjernvarme (NOVAP 2023). I 2018 var det anslått at varmepumper produserte 16 terrawattimer (TWh) varmeenergi, der elektrisitet utgjorde 6 TWh, mens de resterende 10

TWh kommer fra omgivelsesvarme (Viak 2020). I Norge er derfor varmepumper en viktig løsning for å effektivisere oppvarming og kjøling.

3.1 Hva er en varmepumpe?



Figur 3.2: Varmepumpe med komponenter, lavtemperaturkilde og høytemperaturkilde

En varmepumpe er en «maskin som benyttes til å transportere varme fra et lavere til et høyere temperaturnivå under forbruk av mer høyverdig energi, oftest elektrisk kraft» (Bredesen og Lorentzen 2021). I en varmepumpe tilføres energi, W_{inn} , til å utnytte varmen, Q_L , fra en lavtemperaturkilde, T_L , og overføre den som varme, Q_H , til bygningen. Varmeenergien dannet fra varmepumpen, kan beskrives ved termodynamikkens første lov (Cengel, Cimbala og Turner 2012):

$$Q_H = \Delta U + W_{inn} + Q_L \quad (3.1)$$

Varmen som varmepumpen avgir, er tilnærmet lik summen av varmemengden utnyttet fra lavtemperaturkilden (Q_L) og tilført elektrisitet (W_{inn}) for å drifte varmepumpen.

3.2 Effektfaktor (COP_{VP})

Effektfaktoren beskriver ytelsen til en ideell varmepumpe, det vil si forholdet mellom den leverte varmen til varmepumpen og elektrisiteten brukt til å drive varmepumpen. Det er ønskelig å få en høyest mulig verdi for Q_H , uten å måtte tilføre store mengder energi W_{inn} . Dette vil tilsvare en høyest mulig effektfaktor COP_{VP} . (Hofstad, Varmefaktor 2021):

$$COP_{VP} = \frac{\text{Energi ut}}{\text{Energi inn}} = \frac{Q_H}{W_{inn}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} \quad (3.2)$$

Om man antar at prosessen følger en Carnot-syklus kan en videre utlede formelen slik (Cengel, Cimbala og Turner 2012):

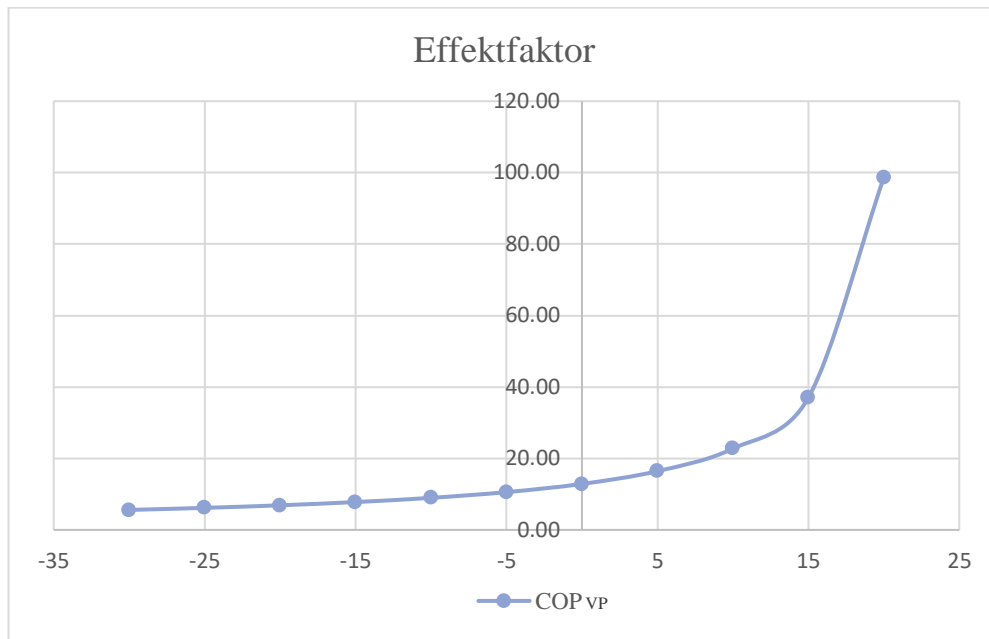
$$COP_{VP} = \frac{\text{Energi ut}}{\text{Energi inn}} = \frac{Q_H}{W_{inn}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad (3.3)$$

Da har en forutsatt at den indre energien i varmepumpen ikke endrer seg og at ingen energi går tapt.

COP_{VP} -verdien avhenger av temperaturen på utekilden og hvilken temperatur varmepumpen skal levere innendørs. COP_{VP} -verdien øker hvis temperaturen på utekilden er høy eller hvis temperaturen som varmepumpen leverer er lav. Dersom COP_{VP} -verdien er tre, leverer varmepumpen tre ganger så mye energi til bygningen som den elektriske energien den benytter til å drive varmepumpen. Vi ser også fra formelen at dersom temperaturforskjellen ($T_H - T_L$) mellom ønsket temperatur inne og temperaturen ute er høy minskes effekten av varmepumpen. De fleste varmepumper har en gjennomsnitts COP_{VP} -verdi på to til tre (Cengel, Cimbala og Turner 2012).

Carnot-syklusen gir den høyeste COP_{VP} -verdien og kan brukes som et mål for å sammenligne virkelige varmepumper med den ideelle varmepumpen. I figur 3.2 ser vi hvor mye utetemperaturen har å si for COP_{VP} -verdien i en ideell varmepumpe. Her antar vi at

innetemperaturen er 23 grader celsius. Hvis utetemperaturen er 20 grader celsius vil den ideelle varmepumpen ha en COP_{VP} -verdi på nesten 100.



Figur 3.3: COP_{VP} -verdien ved ulike utetemperaturer (°C). Innetemperatur er satt til: 23 °C.

3.3 Ulike systemer

Det finnes ulike varmepumpesystemer som baserer seg på forskjellige varmekilder. Dette inkluderer luft-til-luft-varmepumpe, luft-til-vann-varmepumpe og væske-til-vann-varmepumpe. Den mest vanlige varmepumpen i Norge er luft-til-luft-varmepumpen, men ønskes en energibrønn må man investere i en væske-til-vann-varmepumpe.

3.3.1 Luft-til-luft-varmepumpe

Den mest vanlige varmepumpen i Norge er luft-til-luft-varmepumpen. Denne henter ut varmen fra luften utendørs og blåser den inn innendørs. Prisen på en luft-til-luft-varmepumpe varierer med merke, modell og hvor avansert den er. Gode varmepumper koster fra 18 000 til 30 000 kroner. Varmepumpen består av en innedel og en utedel. Inne delen bør plasseres et sted med åpen løsning slik at den varme luften kan spres rundt i bygningen.. Utedelen bør monteres minst en halv meter over bakken og gjerne med et lite tak over som skjermer for regn og vind. Utedelen gir også vibrasjonsstøy så den bør ikke monteres på huset, men heller på et bakkestativ eller festes til grunnmuren (NOVAP 2023).

Effekten av varmepumpen vil avhenge av temperaturen i luften ute. Som vi ser av figur 3.3 minsker effekten av varmepumpen betraktelig når utetemperaturen synker. Siden temperaturen i luften varierer kraftig, bør man ha vedfyring eller elektrisk oppvarming i tillegg (NOVAP 2023). Hovedpoenget med installasjon av luft-til-luft-varmepumpe er å spare både miljøet og strømkostnader. En vanlig husholdning har et strømforbruk på omtrent 25 000 kilowattimer (kWh) i året, og av disse kan man spare rundt 4 800 kWh ved en luft-til-luft-varmepumpe. Hvis man bruker den gjennomsnittlige strømprisen for mars 2023 på 1,41 kr/kWh sparer man derved 6 768 kroner i løpet av året (NorgesEnergi 2023). I løpet av varmepumpens levetid, som normalt er fra 12 til 15 år, vil en spare omtrent 101 520 kroner (Enova 2016).

3.3.2 Luft-til-vann-varmepumpe

En luft-til-vann-varmepumpe utnytter også luften utendørs, men istedenfor for å blåse luft inn i bygningen, brukes varmen til å varme opp vann. Dette vannet kan brukes i radiatorer, som vannbåren gulvvarme eller for å forvarme tappevann. Denne type varmepumpe kan koste mellom 60 000 og 130 000 kroner, avhengig av hvor høy varmeeffekt den har. Varmeeffekt er den varmen som varmepumpen leverer ved en gitt temperatur (NOVAP 2023). I tillegg kommer installasjonen av varmepumpen. En luft-til-vann-varmepumpe består av to deler, en inne og en ute. Inne delen er ofte på størrelse med et høyt kjøleskap, som vises i figur 3.4. Ute delen er lik som i luft-til-luft-varmepumpen og man bør derfor ta samme forholdsregler når man monterer ute delen til varmepumpen (NOVAP 2023).



Figur 3.4: Inne delen til en luft-til-vann-varmepumpe/væske-til-vann-varmepumpe. Hentet fra (CTC 2023)

Luft-til-vann-varmepumpen er også i likhet med luft-til-luft-varmepumpen avhengig av temperaturen til luften utendørs. Er temperaturen i uteluften kald vil dette redusere effekten av

varmepumpen. Man bør derfor også ved denne type varmepumpe har andre alternativer til oppvarming i boligen (NOVAP 2023). Ved en luft-til-vann-varmepumpe kan du spare omtrent 8 800 kWh i året. Bruker man gjennomsnittsprisen til strøm fra mars 2023 på 1,41 kr/kWh sparer man derved 12 408 kroner i løpet av året (NorgesEnergi 2023). En luft-til-vann-varmepumpe har en levetid på mellom 12 til 15 år, og man sparer omtrent 186 000 kroner i løpet av 15 år med luft-til-vann-varmepumpe installert i boligen (Enova 2016).

Luft-til-vann-varmepumpen er også i likhet med luft-til-luft-varmepumpen avhengig av temperaturen til luften utendørs. Er temperaturen i uteluften kald vil dette redusere effekten av varmepumpen. Man bør derfor også ved denne type varmepumpe har andre alternativer til oppvarming i boligen (NOVAP 2023). Ved en luft-til-vann-varmepumpe kan du spare omtrent 8 800 kWh i året. Bruker man gjennomsnittsprisen til strøm fra mars 2023 på 1,41 kr/kWh sparer man derved 12 408 kroner i løpet av året (NorgesEnergi 2023). En luft-til-vann-varmepumpe har en levetid på mellom 12 til 15 år, og man sparer omtrent 186 000 kroner i løpet av 15 år med luft-til-vann-varmepumpe installert i boligen (Enova 2016).

3.3.3 Væske-til-vann-varmepumpe

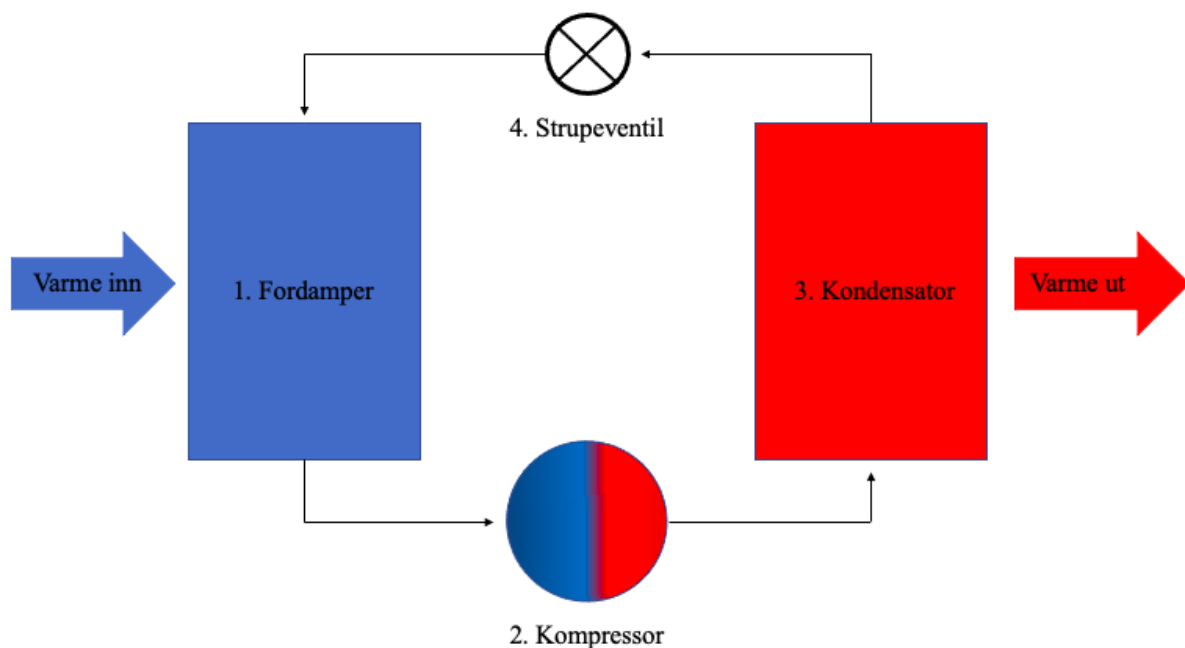
Væske-til-vann-varmepumper bruker energi lagret i fjell, jord eller sjø til å varme opp vann i boligen. Det er denne type varmepumpe man trenger om man ønsker å bore en energibrønn. En væske-til-vann-varmepumpe koster fra 85 000 til 150 000 kroner. I tillegg kommer prisen for installasjon og eventuell boring (Boligsmart 2023). Borekostnader kan man lese mer om i delkapittel 6.5 *Kostnadseffektivitet*. Varmepumpen har kun en del på innsiden av bygningen som er lik som innedelen til luft-til-vann-varmepumpen, som er vist på bilde i figur 3.4 Denne varmepumpen leverer varme til et vannbåret varmeanlegg i bygningen som radiatorer, gulvvarme eller viftekonvektorer. Man er nødt til å ha et vannbåret varmeanlegg i bygningen for at en væske-til-vann-varmepumpe skal fungere. Det betyr at kostnaden for å installere et slikt system er høyere enn for andre alternativer (NOVAP 2023).

Energikildene til en væske-til-vann-varmepumpe er stabile hele året. Dette gir varmepumpen en jevn COP-verdi året rundt. Som vi ser på grafen i figur 3.3 vil en jevn temperatur og en mindre forskjell mellom innetemperaturen og temperaturen til energikilden gi bedre effekt. Dette betyr at man bruker mindre strøm og sparer kostnader for å få den ønskede innetemperaturen. En væske-til-vann-varmepumpe har en levetid på rundt 20 år og de aller fleste kan betale ned denne investeringen i løpet av 8 til 12 år (NOVAP 2023). I løpet av et år

kan man her spare omtrent 11 100 kWh. Bruker man gjennomsnittsprisen på strøm fra mars 2023 som var på 1,41 kr/kWh sparer man derved 15 651 kroner i året (NorgesEnergi 2023). Totalt sparer man på strømforbruk omtrent 313 000 kroner i løpet av levetiden (20 år) til varmepumpen (Enova 2016).

3.4 Syklusprosessen

En varmepumpe består av et system med de fire komponenter kompressor, kondensator, strupeventil og fordamper, se figur 3.5. I systemet sirkulerer det et arbeidsmedium mellom de ulike komponentene.

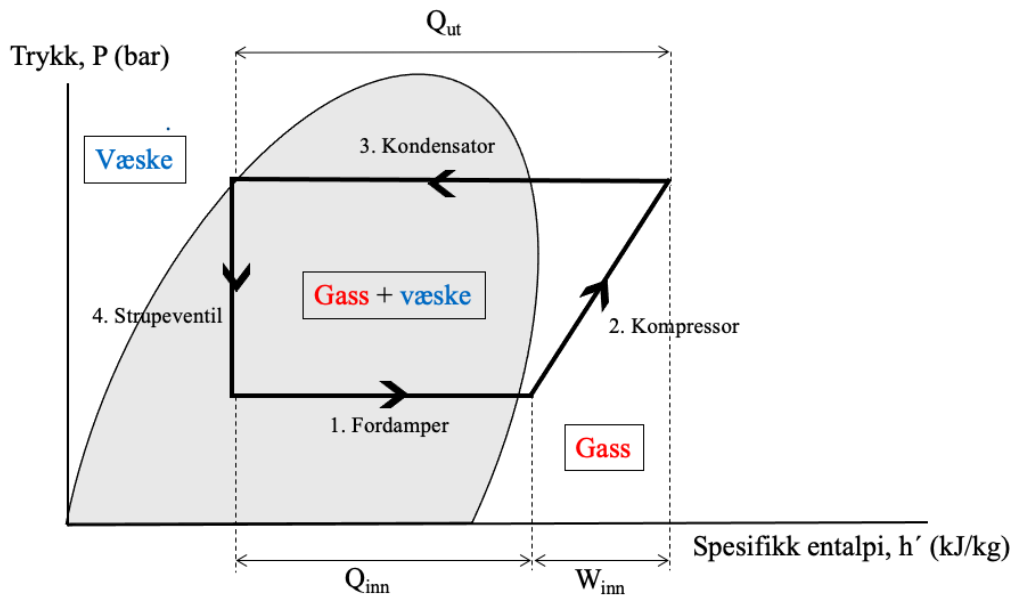


Figur 3.5: Varmepumpe-syklusen

- 1) I fordamperen absorberes varme fra den eksterne kilden og fordamper arbeidsmediet i varmepumpen. I figur 3.6 ser vi hvordan entalpien øker i systemet når varmen, Q_{inn} , hentes fra den eksterne kilden. Arbeidsmediet går fra en blanding av væske og gass til ren gassform.
- 2) Gassen går videre til kompressoren som komprimerer arbeidsmediet ved hjelp av en pumpe. Trykket øker i arbeidsmediet og dermed øker også temperaturen. Vi ser i figur 3.6 at både trykket og entalpien øker når det gjøres et arbeid, W_{inn} , ved at arbeidsmediet komprimeres.
- 3) I kondensatoren utnyttes det at varmeenergi blir frigjort når arbeidsmediet kondenserer og vi får varme, Q_{ut} , fra varmepumpen. Arbeidsmediet kondenseres til væske. Videre går væsken til strupeventilen.

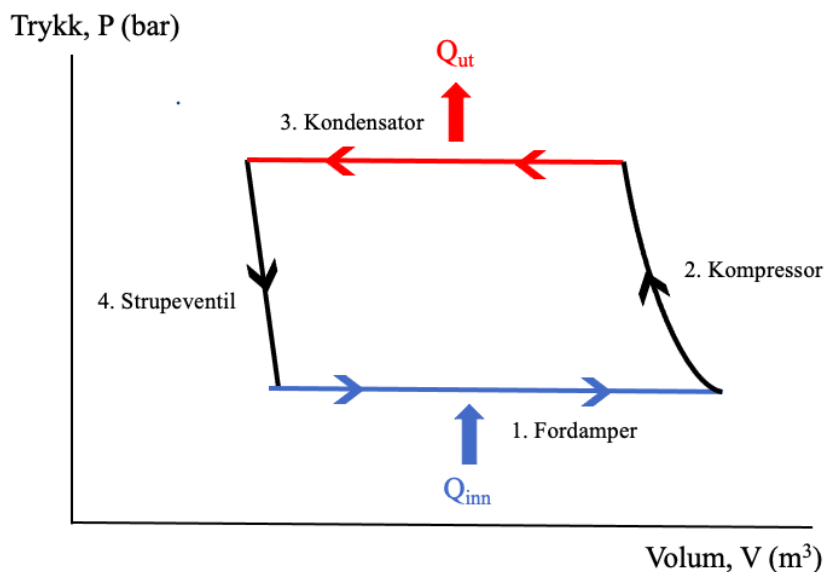
4) I strupeventilen blir trykket og temperaturen senket. Da senkes også kokepunktet og arbeidsmediet blir en blanding av gass og væske.

4-1) Til slutt er arbeidsmediet tilbake til fordampere hvor det igjen fordampes helt til en gass (Hammerstad 2021).



Figur 3.6: Ph' -diagram for varmepumpe

Trykk-entalpi- (Ph')-diagrammet i figur 3.6 viser hvordan trykket og entalpien endres gjennom varmepumpen. Det grå området viser hvor arbeidsmediet forekommer som en blanding av væske og gass (Stene 2012). I motsetning til den ideelle Carnot-syklusen hvor hele prosessen foregår i gassform, vil store deler av den reelle varmepumpeprosessen foregå i to-faseområdet (Assadi og Fadnes 2023).



Figur 3.7: PV -diagram for en varmepumpe

Trykk-volum-(PV)-diagrammet i figur 3.7 viser hvordan volumet og trykket i en reell varmepumpe endres gjennom varmepumpen. I motsetning til i Carnot-syklusen er trykket i den reelle varmepumpen konstant ved kondensering og fordamping (Assadi og Fadnes 2023).

3.5 Inverterstyrt kompressor og av/på-kompressor

Valget mellom inverterstyrt varmepumpe og av/på-varmepumpe påvirker kompressoren i varmepumpen. Begge systemene kan brukes til alle de ulike systemene nevnt tidligere: luft-til-luft-varmepumpe, luft-til-vann-varmepumpe og væske-til-vann-varmepumpe (Helliesen / ABK- Qviller AS 2023).

En invertervarmepumpe har en inverterstyrt kompressor. De fleste varmepumpene som leveres i dag er inverterstyrte (Helliesen / ABK- Qviller AS 2023). Det betyr at kompressoren vil endre farten sin for å tilfredsstille ønsket innetemperatur. Det er utetemperaturen som regulerer kompressorens fart. Når det er kaldt ute vil en invertervarmepumpe gi varme innendørs og når det er varmt ute vil den reverseres og gi en kjøligere innetemperatur. Hvis kompressoren kun bruker akkurat nok strøm som skal til for at varmepumpen leverer den ønskede temperaturen, sparer man både penger og varmepumpen for slitasje (CTC 2017) (SPRSUN 2021).

En av/på varmepumpe bruker en fast mengde energi og skrus seg av når inneluften når ønsket temperatur. Dette fører til at varmepumpen stadig skrur av og på, som resulterer i et høyere energiforbruk. Kompressoren er dessuten en slitedel i varmepumpen, og det kan være lurt å begrense antall ganger den skrur av og på (CTC 2017) (SPRSUN 2021). Kostnaden til en av/på varmepumpe er mindre enn kostanden til en invertervarmepumpe, og det kan derfor være egnet med en av/på varmepumpe på steder man ikke bruker den like ofte, for eksempel i en fritidsbolig.

3.6 Arbeidsmedium

Arbeidsmediet sirkulerer mellom komponentene og er viktig for ytelsen til varmepumpen. Valget av arbeidsmedium er basert på flere faktorer, blant annet sikkerhet, miljøpåvirkninger, termiske egenskaper, temperaturområder og plassering av varmepumpen. De ønskelige termiske egenskapene er at arbeidsmediet skal ha høy latent varme for fordampning, høy termisk ledningsevne, lav viskositet og lavt kokepunkt. Det er en fordel at arbeidsmediet har

lavt kokepunkt fordi det da er behov for mindre energi til fordampning. For eksempel har et av de vanligste arbeidsmediene, R-410a, kokepunkt ved -51,4 grader celsius, noe som gjør det veldig enkelt å fordampe fra væske til gass. De sikkerhetsmessige faktorene innebærer brennbarhet og toksisitet. Miljøpåvirkning er også en viktig faktor når man velger arbeidsmedium (NOVAP 2018) (Chiasson 2016).

De første varmpumpene som ble produsert benyttet naturlige stoffer som ammoniakk, karbondioksid og hydrokarboner som arbeidsmedium. På 30-tallet begynte man å bruke klorfluorkarboner (KFK) og senere hydroklorfluorkarboner (HKFK). Dette er syntetiske gasser som verken er brennbare eller giftige. Problemet med disse gassene er at de reagerer med oksygenet i ozonlaget og bryter ned ozonlaget. Da det i 1985 ble oppdaget et hull i ozonlaget, ble det laget en miljøavtale, Montreal-protokollen, som forpliktet hele verden til å gradvis redusere utslippene som ødela ozonlaget (FN-sambandet 2020) (Hammerstrøm 2018). Både KFK- og HKFK- gasser er i dag forbudt i Norge (NOVAP 2018).

De gassene som i stor grad overtok etter KFK- og HKFK-gassene er hydrofluorkarboner (HFK), som er menneskeskapte fluorforbindelser. HFK-gasser bidrar også til å øke drivhuseffekten og man må derfor være sertifisert for å montere varmpumper med HFK-gasser i dag (Lenes 2016). Det vanligste kuldemediet i varmpumpen i dag er HFK-gassen R410a. Slippes det ut et kilogram R410a tilsvarer det et utslipp på 1,73 tonn av karbondioksid (NOVAP 2018).

De gassene som i stor grad overtok etter KFK- og HKFK-gassene er hydrofluorkarboner (HFK), som er menneskeskapte fluorforbindelser. HFK-gasser bidrar også til å øke drivhuseffekten og man må derfor være sertifisert for å montere varmpumper med HFK-gasser i dag (Lenes 2016). Det vanligste kuldemediet i varmpumpen i dag er HFK-gassen R410a. Slippes det ut et kilogram R410a tilsvarer det et utslipp på 1,73 tonn av karbondioksid (NOVAP 2018).

Arbeidsmedium	Familie	GWP	Kokepunkt [°C]
R-410a	HFK - mix	2100	-51,4
R-32	HFK	675	-51,6
R-290 (propan)	Naturlig	20	-42,1
R-717 (ammoniakk)	Naturlig	<1	-33,0
R-744 (karbondioksid)	Naturlig	1	-57,0

Tabell 3.1: Oversikt egenskapene til de ulike arbeidsmediene. Info om familie og GWP hentet fra (Chiasson 2016). Kokepunkt hentet fra: R-410a (Linde 2014), R-32 (Linde 2013), R-290 (Linde 2013), R-717 (Linde 2013), R-744 (Linde 2013).

For å måle oppvarmingseffekten de ulike drivhusgassene har på atmosfæren, kan vi bruke globale oppvarmingseffektverdier (engelsk forkortet: GWP). GWP-verdien angir samlet oppvarmingseffekt sammenlignet med effekten av karbondioksid over en viss tidsperiode (Toldnæs 2022). De fleste nye varmepumper har i dag HFK-gassen R32 som arbeidsmedium. Som vi ser i tabell 3.1 har R32 en GWP-verdi på 675, som er omtrent en tredjedel så mye som R-410a (Nylund 2023). De naturlige arbeidsmediene har mye lavere GWP-verdier enn både R-410a og R-32. Derfor er interessen stor for å igjen bruke naturlige stoffer som arbeidsmedium i varmepumpen.

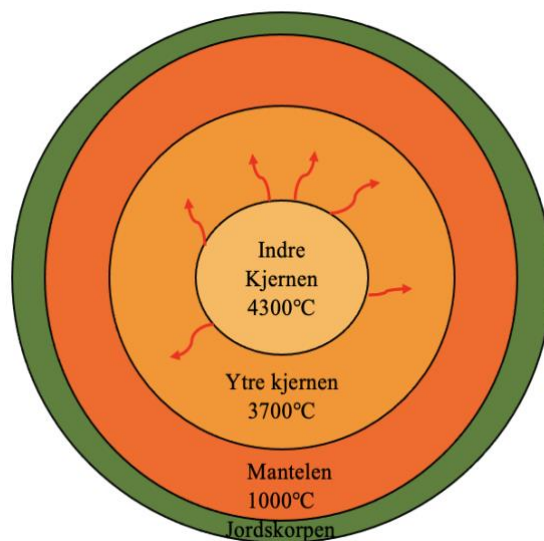
CO₂ er et lovende arbeidsmedium i varmepumpen, da det har lav GWP-verdi og ikke er eksplosivt eller giftig. Kokepunktet til CO₂ er også egnet som en ser i tabell 3.1. I en CO₂ – varmepumpe foregår det en transkritisk prosess, som betyr at arbeidsmediet har tilstander både over og under kritisk punkt. Varmeopptaket skjer ved et underkritisk trykk og varmeavgivelse skjer ved overkritisk trykk. I en CO₂ – varmepumpe har man ikke en kondensator, men en gasskjøler. Varmeavgivelsen skjer ved avkjøling av gassen, istedenfor ved kondensasjon som i en tradisjonell varmepumpe. Denne type varmepumpe fungerer spesielt bra for oppvarming av vann, som kan brukes i radiatorer, som varmtvann og lignende (Stene, Andresen og Stang 2004) (Wang, et al. 2022).

4 Geotermisk energi og geologi

Geologi og fluiddynamikk er to begrep som henger tett sammen når det kommer til utvinning av geotermisk energi. Geologiske, termiske- og hydrauliske faktorer vil påvirke effekten av en energibrønn.

4.1 Dyp geotermisk energi

Dyp geotermisk energi er energi lagret i jordens indre, som vil si dypere enn 300 meter ned i jordskorpen (Stensrud 2019). Denne energien tilsvarer rundt 35 milliarder ganger verdens årlige energiforbruk (H. Fossen 2023). Temperaturen i jordskorpen øker med dybden. Deler av geotermisk varme stammer fra jordens opprinnelse. Denne besto av en gass- og støvsky som kolliderte med meteoritter og trakk seg sammen mot jordens sentrum på grunn av tyngdekraften. Den kinetiske energien fra kollisjonene ble omformet til varmeenergi som ble lagret i jordens indre. Med økende mengder kollisjoner, økte varmeenergien (Stensrud 2019). (Tanum 2019)



Figur 4.1: Tverrsnittet til jordens indre

Energioverføringen i form av konveksjon og varmeledning har resultert i konstant spredning av den indre varmen fra jordkjernen, gjennom mantelen og opp til jordskorpen (Stensrud 2019) (Tanum 2019). Konveksjonen skyldes blant annet radioaktivitet i den indre kjernen, som vi ser i figur 4.1. Radioaktivitet er en kontinuerlig prosess som skjer i kjernen. De radioaktive elementene slik som uran, kalium, rubidium brytes ned og omdannes til nye elementer. I denne nedbrytningsprosessen frigis energi i form av varme. Varmen fra kjernen

stråler kontinuerlig utover og varmer opp bergarter, vann, gass og annet geologisk materiale (Turgeon og Morse 2022) (Tanum 2019).

4.2 Grunnvarme

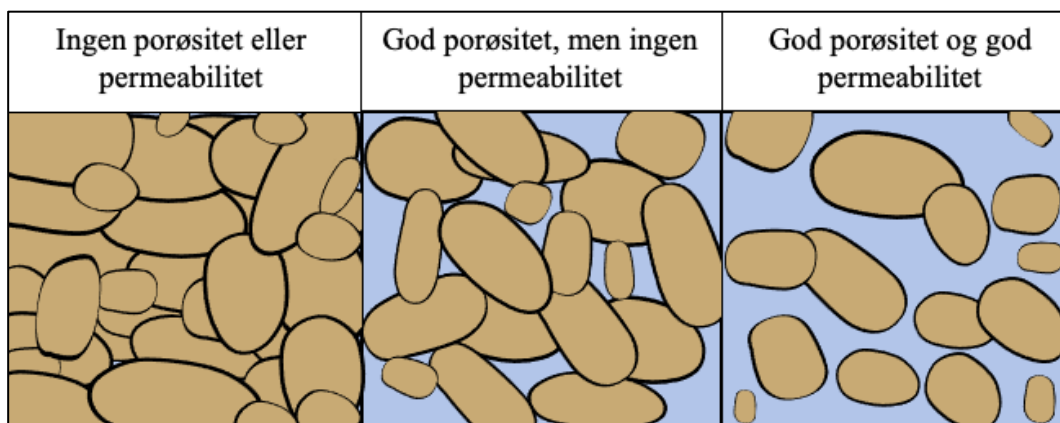
Grunnvarme er i hovedsak absorbert solenergi som er lagret i grunnen, med et lite varmebidrag fra jordens indre. Grunnvarme finner vi ned til 300 meter under overflaten (Stensrud 2019). I de øverste 10-20 meterne av grunnen varierer temperaturen gjennom året. Dypere ned stabiliserer temperaturen seg og holdes jevn held året (Hofstad, grunnvarme 2019). Den stabile temperaturen i de dypere lagene i grunnen gir gode driftsbetingelser for en varmpumpe.

Berggrunnens varmeledningsevne, grunnvannstemperatur og grunnvannsstrømninger er faktorer som bestemmer grunnvarmepotensialet i berggrunnen, som igjen påvirker energipotensialet til energibrønnen (Midttømme, Hilmo og Kalskin 2000).

4.3 Porøsitet og permeabilitet

Porøsitet er et mål for hvor mange prosent hulrommene utgjør i en bergart. De fleste bergarter inneholder hulrom, men porøsiteten varierer i stor grad (Bryhni, porøsitet 2020). Bergarter er bygd opp av krystalliserte mineraler og det er størrelsen og formen på disse mineralene som avgjør porøsiteten til en bergart (Department of Energy, Environment and Climate Action 2021). Porøsiteten avtar desto dypere bergartene er begravd.

Permeabilitet er et uttrykk for hvor lett en bergart gjennomstrømmes av en væske eller gass. Permeabiliteten avhenger av sprekkdannelser og porøsiteten til bergarten. Hvordan en væske eller gass beveger seg i bergarten er avhengig av både porøsiteten og permeabiliteten til bergarten (H. Fossen 2020).



Figur 4.2: Porøsitet og permeabilitet.

4.4 Varmedningsevne i bergarter

Når det skal designes et grunnvarmesystem er det viktig å ta hensyn til varmedningsevnen til bergartene i brønnområdet. Ved god varmedningsevne i berggrunnen, vil mye varme bli transportert mot energibrønnen (Midttømme, Hilmo og Kalskin 2000).

Bergarter	Porøsitet [%]	Varmedningsevne min-maks [W/ (K · m)]
Sedimentær		
Sandstein	5-30	2,30-6,50
Kalkstein	0-20	1,50- 3,30
Leirskifer	0-10	1,50-3,50
Magmatisk og metamorf		
Frakturert magmatisk og metamorf bergart	0-10	2,50-6,60
Ufrakturert magmatisk og metamorf bergart	0-5	2,50-6,60

Tabell 4.1: Viser porøsiteten og varmedningsevnen ved ulike sedimentære, magmatiske og metamorfe bergarter. Verdier hentet fra (Gehlin og Hellström 2002).

Tabell 4.1 viser porøsiteten og varmedningsevnen ved ulike sedimentære, magmatiske og metamorfe bergarter (Gehlin og Hellström 2002).

Varmedningsevnen blir påvirket av flere faktorer slik som mineralsammensetningen til bergartene, porøsitet og egenskaper til de porefyllende væskene. Mengden varmeoverføring

og energiytelsen til hele systemet er sterkt påvirket av varmeledningsevnen til grunnen rundt kollektoren (Santa, et al. 2020). Det mest ideelle er å ha bergarter med høy varmeledningsevne, slik at bergarten kan lede mer varme til arbeidsmediet i kollektorslangene. Ved å finne mineralsammensetningen, kornstørrelsen og teksturen til bergarten vil vi kunne avgjøre hvor raskt varme overføres gjennom bergarten (Balkan, Erkan og Salk 2017).

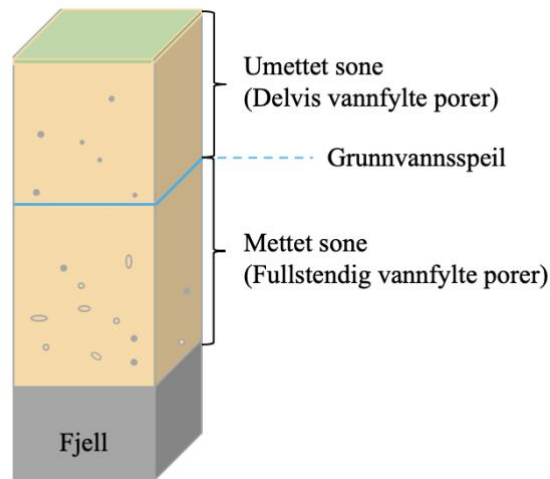
De beste geologiske lederne av varme er bergarter med lav porøsitet og en tett krystallstruktur med høyt kvartsinnhold, slik som granitt. Ren kvarts kan ha en varmeledningsevne på mer enn $6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (NGU 2020). En bergart med høyt kvartsinnhold vil dermed gi høy varmeledningsevne. Porøse bergarter hvor porene er mettet med vann har lavere varmeledningsevne. Det vil si at varmeledningsevnen synker med økende porøsitet, fordi mineraler er bedre varmeledere enn porefyllings materialer slik som luft og vann (Balkan, Erkan og Salk 2017). De dårligste lederne av varme er tørre, porøse sedimenter som for eksempel tørr sand (Banks 2012).

Selv om bergarten har høy eller lav varmeledningsevne er det uansett viktig å være nøye når det skal finnes riktig verdi for varmeledningsevnen. Hvis en feilaktig estimerer varmeledningsevnen kan det føre til et ukorrekt design av borefeltet, som videre påvirker installasjonen, ytelsen og driftskostnadene til grunnvarmesystemet. Hvis for eksempel en overestimerer varmeledningsevnen, vil den kalkulererte dybden til kollektoren bli lavere enn nødvendig, som igjen vil resultere i lavere varmeoverføring enn ønsket (Santa, et al. 2020). Dette kalles en underdimensjonert brønn og vil bli utdypet i delkapittel *6.1.2 Feil dimensjonering*.

4.5 Grunnvann

Grunnvannets overflate kaller vi grunnvannsspeilet. På denne overflaten er grunnvannstrykket og lufttrykket er like stort. Når grunnvann er fanget i et vannførende lag mellom to ugjennomtrengelige lag kaller vi dette artesisk grunnvann. Dette grunnvannet har høyt trykk, og kan derfor strømme opp til overflaten når det finner en vei gjennom de overliggende lagene eller det bores en brønn ned til vannet (Bryhni, artesisk brønn 2018). Under grunnvannsspeilet har vi mettet sone, og her vil vi kun finne grunnvann i sprekker og hulrom i bergarten (Bryhni, porøsitet 2020). Over grunnvannsspeilet har vi umettet sone som er kun

delvis oppfylt med vann. Vi kaller dette vannet markvann (Tollan 2023). Grunnvann finnes nesten over alt i verden, men hvor langt ned det er til grunnvannsspeilet varierer (Tollan 2023).



Figur 4.3.: Berggrunnen inndelt i umettet sone, grunnvannsspeil og mettet sone.

For å kunne vurdere berggrunnens potensiale for konstruksjonen av en energibrønn, er det nødvendig å forstå hvordan grunnvannstrømningen er i berggrunnen. En geologisk formasjon i grunnen hvor bergarter eller sedimenter har høyt grunnvannsinhold kalles akvifer (Hofstad og Bakken, akvifer 2019). Grunnvannsstrømningen varierer generelt med permeabiliteten til bergarten og grunnvannsspeilets helning. Grunnvannet vil på grunn av gravitasjon strømme fra steder med høyt trykk til steder med lavt trykk (NGU 2023). Økt grunnvannstrømning fører til økt konveksjon som gir høyere effektiv varmeledningsevne for brønnen. Grunnvannstrømning vil sikre at nytt temperert vann varmer opp brønnen slik at man kan hente ut mer varme uten at temperaturen i brønnen faller (Brekke 2003).

4.6 Fluidodynamikk

Fluidodynamikk handler om bevegelsen av væsker og gasser, og kan hjelpe oss å forstå hvordan fluider oppfører seg under forskjellige forhold. Dette kan være nyttig om man skal designe systemer og maskiner som benytter væsker og gasser.

4.6.1 Viskositet

Viskositet er et mål på fluidets motstand mot bevegelse (Helseth, viskositet 2021).

Viskositeten er motstand mot å endre form, forårsaket av intern friksjon og krefter mellom molekylene i stoffet. Væsker og gasser med liten viskositet flyter lettere enn de med høy viskositet (Aarnes, Dynamisk viskositet 2022).

Dynamisk viskositet er et mål på en fluids motstand mot bevegelse, som ikke er korrigert for fluidets massetetthet. Vi kan utlede formelen for dynamisk viskositet ved *Newtons viskositetslov*:

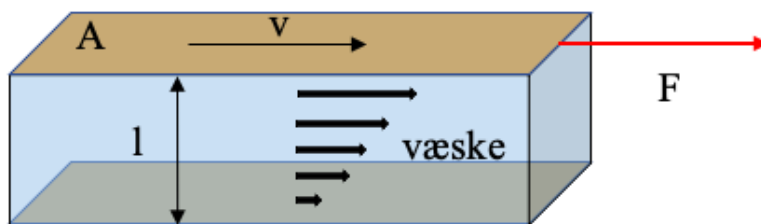
$$\tau = \eta_D \cdot r \quad (4.1)$$

Hvor

η_D = Dynamisk viskositet [kg/(m·s)]

τ = Skjærspenningen [N/m²]

r = Hastighetsgradienten [1/s]



Figur 4.4: Dynamisk viskositet

I *Newtons viskositetslov* er proporsjonalitetskonstanten den dynamiske viskositeten, η_D . I figur 4.4 blir den øvre platen trykket med en kraft, F , og platen har en hastighet, v . I bunn har vi en stasjonær plate. Væskens fart er proporsjonal med avstanden fra den stasjonære platen. Den dynamiske viskositeten kan da uttrykkes som (Gettis, Keller og Skove 1989) (Helseth, viskositet 2021):

$$\eta_D = \frac{\tau}{r} = \frac{F}{A} \cdot \frac{l}{v} \quad (4.2)$$

hvor

F = Totale krefter i strømmingen [N]

A = Arealet strømminger beveger seg på [m²]

l = Avstand mellom platene [m]

v = Farten på strømmingen [m/s]

Kinematisk viskositet, η_k , er forholdet mellom dynamisk viskositet og massetettheten, ρ , av stoffet (Helseth, viskositet 2021):

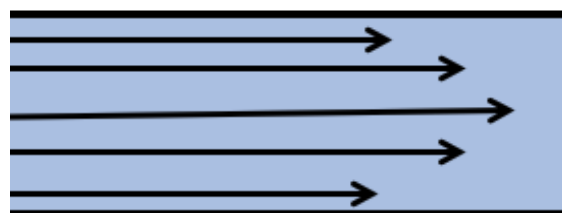
$$\eta_k = \frac{\eta_D}{\rho} \quad (4.3)$$

Om man ønsker en formel som er korrigert for massetetthet bruker man kinematisk viskositet. Enheten til kinematisk viskositet er m^2/s (Helseth, viskositet 2021).

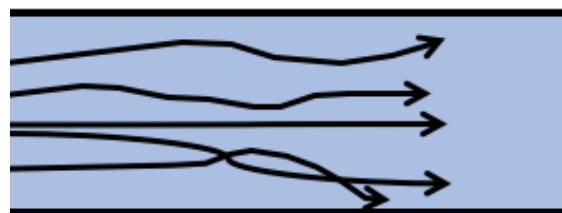
Viskositeten varierer med temperaturen. I væsker minker viskositeten når temperaturen øker. Dette er fordi molekyllene i en væske sitter tett og må presse seg forbi hverandre for å bevege seg. Øker man temperaturen beveger molekyllene seg mer og hindrer mindre for bevegelse. Dette fører til at viskositeten minker. I gasser derimot, øker viskositeten når temperaturen øker. Dette fordi når temperaturen øker i en gass kolliderer molekyllene mer og hindrer bevegelse, som igjen øker viskositeten (Helseth, viskositet 2021).

4.6.2 Strømning

Strømning til en væske eller gass kan beskrives som turbulent eller laminær strømning. Ved turbulent strømning beveger væske- eller gasspartiklene seg i uordnede bevegelser som fører til at mer energi transporteres til grenseflaten væsken beveger seg over. Turbulent strømning krever mer energi for å sirkuleres, men gir også bedre varmeoverføring (Mathisen 2018). Ved laminær strømning beveger væske- eller gasspartiklene seg i en rett strømlinje langs grenseflaten.



Laminær strømning, $Re < 2000$



Turbulent strømning, $Re > 2000$

Figur 4.5: Reynoldstall ved laminær og turbulent strømning.

Overgangen mellom laminær og turbulent strømming skjer ved en verdi av Reynolds tallet.

Formelen for Reynolds tall (Helseth, Reynolds' tall 2022):

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta_D} \quad (4.4)$$

Hvor

ρ = Massetetthet til væsken [kg/m³]

η_D = Dynamisk viskositet [kg/(m·s)]

D = Rørdiameter [m]

v = Gjennomsnittsfart [m/s]

Når Reynolds tall er mindre enn 2000 er strømmingen laminær, mens verdier over 2000 ofte betyr at strømmingen er turbulent. Dette trenger ikke gjelde i alle tilfeller, da man kan ha laminær strømming ved høyere Reynolds tall om man klarer å holde forstyrrelser i væskestrømmen så lave som mulig (Helseth, turbulens 2022).

4.7 Termisk motstand

Termisk motstand er et mål på hvor vanskelig det er for varme og flytte seg gjennom et material. Effekten til en energibrønn er sterkt påvirket av den termiske motstanden. Siden det ønskes effektiv varmeoverføring mellom kollektorvæsken og berggrunnen, er det gunstig med lav termisk motstand. Energibrønnens totale termiske motstand kan defineres slik (Acuña 2010):

$$R_T = R_{berggrunn} + R_b \quad (4.5)$$

Hvor

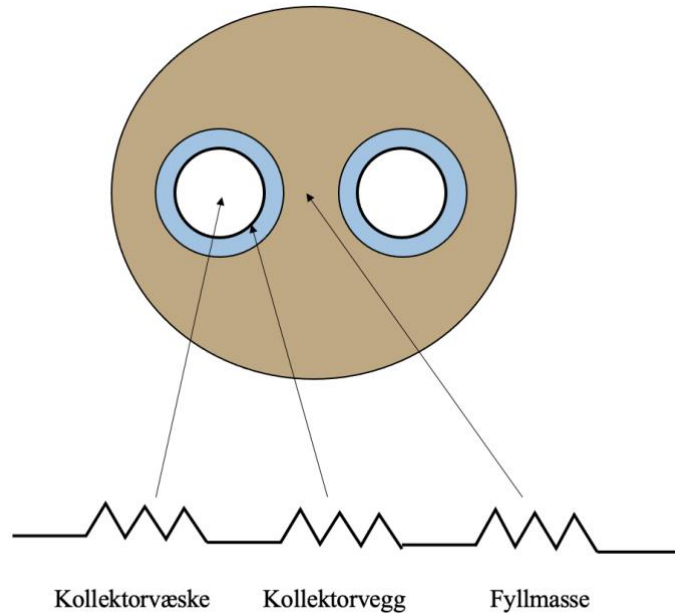
R_T = Energibrønnens totale termiske motstand [Km/W]

$R_{berggrunn}$ = Termisk motstand i berggrunnen [Km/W]

R_b = Termisk motstand i borehullet [Km/W]

Ved varmeoverføring mellom berggrunnen og kollektoren vil det skapes et temperaturlapp grunnnet termisk motstand i boreinstallasjoner. Rørmateriale, fyllingsmateriale i brønnen og

strømningsforhold i kollektorslangen er faktorer som påvirker den termiske motstanden i borehullet (Brekke og Midttømme 2002). Figur 4.6 viser varmeoverføringen gjennom de tre termiske motstandene mellom borehullsveggen og kollektorvæsken i en u-rør kollektor. Hver termisk motstand indikerer et temperaturfall (Acuña 2010).



Figur 4.6: Borehullsmotstanden i en u-rør kollektor

Formelen for den termiske motstanden i borehullet kan formuleres slik (Acuña og Palm 2010):

$$R_b = \frac{T_f - T_{berggrunn}}{\dot{q}} \quad (4.6)$$

Hvor

\dot{q} = Varmehastighet over en gitt borelengde [W/m]

T_f = Gjennomsnittstemperaturen til kollektorvæsken mellom opp-og ned strømning [K]

$T_{berggrunn}$ = Temperaturen til borehullsveggen ved gitt dybde [K]

Formel 4.6 viser at lav temperaturforskjell mellom gjennomsnittstemperaturen til kollektorvæsken (T_f) og temperaturen til borehullsveggen (T_w) gir lav termisk motstand (R_b).

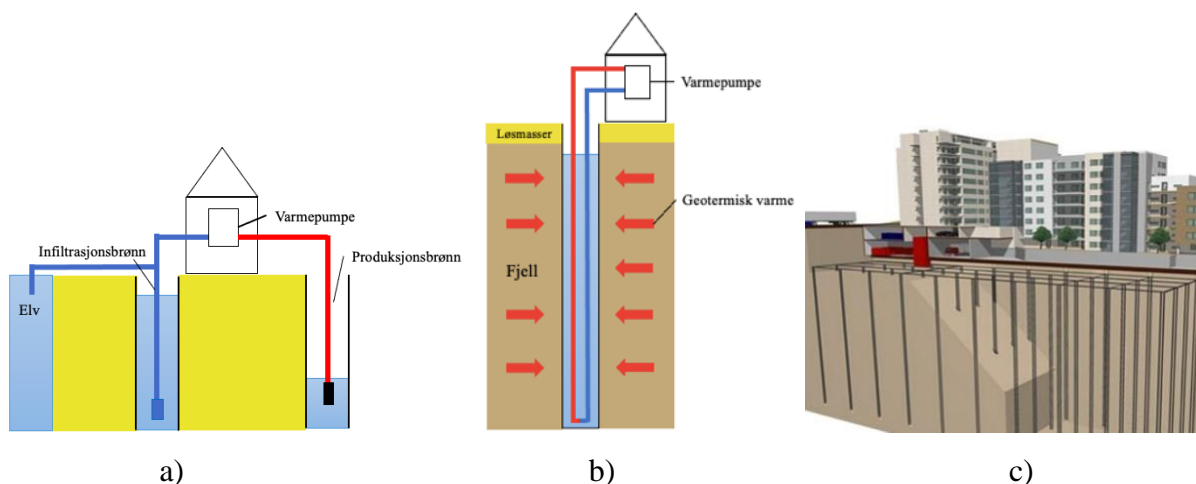
For å finne de termiske egenskapene til en energibrønn kan det brukes en termisk responstest.

5 Energibrønn

Energibrønner er en innovativ og miljøvennlig teknologi som brukes til å utvinne grunnvarme fra jorden. En kan utnytte energibrønner ved hjelp av ulike systemer, som inkluderer åpent system, lukket system og brønnparker. I energibrønner installeres det enten en u-rørkollektor eller en koaksial kollektor. Ved lukkede systemer strømmet det kollektorvæske i kollektoren som spiller en viktig rolle for funksjonaliteten til energibrønner. Valg av boremetode og selve boreprosessen utgjør også en vesentlig del av montering av energibrønner.

5.1 Ulike systemer

For å kunne utnytte grunnvarmen har man behov for et system for å absorbere varmen og overføre den til et varmfordelingssystem (Krogstad, et al. 2002). Det er hovedsakelig tre ulike systemer som brukes til å fange opp varmen. Disse er åpent system, lukket system og brønnparker.

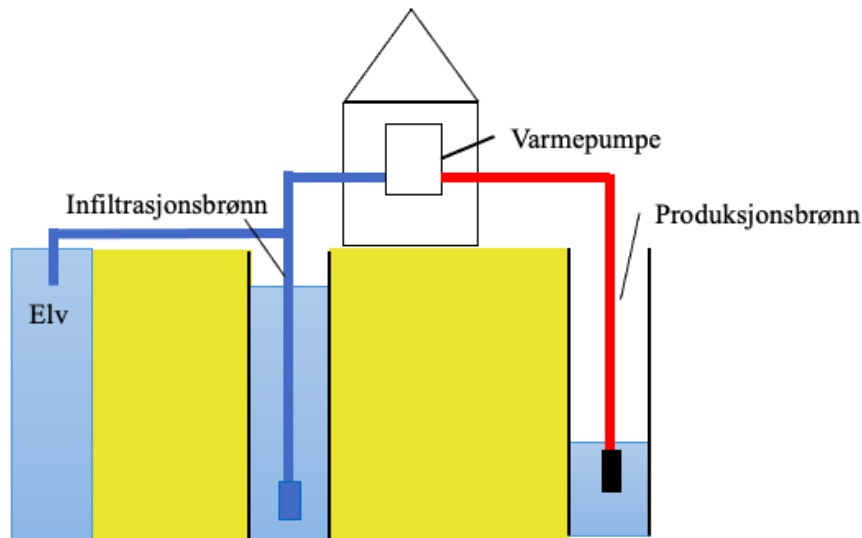


Figur 5.1: Ulike systemer. a) Åpent system, b) Lukket system, c) Brønnpark

5.1.1 Åpne systemer

I åpne systemer utnyttes varmen direkte fra grunnvannet ved hjelp av en varmepumpe. Åpne systemer bruker grunnvann fra kilder, borede brønner eller oversvømte gruver (Banks 2012). Når vi bruker varmepumpen til oppvarming, vil grunnvannet pumpes opp fra produksjonsbrønner og komme i kontakt med fordampere via en varmeveksler. Slik vi ser i figur 5.2. Grunnvannet vil da gå inn i varmeveksleren med høyere temperatur og komme ut med en lavere temperatur. Grunnvannet med lavere temperatur reinjiseres i en annen brønn eller slippes ut i en elv eller andre vannkilder.

Grunnvannet har stabil temperatur gjennom hele året. Dette gir høy effektivitet for varmepumpen. Varmen i grunnvannet kommer hovedsakelig fra solenergi, men også fra spaltning av radioaktive elementer i grunnen. Det åpne systemet kan også produsere kjøling ved å hente kulde fra grunnvannet, og kan derfor være egnet til både vinter- og sommerbruk. Man kan også se på dette som at en transporterer varme fra overflaten ned i grunnen. På denne måten kan en lade opp energibrønnen på sommerstid (NGU 2023).



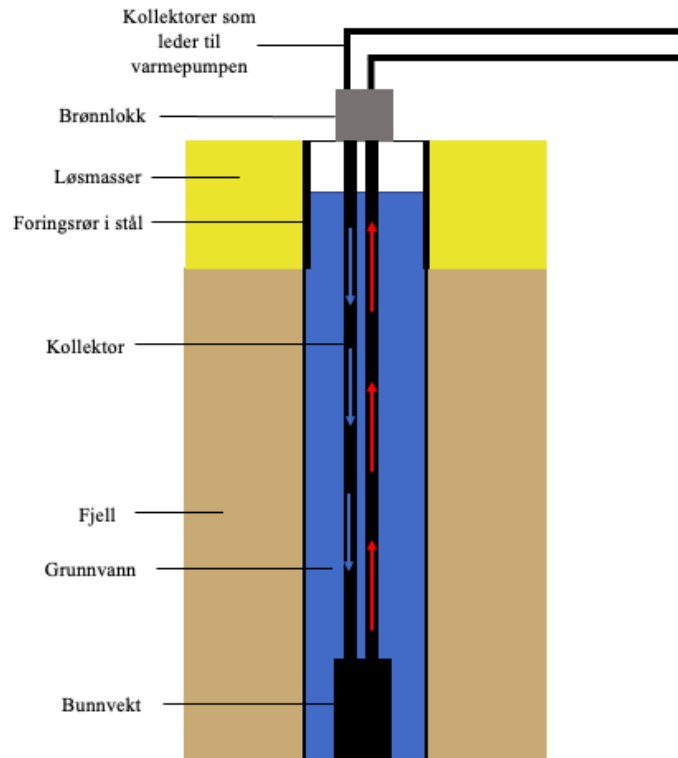
Figur 5.2: Åpent system

Utnyttelse av grunnvann er best egnet i sand- og grusavsetninger og hvor temperaturen i vannet er over 3-4 grader. Systemet produserer og infiltrerer grunnvann, derfor er det viktig at grunnvannet har god kvalitet slik at man ikke tetter brønnfilteret. Brønnfilteret er installert i brønnen for å holde unna smuss og partikler fra brønnen. Det kan også oppstå problemer hvis jern- og mangan felles ut og tetter filteret eller ledninger i systemet. På grunn av investeringer og forundersøkelser som må bli gjort passer åpne systemer best for middels store bygninger (NGU 2023).

5.1.2 Lukkede systemer

Lukkede systemer er den vanligste type energibrønn i Norge og er også kalt bergvarmepumpe. Lukkede systemer henter grunnvarme ved hjelp av kollektorer plassert i et borehull. Kollektorer er plastslanger fylt med kollektorvæske. Kollektorvæsken, som ofte består av vann og etanol, sirkuleres i en lukket krets. For å få overført varmen fra grunnen til kollektorene må det være vann i brønnen. Energibrønnen er derfor ikke effektiv før man når ned til grunnvannet. Dersom det ikke er vann i brønnen, kan det brukes fyllmasse. Fyllmasse

er en tett masse som kan brukes til å fylle en tørr brønn og er mer brukt på steder med stor risiko for å forurense grunnvannet. Fyllmasse vil bli utdyp senere i delkapittel 5.4.7 *Fyllmasse*. Det brukes en varmepumpe for å utnytte varmen i grunnen til oppvarming av bygninger og vann (NGU 2023).



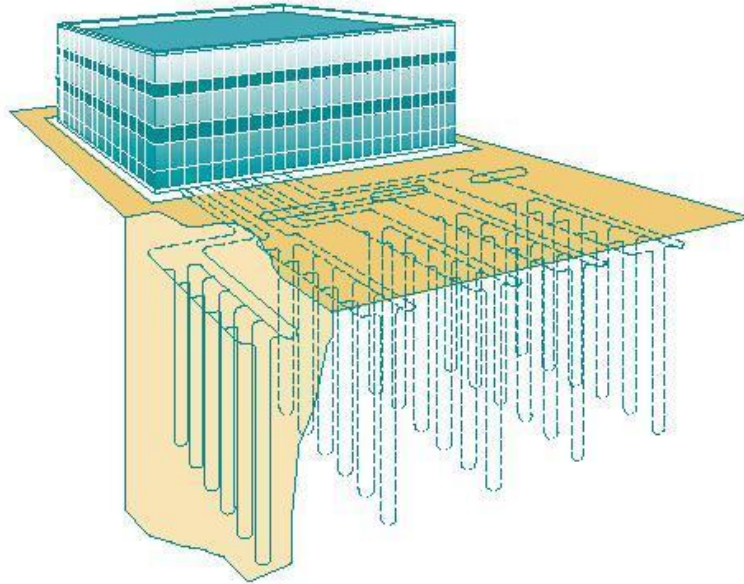
Figur 5.3: Komponentene i et lukket system

En energibrønn med lukket system er bygd opp slik man ser i figur 5.3. En typisk energibrønn har en diameter mellom 140-160 millimeter og en dybde mellom 80 til 200 meter. Ved boring i løsmasser er man nødt til å sette ned et foringsrør i stål for å stabilisere massene (NGU 2023). I brønnen settes kollektoren, som vanligvis har en diameter mellom 40 og 50 millimeter. På toppen av brønnen settes et brønnlokk mellom foringsrøret og kollektoren (Helliesen / ABK- Qviller AS 2023).

5.1.3 Brønnparker

Ønsker man å varme opp flere og større bygninger, som boligkomplekser, skoler eller industribygninger kan man sette opp en brønnpark. En brønnpark består av flere energibrønner med lukket system, samlet på et sted. Ved etablering av store brønnparker kan bruk av termisk responstest anbefales, da kan man måle fjellvolumets evne til å transportere

energi. Slik kan man beregne antall energibrønner som er nødvendig i brønnparken for å dekke over varme- og kjølebehovet (NGU 2023). Termisk responstest utdypes senere i delkapittel 5.4.3 *Termisk responstest*.



Figur 5.4: Brønnpark. Hentet fra (Earth Energy Designer 2023)

Ved bygging av brønnparker må man ta hensyn til hva brønnene skal brukes til. Skal brønnen kun gi varme trenger hver brønn et større overflateareal. Brønnene må plasseres på enkeltstående rekker og med minimum 15 meters avstand (Ramstad 2017). Ønsker man derimot å bygge en brønnpark som skal gi både varme og kjøling, kan man bygge dem tettere. Dette fordi når man kjøler bygningen henter man varme fra bygningen, fører den ned i brønnene og dermed «lader» opp brønnen. Da kan brønnene bygges i et rutemønster med omtrent 6 til 8 meter mellom hver brønn. En brønnpark som brukes til både varme og kjøling har et høyere energiuttak per år og gir et mer stabilt varmeuttak (Ramstad 2017).

5.2 Kollektortyper

Ved installasjon av energibrønnen må man ta hensyn til oppdriftskreftene som vil oppstå når man senker kollektorene ned i vannet. Når man installerer kollektoren i brønnen, vil kreftene prøve å dytte kollektoren opp igjen. Dette skyldes at kollektoren med kollektorvæsken har mindre egenvekt enn vann. Ved hjelp av utregninger og simulasjon må man hekte et lodd på enden av kollektoren som hjelper til å motvirke oppdriftskraften og holder kollektoren nede i vannet (Helseth, oppdrift 2024).



Figur 5.5: Enden av en u-rør kollektor hvor bunnloddet henges. Bilde tatt hos Seabrokers Fundamentering AS

I energibrønner brukes det et kollektorsystem, hvor kollektorvæsken transporterer varme fra varmekilden til varmepumpens fordamper. Det finnes ulike typer kollektorer i lukkede system. Kollektoren fungerer som en varmeveksler mellom kollektorvæsken og berggrunnen rundt brønnen. Ved montering av energibrønnen kobles det til et bunnlodd til kollektoren for å unngå oppdrift.

Dermed kan kollektoren hente varme eller levere varme til berggrunnen. De består av polyetylenrør med høy tetthet. Kollektorens design avhenger av geologiske forhold og egenskaper som påvirker termisk effekt (Kavanaugh og Rafferty 2014) (Acuña og Palm 2010). Det er viktig at kollektoren er designet slik at varmen kan overføres fra eller til bakken uten unødvendig temperaturforskjell mellom kollektorvæsken og omgivelsene.

Kollektoren må være termisk effektiv for å få overført mest mulig varme. En grad celsius høyere eller lavere temperatur som strømmer fra borehullet kan resultere i en endring på 2-3 prosent i effektfaktoren (COP_{VP}) til varmepumpen (Acuña og Palm 2010) (Beier, et al. 2014). De to vanligste typene kollektorer heter u- rørkollektor og koaksial kollektor.

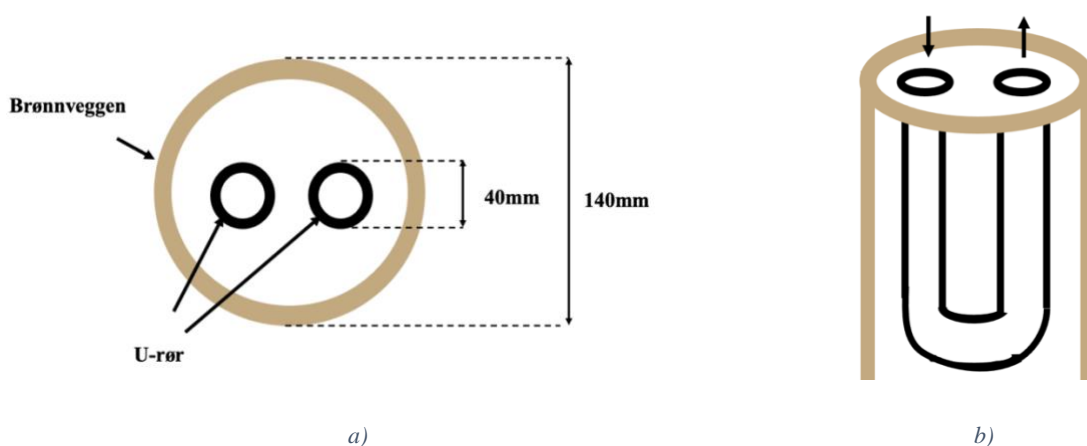
5.2.1 U-rørkolektor

Den mest benyttede kolektoren på markedet i dag er u-rørkolektoren, grunnet relativt lave kostander og enkel installasjon (Acuña og Palm 2010).



Figur 5.6: Bilde av en u-rørkolektor. Tatt hos Seabrokers Fundamentering AS

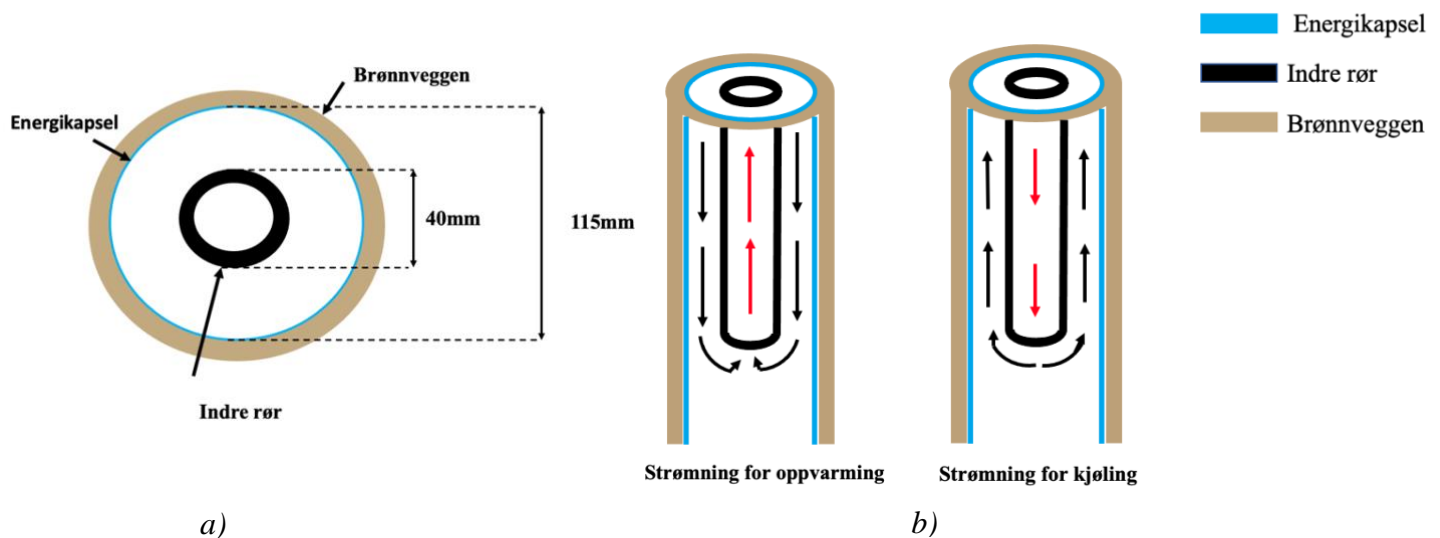
Hvert borehull består av en singel, dobbel eller trippel u-rørkolektor, hvor kolektorvæsken sirkuleres og utveksler varme med berggrunnen og fordampere. Enkel u-rørkolektor er den mest vanlige. Hvilken vei varmen går avhenger av om energibrønnen brukes til oppvarming eller kjøling (Acuña og Palm 2010). Ved oppvarming med en enkel u-rørkolektor pumpes sirkulasjonsvæsken ned den ene siden av røret og returnerer med en høyere temperatur opp den andre siden av røret. Borehullets diameter er oftest rundt 140-160 millimeter, mens rørdiameteren er rundt 20- 50 millimeter (Li, et al. 2013) (NGU 2023).



Figur 5.7: a) Tverrsnittet til en typisk u-rørkolektor, b) Pilene viser strømningsretningen til u-rørkolektoren

5.2.2 Koaksial kollektor

Koaksial kollektor, også kalt rør-i-rør kollektor, består av et indre rør plassert i sentrum og et ytre rør som er plassert inntil brønnveggen. Kollektorens ytre rør kan være et stivt rustfritt stålrør eller et fleksibelt rør. Tanken bak koaksialdesignet er å bringe kollektorvæsken så nær brønnveggen som mulig (Acuña og Palm 2010). Varmeoverføringen fra det ene røret til det andre, skjer i én retning. Kollektorvæsken sirkulerer nedover i annulus mellom det indre og det ytre røret og returnerer opp indrerøret ved oppvarming. Ved å bruke denne strømningsretningen vil væsken få en lavere strømningshastighet nedover grunnet et større areal noe som gir økt varmeoverføring fra berggrunnen til kollektorvæsken (Mol og Wilhelmsen 2015). Motsatt ved kjøling, da sirkulerer arbeidsmediet nedover fra sentralrøret og deretter returnerer mellom annulus og det ytre røret (Fang, et al. 2018).



Figur 5.8: a) tverrsnittsarealet av koaksial kollektoren, b) Strømningsretningen for oppvarming og kjøling av en koaksial kollektor

Figur 5.8 b viser to koaksial kollektorer med forskjellig strømningsretning. Det ytre røret består av en tynn fleksibel plast slange som avgrensner det ytre røret fra brønnveggen. Den tynne slangen, vanligvis kalt energikapsel, er illustrert med blå i figur 5.8. Energikapselen er det første som blir installert i en energibrønn, den sendes ned i brønnen med et bunnlodd og fylles deretter med kollektorvæske (Acuña og Palm 2010). Når kapselen er fylt med kollektorvæske, forsegler den borehullet fra omgivende fjell og grunnvann. Deretter blir et

indre fast rør nedsenket i midten av brønnen ved hjelp av et bunnlodd. Det indre røret består vanligvis av polyetyl. Det indre røret er ikke fastankret og vil derfor ofte avvike fra sentrum. Den største utfordringen med dette designet er å unngå termisk kontakt mellom oppstrømning- og nedstrømning i rørene som fører til varmetap i kollektorvæsken. For å unngå termisk kontakt kan en isolere det indre røret (Acuña og Palm 2010).

Ved å utnytte temperaturøkningen i en koaksial kollektor, har denne type kollektor blitt mer effektiv sammenliknet med den tradisjonelle u-rørkollektoren. Koaksialkollektorer har en unik fordel dersom den designes rett, grunnet et større overflateareal nær brønnveggen. Resultatet er et større areal til varmeoverføring som dermed gir økt effekt. Erfaringene med koaksial kollektor viser til komplikasjoner under installasjon, grunnet oppdriftskrefter og stivhet (Acuña og Palm 2010).

5.3 Kollektorvæske

Kollektorvæsken sirkulerer gjennom kollektoren og valget av kollektorvæske er vesentlig for ytelsen til energibrønnen. Det er viktig å minimere viskositeten til kollektorvæsken for å minimere den hydrauliske motstanden og for å få best mulig strømning gjennom kollektoren. Arbeidsmediets viskositet øker når temperatur synker. Viskositeten øker også når man senker frysepunktet. Dette gjøres ved å øke konsentrasjonen av frostvæske i kollektorvæsken. Væskestrømningen i kollektoren anbefales å være i overgangen mellom turbulent og laminær strømning (Ramstad 2017). Innslag av turbulens vil øke varmeoverføringen fra rørveggen i kollektoren til den sirkulerende væsken.

Det minst tyktflytende og mest hydraulisk effektive av de vanligste frostvæskene er etylene glykol. Ulempen med dette stoffet er at det er giftig og er sterkt frarådet, og ulovlig, i mange land. Propylene glykol er et stoff som ligner mye på etylene glykol, men er ikke giftig. Dessverre har propylene glykol mye høyere viskositet, som vil føre til høyere hydraulisk motstand og vanskeligheter for å nå en turbulent strømning (Banks 2012).

Alternativt kan man bruke uorganiske saltløsninger. Disse er ikke giftige, har lav viskositet og har ofte frysepunkt lavere enn null. Ulempen er at de kan være etsende på grunn av ionene i løsningen. Organiske salter er mindre etsende og kan være en bedre løsning. FreeziumTM

hevdes å være basert på kalium og har mange av de gode egenskapene man ser etter i et arbeidsmedium (Banks 2012) (Arteco 2018).

Konsentrasjon av væske i vann [%]	Arbeidsmedium	Varmeledningsevne [W/ (K · m)]	Frysepunkt [°C]	Dynamisk viskositet [cP]	Giftig?
-	Vann	0,570	0	1,52	Nei
23,50	Etylene Glykol	0,471	-10	3,53	Ja
25,40	Propylene Glykol	0,448	-10	5,64	Lite
18,70	Etanol	0,455	-10	5,00	Lite
35,00	Etanol (HX35)	0,430	-17,5	6-7	Lite
18,82	Kaliumklorid	0,548	-15	2,59	Lite
24,00	Freezium™	0,510	-15	2,21	Lite

Tabell 5.1: Egenskapene til ulike frostvæsker ved 0 grader Celsius (vann ved 5 grader Celsius). Hentet fra (Banks 2012), data for HX35 er hentet fra (Båsum Boring AS 2023)

I Norge bruker man oftest etanolbaserte frostvæsker i kollektorene. Dette fordi man ønsker å unngå giftige stoffer og trenger et lavt frysepunkt. Ifølge Nævdal fra Båsum boring er HX35, som er en etanolbasert frysevæske med en konsentrasjon på 35 prosent, mest brukt i kollektorene. Tidligere brukte man mye glykol i kollektorene, derfor brukes dette fortsatt til vedlikehold av eldre brønner (Nævdal / Båsum Boring AS 2023).

I Norge bruker man oftest etanolbaserte frostvæsker i kollektorene. Dette fordi man ønsker å unngå giftige stoffer og trenger et lavt frysepunkt. Ifølge Nævdal fra Båsum Boring er HX35, som er en etanolbasert frysevæske med en konsentrasjon på 35 prosent, mest brukt i kollektorene. Tidligere brukte man mye glykol i kollektorene, derfor brukes dette fortsatt til vedlikehold av eldre brønner (Nævdal / Båsum Boring AS 2023).

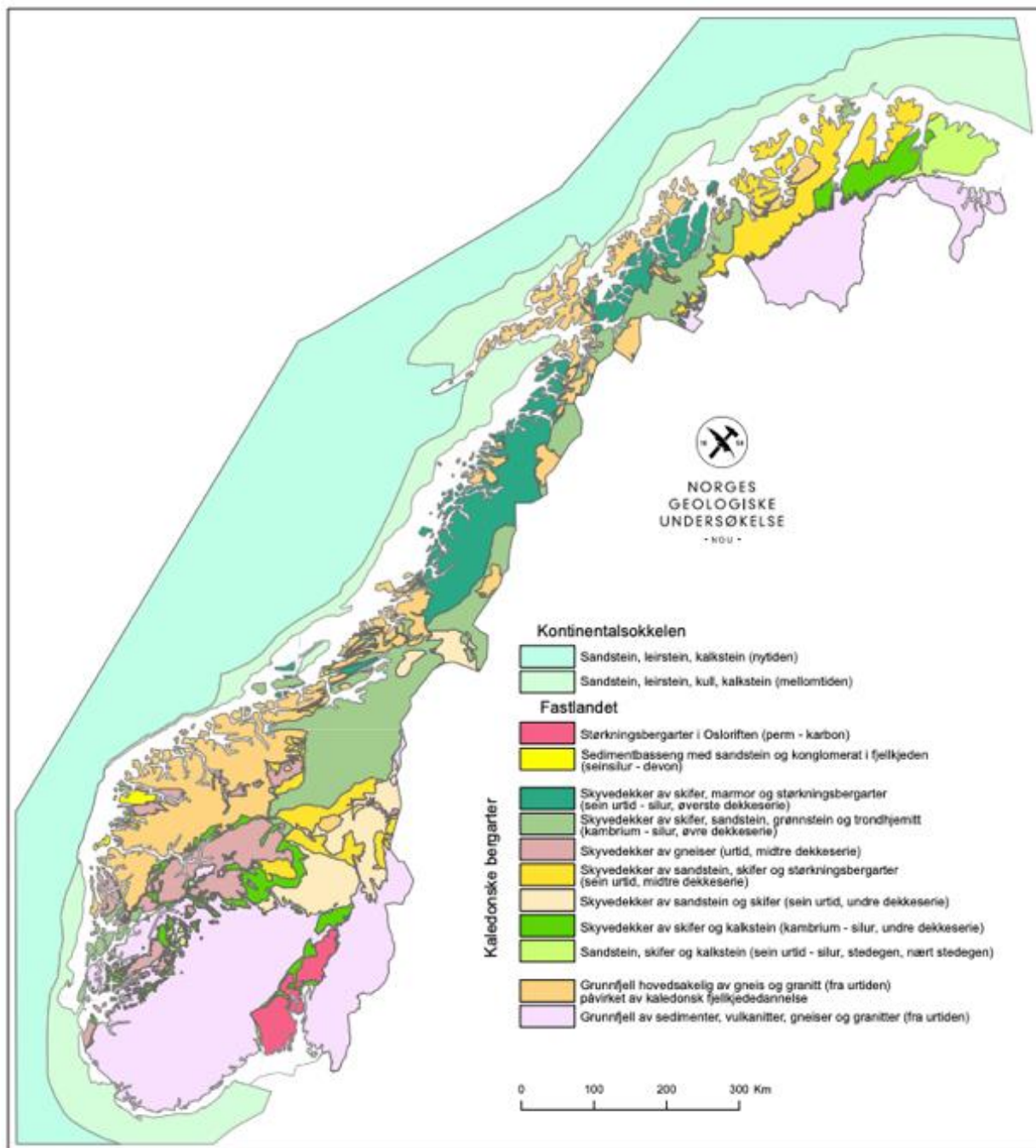
5.4 Boreprosessen

Det er flere faktorer å ta hensyn til når vi skal bore en energibrønn. Først må vi kartlegge berggrunnen i området og estimere energibehovet til den aktuelle bygningen. Deretter brukes denne informasjonen til å dimensjonere energibrønningen, velge boremetode, borekrone og fyllmasse ved behov.

5.4.1 Forberedning

Hovedvariablene som bestemmer valget av boremetode og kollektorrør er type bergart i berggrunnen og tilstedeværelsen av det lokale grunnvannet. Vi kan dele bergartene inn i tre hovedtyper: sedimentære, metamorfe og magmatiske. Hvor hard bergarten er påvirker for det meste tiden som brukes på å bore. Tilstedeværelsen av løsmasse krever ofte foringsrør for å holde borehullet stabilt. Dette forlenger boretiden og installasjonsprosedyrene (Galgaro, et al. 2022).

Når en energibrønn skal vurderes er det naturlig å starte med å kartlegge geologien i området. Ved å kartlegge geologien i boreområdet vil det gi nyttig informasjon om forventet boretid og kostnader ved installasjonen. Norges geologiske undersøkelser (NGU) har landsdekkende kart av berggrunnen i Norge, som blir tatt i bruk av leverandører av grunnvarmesystemer.



Figur 5.9: Forenklet geologisk berggrunnskart over Norge hentet fra (NGU 2023)

Ved hjelp av NGUs kartlegging av de ulike bergartene i Norge kan leverandøren avgjøre boremetode. Dette er nyttig hjelpemiddel ved boring, dimensjonering og installering av energibrønner.

5.4.2 Simulering

Simulering er en viktig del av planleggingen av energibrønner, og kan brukes til å optimalisere design og ytelse av systemet.

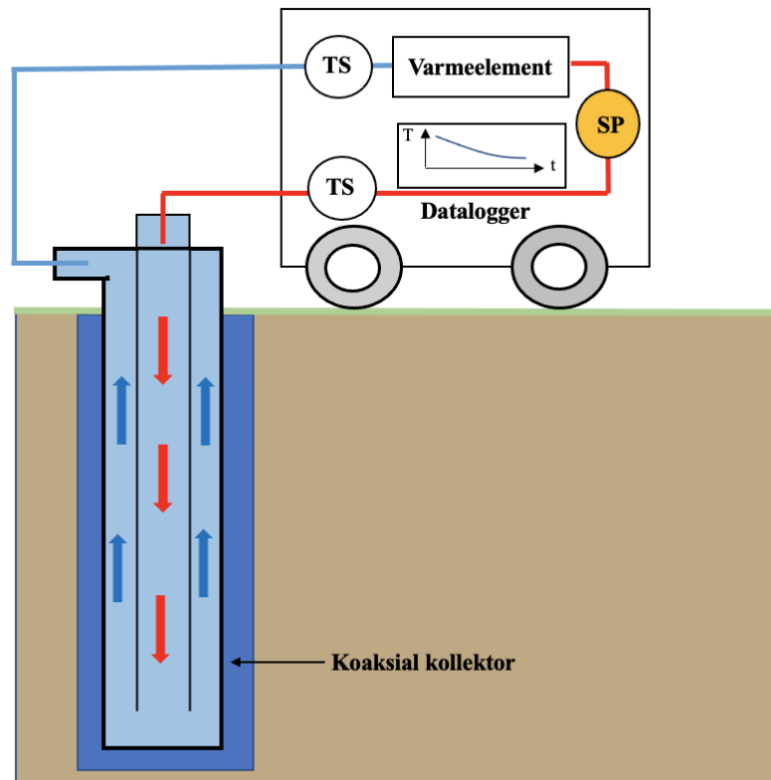
Energibehovet til eksisterende bygning kan man lese av energimålere som er installert i bygget (Hannevig / Seabrokers AS 2023). Ved planlegging av nye bygg er det viktig å kunne forutsi energibehovet for å kunne tilrettelegge korrekt dimensjonering av brønner. Til dette kan man bruke programmet som heter IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE). IDA ICE er et simuleringsprogram som simulerer termisk inneklima og energiforbruket til hele bygninger. IDA ICE gjør det mulig å nøyaktig modellere byggets behov for varme og kjøling, for å deretter optimalisere energitilføringen (EQUA 2023) (Rototec 2023).

Når vi vet byggets energibehov, kan man simulere brønnparken med reelle tall for varme- og kjølebehov for å sikre riktig dimensjonering. Antall energibrønner, dybde og lengde skal alltid designes etter byggets energibehov. Et mye brukt simuleringsprogram for design og dimensjonering av brønnparker er Earth Energy Designer (EED). EED er en programvare som brukes til å designe kollektorene i vertikale borehull. Programmet brukes vanligvis til å simulere driften i 20 til 30 år frem i tid, men kan også simulere ved energibehov i 100 år (BLOCON AB 2023) (Rototec 2023).

5.4.3 Termisk responstest

Ved større prosjekter kan det være nyttig å investere i en termisk responstest. Termisk responstest er en vanlig teknikk som brukes til å dimensjonere kollektorrørene, bestemme den termiske motstanden i energibrønner og avgjøre varmeledningsevnen til grunnen (Singh, Bouazza og Wang 2015). Ved en responstest kan en dermed avgjøre de faktiske forholdene i brønner og vi kan med høy nøyaktighet avgjøre antall energibrønner som er nødvendig. Uten en slik test blir det fort overestimert nødvendig borelengde, noe som betyr at det dannes en unødvendig overdimensjonering. En slik overdimensjonering vil skape høye kostnader sammenliknet med prisen for en termisk responstest (Båsum Boring AS 2012).

Måleinstrumentet består av en liten sirkulasjonspumpe, et varmeelement, temperatursensorer og en datalogger for opptak av temperaturdata.



Figur 5.10: Termisk respons test

Figur 5.10 illustrerer en termisk responstest hvor TS står for temperatursensor og SP står for sirkulasjonspumpe. Testen bruker et varmeelement til å varme opp kollektorvæsken. Deretter brukes sirkulasjonspumpen til å sirkulere den oppvarmede væske inn i borehullets kollektorer. Borehullets temperaturendring registreres i temperatursensorene under en måleperiode på 2-3 dager. Temperaturmålingene blir loggført i en datalogger som bruker disse verdiene til å finne borehullets totale varmetransport og borehullets termiske motstand (Båsum Boring AS 2012).

5.4.4 Dimensjonering

Ved dimensjonering av energibrønner vil varmeuttaket spille en vesentlig rolle. Hvor mye varmeenergi en brønn kan levere avhenger av flere faktorer, for eksempel årstemperaturen. Norge er inndelt i 4 ulike klimasoner, A, B, C og D, grunnet landets ulike årstemperatur og grunnvannstemperatur. De ulike klimasonene har ulik effektbelastning, noe som resulterer i ulik dimensjonering av energibrønner. Effektbelastningen viser til hvor mye varmeeffekt som kan trekkes ut per boremeter.

Tabell 5.2 viser inndeling av klimasonene og brukes som et forenklet estimat til dimensjonering av energibrønner (Helliesen / ABK- Qviller AS 2023):

Klimasone	A	B	C	D
Midlere årstemperatur [°C]	0-3	3-5	5-7	7 <
Grunnvannstemperatur [°C]	2-4	3-5	6-8	8-10
Anbefalt effektbelastning [W/m]	25	30	35	40

Tabell 5.2: Inndeling av klimasonene (Helliesen / ABK- Qviller AS 2023)

Meteorologisk institutt har målt årsmiddeltemperaturer over store deler av Norge i 2021, noe som gjør det enkelt å finne ut hvilken klimasone ulike steder tilhører (Grinde, et al. 2021).

En tommelfingerregel for å regne ut brønndybden til en energibrønn kan beregnes ved å dele varmepumpens varmeeffekt på anbefalt effektbelastning. Aktiv brønndybde tilsvarer kun brønndybden opp til grunnvannsspeilet. Varmeeffekt er den varmemengden som blir levert til den aktuelle bygningen per tidsenhet. Dette betyr at dersom du har et høyt varmeenergiforbruk, trenger du en høyere varmeeffekt, noe som tilsier en dypere brønn.

$$\text{Aktiv brønndybde} = \frac{\text{Varmeeffekt}}{\text{Anbefalt effektbelastning}} \quad (5.1)$$

Vi kan ta utgangspunktet i en varmeeffekt på 7 kW. Våland i Stavanger har en årstemperatur på 9,4 grader celsius (Grinde, et al. 2021). Dette innebærer at Våland ligger i klimasone D. Hvis vi skal bore i klimasone D, tilsvarer dette en anbefalt effektbelastning på 40 W/m. Brønndybden blir da (Helliesen / ABK- Qviller AS 2023):

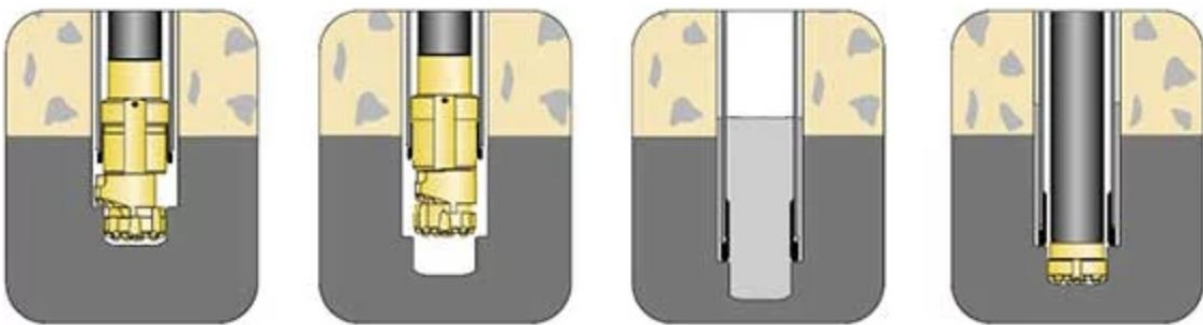
$$\text{Aktiv brønndybde} = \frac{\text{Varmeeffekt}}{\text{Anbefalt effektbelastning}} = \frac{7000W}{\frac{40W}{m}} = 175m \quad (5.2)$$

Den aktive brønndybden blir da 175 m, det legges til 10m ekstra til vannspeilet og noen meter i sikkerhetsmargin. I dette tilfellet ville en typisk bore brønnen 190 m dyp (Helliesen / ABK- Qviller AS 2023).

5.4.5 Boremetoder

Det finnes mange ulike boreteknikker for energibrønner. Hammerboring, på engelsk referert til «down-the-hole hammer» er standard metoden for å bore i harde formasjoner. Roterende boring brukes i mykere formasjon slik som leire og sand (Kavanaugh og Rafferty 2014). Dersom det er løsmasse til stede i brønnen må borehullet stabiliseres før det kan gjennomføres hammer- eller roterende boring. Dette gjøres som regel med Odex boring. Her brukes eksentrisk borekrone og man kombinerer boring og kjøring av foringsrør samtidig.

5.4.5.1 Odex boring



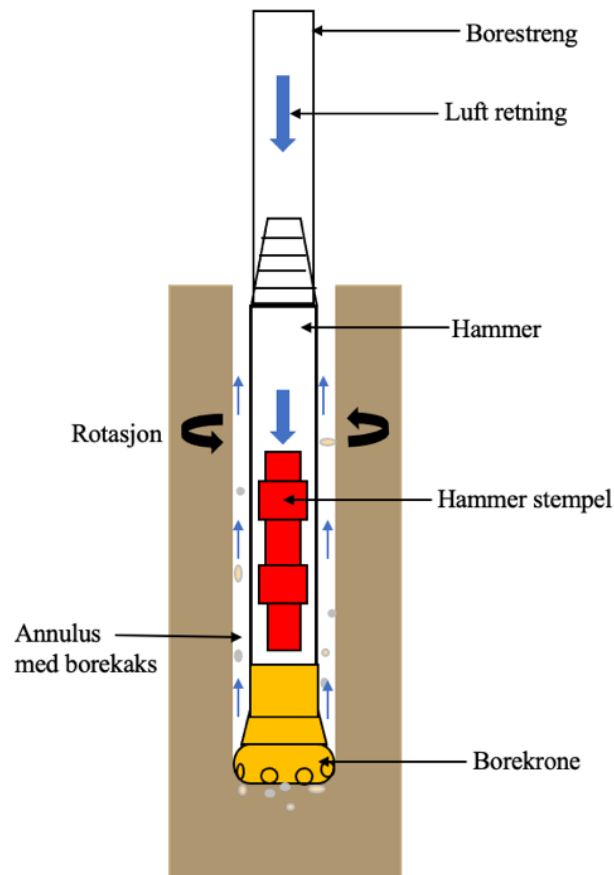
Figur 5.11: Prosessen til Odex boring. Bilde er hentet fra (PRD Rigs 2023)

I Norge består vanligvis berggrunnen av krystalline bergarter med et lag av løsmasse over (NOVAP 2023). For å komme ned til de krystalline bergartene må man først bore gjennom løsmasser med foringsrør (Energiverket 2023). Foringsrør er et stålrør som brukes til å støtte borehullet slik at vi unngår kollaps av løsmasser. Dermed holder energibrønnen seg stabil. Den vanligste metoden for denne type boring kalles Odex-boring. Man må ha en eksentrisk borekrone for å lage hullet stort nok for foringsrøret. Ved Odex-boring forankres foringsrøret 1-2 meter ned i fast fjell og det etableres bentonitt tetting mellom foringsrøret og berggrunnen (Energiverket 2023). Det foretrekkes å bruke bentonitt fremfor andre fyllmasser fordi bentonitt skaper en barriere mot grunnvannsinntrengning grunnet dens lave permeabilitet (Mahmoud, et al. 2021).

5.4.5.2 Hammerboring

Harde formasjoner krever ofte hammerboring for å oppnå akseptabel borhastighet. (Kavanaugh og Rafferty 2014). I Norge og Sverige består landskapet av svært harde, krystalliske bergarter som er tildekket av et relativt tynt lag av løse kvartære sedimenter, noe som gjøre disse to landene godt egnet for hammerboring. Hammerboring er en effektiv

boremethode i harde formasjoner og man kan for eksempel bore en dybde på 100 meter gjennom granitt på mindre enn 1-2 dager (Banks 2012).

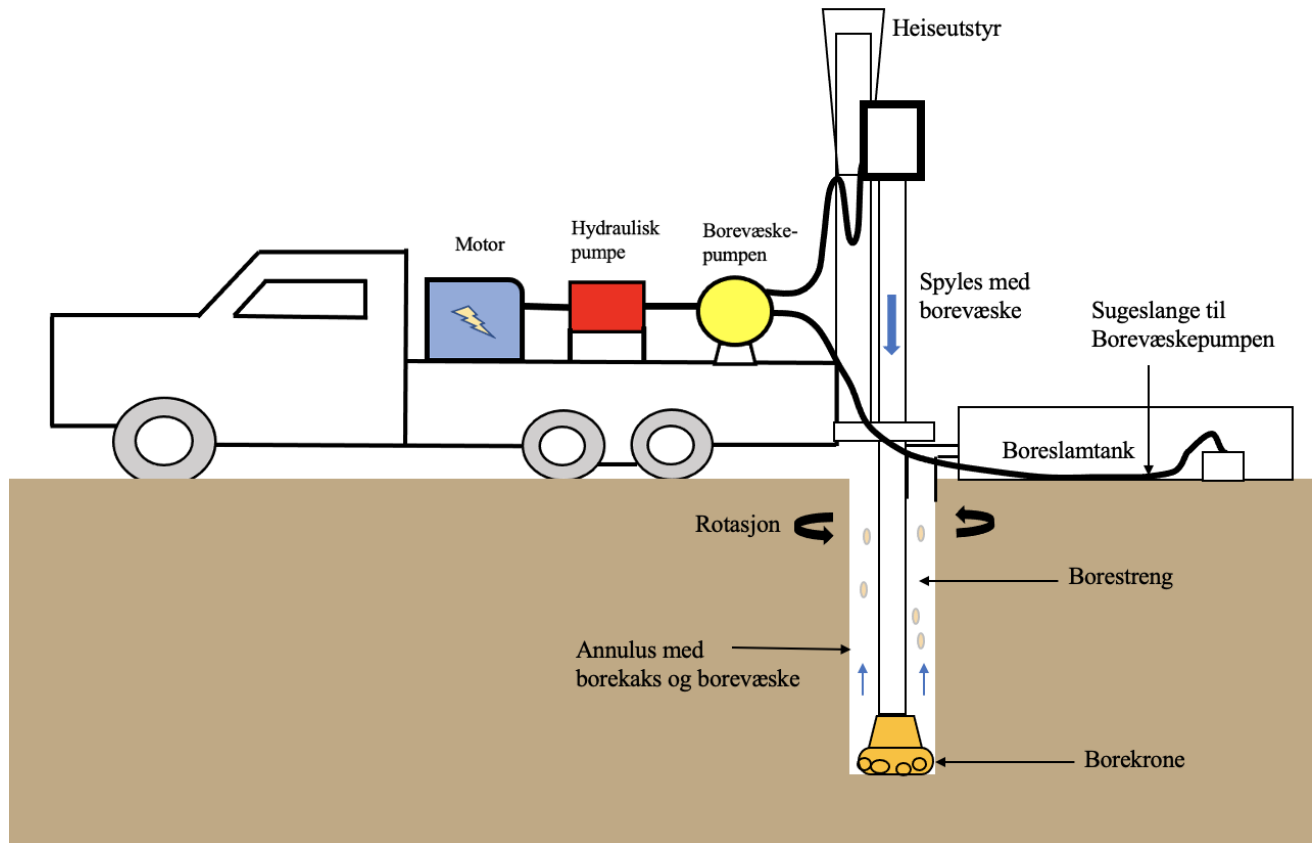


Figur 5.12: Komponentene til hammerboring

I figur 5.12 viser blå piler til luftretningen og svarte piler viser hvordan hammeren roterer gjennom boringen. Hammerboringsmetoden fungerer ved at borestrengen pumper ned komprimert luft (eller hydraulisk trykk fra vann) til den sakte roterende hammeren på bunnen av borestrengen. Det høye lufttrykket får et stempel til å slå borekronen gjennom den harde formasjonen. Borehodet roterer hammeren og borekronen, slik at den harde formasjonen brytes ned til borekaks og støv. Det høye lufttrykket returnerer deretter opp gjennom annulus og fjerner den dannede borekaksen (Banks 2012).

5.4.5.3 Roterende boring

Roterende boring er den klassiske metoden for boring. Roterende boringsutstyr består av fire grunnleggende delsystemer: Drivkraft, roterende utstyr, heiseutstyr og sirkulasjonsutstyr.



Figur 5.13: En liten borerigg for installasjon av en energibrønn

Boringen gjennomføres ved å rotere en borekrone og spyle borehullet med boreslam eller vann. Den mest vanlige borevæsken er en kombinasjon av vann, bentonittleire og tilsetningsstoffer. Avhengig av hydrogeologiske forholdene avgjøres det om brønnen skal fullføres med eller uten foringsrør (Galgaro, et al. 2022). Boreriggen må være kraftig nok til å bore gjennom kraftig formasjon, samtidig som den må være liten og fleksibel nok til å kunne transporteres til neste borehull. Små rigger er ofte drevet av motoren til en lastebil gjennom et hydraulisk system. Større rigger har derimot noen ganger en egen motor til å drive de ulike systemene på riggen. I begge tilfellene brukes motorkraft til å drive borevæskepumpen, vinsjer, hydrauliske pumper og til å rotere borestrengen. Borestrengen er en samlebetegnelse på borerør, borekronen og vektrør (Kavanaugh og Rafferty 2014).

5.4.5.4 Valg av boremetode

En gruppe spesialister innenfor det EU-finansierte prosjektet GEO4CIHIC utviklet en tabell med de beste tekniske boremetodene i Europa for ulike typer bergarter. Tabellen brukes til å planlegge og avgjøre ulike design av grunnvarmesystemer (Galgaro, et al. 2022). I tabell 5.3 har det blitt tatt et utvalg av noen bergarter fra GEO4CIHIC prosjektet.

Bergart	Boringsmetode	Borekrone	Casing? [Ja/nei]	Tid/ meter [min/m]	Kostnad/meter [€/m]
Sand og sandstein	Roterende boring	Rulleborekrone	Ja	10-15	$30 < x < 40$
Sandstein	Hammerboring		nei	4-7	≥ 40
Leire	Easy drill piling		nei	< 4	≤ 30
Glimmerskifer, gneiser	Hammerboring		nei	10-15	≥ 40
Leirskifer	Roterende boring	Rulleborekrone	nei	> 15	$30 < x < 40$
kalkstein	Hammerboring		nei	4-7	≥ 40
Marmor	Hammerboring		nei	4-7	≥ 40

Tabell 5.3: Geologisk kartlegging av boringsmetode for et utvalg av ulike bergarter i Europa. Hentet fra (Galgaro, et al. 2022)

Boretid og borekostnader er sterkt påvirket av de hydrogeologiske forholdene.

Det er viktig merke seg at denne tabellen ikke tar hensyn til hydrogeologiske forholdene, det vil si grunnvannsformasjonen og hvordan grunnvannsformasjonen påvirker mineraler og geologisk materialet (Galgaro, et al. 2022).

5.4.6 Borekroner

Valg av borekrone design avhenger av geologien i området. Å velge rett borekrone er nødvendig for å optimaliseres borehastigheten (ROP= rate of penetration) og holde brønnen kostnadseffektiv. Dersom det benyttes en borekrone som ikke er særlig egnet til formasjonen vil det føre til flere borekroneskifter, noe som koster mye tid og penger. Når det velges en borekrone ønskes det å optimalisere ROP og unngå bytte av borekronen for tidlig (Fjelde 2023). I følge Båsum Boring kan en borekrone bore rundt 300 meter før den må skiftes ut (Asbjørnhus / Båsum Boring AS 2023). Enkelte typer fjell gir mulighet for å bore med en borekrone opptil 500-600 meter i en energibrønn (Asbjørnhus / Båsum Boring AS 2023). Dette vil gjøre at brønnen holder seg kostnadseffektiv.

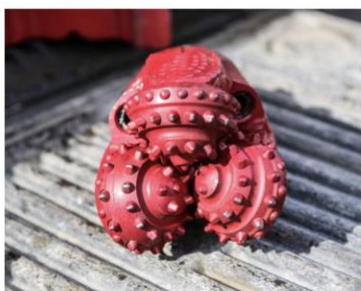
Formasjonens hardhet	Bergart	Boring	Borekrone
Mykt/medium	Skifer, leire, kalkstein og sand	Odex	-
Medium hard/hard	Hard kalkstein, sandstein og dolomitt	Roterende	Rullekrone, Skjærekrone
Hard og slipende	Granitt, basalter, kvartsitt, chert	Hammer	Fjellkrone

Tabell 5.4: Oversikt over hvilke boremetode og borekrone man bruker i de ulike bergartene.

Ved myk formasjon bør det benyttes borekroner med lange og mer spredte kuttere. Rullekrone er en borekrone som benyttes der det er ekstra hardt fjell og brukes bare i små partier. Denne borekronen benytter hovedsakelig vann for gjennomskylling av borekaks. Borestrengen- og kronens egenvekt brukes for å bores nedover i brønnen. Denne borekronen har lav til medium bore hastighet (Daler 2016).

Hvis vi derimot ønsker å bore i større partier er skjærekrone (PDC) et alternativ. Kronen skjærer opp fjellet og det gjøres med en hurtigere borehastighet enn med rullekronen (Daler 2016).

Den vanligste borekronen er fjellkrone. Fjellkronen borer med luft og har en dobbelt så rask borehastighet som skjærekrone. Ulempen er at blir mye søl i motsetning til skjærekrone og rullekronen som sirkulerer borekaket opp av brønnen og inn i en tett container (Daler 2016).



Rullekrone



Skjærekrone



Fjellkrone

Figur 5.14: Bilde av de ulike borekronene brukt til å bore en energibrønn, hentet fra (Daler 2016)

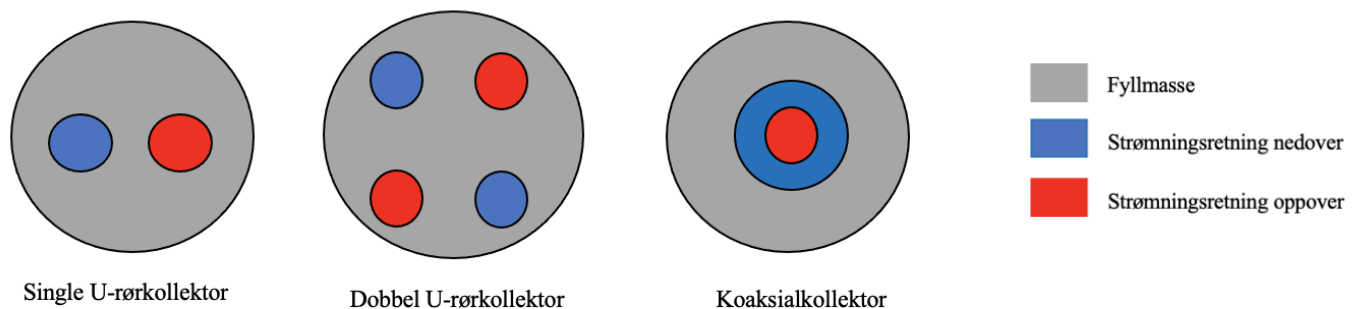
5.4.7 Fyllmasse

Fyllmasse brukes til å fylle rundt kollektoren i energibrønnen.

Etter at borehullet er ferdig, nedsenkes kollektoren. Deretter kan annulus fylles med fyllmasse dersom det ikke er grunnvann til stede eller man ønsker å beskytte grunnvannet. Annulus er tomrommet mellom kollektorslanger og borehullsveggen. I Norge benyttes oftest grunnvannet i energibrønnen. En ønsker å fylle grunnen med fyllmasse eller grunnvann for å (Kavanaugh og Rafferty 2014):

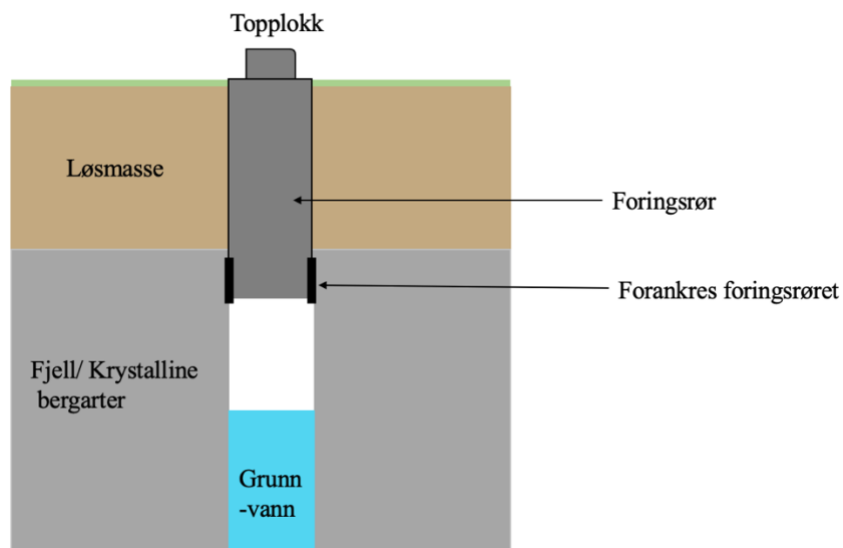
1. Sikre god varmeoverføring fra grunnen til kollektoren
2. Unngå strømming av forurenset vann fra overflaten til grunnvannet.

Luft har en varmeledningsevne på $0,02 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ og er derfor en dårlig varmeleder. For å sikre god varmeoverføring er det derfor viktig å fylle tomrommet i annulus med fyllmasse. Fyllmassen vil da overføre varme fra berggrunnen ved termisk varmeledning, mens varmeoverføringen fra rørveggen til kollektorvæsken (i kollektoren) skjer ved konveksjon (Serageldin, et al. 2018). Ved fyllmasse med høyere varmeledningsevne trengs det en lavere brønndybde.



Figur 5.15: Borehullet sitt tverrsnittet til de ulike kollektortypene som er omringet av fyllmasse

Den andre viktige oppgaven til fyllmassen i annulus er å unngå at overflatevann eller uønsket grunnvann strømmer ned i grunnen- og grunnvannsakviferen. Overflatevann og enkelte grunnvannsakviferere kan inneholde forurensende stoffer eller mineraler som kan forurense drikkevann som ligger lagret i berggrunnen (Kavanaugh og Rafferty 2014).



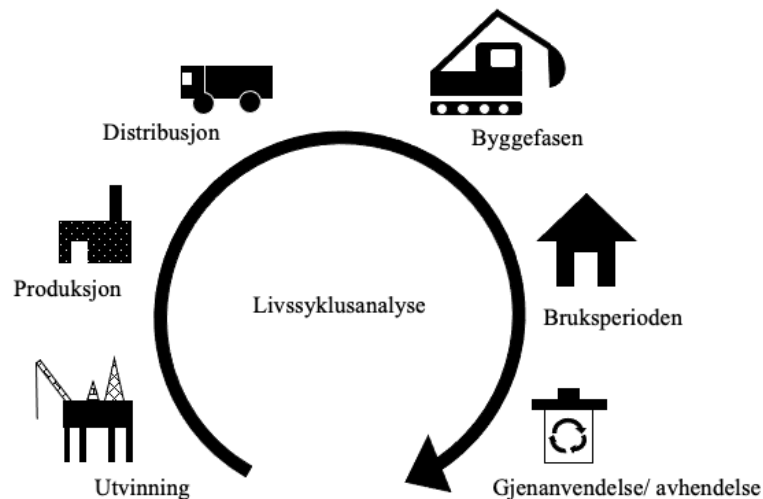
Figur 5.16: Forankret foringsrør i fjellet.

Figur 5.16 viser hvordan foringsrøret forankres ned i fjellet før det kan bores videre ved roterende- eller hammerboring.

Det som kjennetegner de fleste fyllmasser er et høyt kvartsinhold, grunnet kvarts høye varmeledningsevne. Sammen med et høyt innhold sement eller bentonitt sikres det lav hydraulisk konduktivitet og en hydraulisk tett masse (Kavanaugh og Rafferty 2014). Vanlig typer bentonitt som brukes er natrium, kalsium og kalium (Mahmoud, et al. 2021).

5.5 Livssyklus

For å kartlegge og vurdere de totale miljø- og ressurspåvirkningene må man se på hele livssyklusen til energibrønnen. Fra uttak av råvarer i naturen til produktene ender som avfall eller gjenbruk.



Figur 5.17: Viser de ulike prosessene i en livssyklusanalyse

I en energibrønn er det flere komponenter av ulike materialer, men i denne analysen ser vi på de to største komponentene: kollektor og kollektorvæske.

I en energibrønn plasserer vi kollektorer som vi fyller med en kollektorvæske. Kollektorene er av plast og kollektorvæsken er ofte en kombinasjon av vann og etanol. Både plast og etanol fremstilles av hydrokarboner fra petroleumsindustrien. Råstoffene for plast og etanol produseres i den petrokjemiske industrien, hvor det brukes råolje og naturgass (Store Norske Leksikon 2022) .

Produksjon og distribusjon vil også være en miljøbelastning. Når plasten er fremstilt til små peletter blir de fraktet til en fabrikk, hvor de omsmeltes til nye produkter (Plastics Industry Association 2023). Miljøbelastningen av frakt vil variere med hvor store avstander man må frakte plasten mellom fabrikkene og fra fabrikk til leverandør.

I byggefase er det flere ulike trinn man må gjennom. Utstyret må fraktes til stedet hvor brønnen skal bores. Miljøskader og forurensing kan oppstå under boringen, spesielt som følge av utslipp av boreslam. Boreslam er en væske som skal stabilisere brønnen under boring og består ofte av vann, leirpartikler og ulike tilsatte kjemikaler. Hovedutfordringer med utslipp

av urensset boreslam er at det kan føre til nedslamming av vassdrag med store miljøskader. Det er alltid en fare for at en borerigg eller kompressor kan lekke olje eller diesel under boringen. Det er brønnborerens ansvar å ha kontroll over eventuelle lekkasjer på utstyret. Ved installasjon av kollektor med kollektorvæske må man være forsiktig slik at det ikke oppstår rifter som fører til lekkasje av kollektorvæsken. I dag bruker en ikke lenger kollektorvæsker med høy giftighet, men væsken kan allikevel påvirke nærliggende drikkebrønner (NGU 2023).

Under bruksperioden fungerer energibrønnen helt uten direkte utslipp. Det må tilføres strøm for å pumpe kollektorvæsken opp og ned av brønnen, men utenom dette fungerer energibrønnen av seg selv. Siden kollektorene er av plast og står i mørke uten at de eksponeres for UV-stråling blir de ikke ødelagt. Energibrønnen har derfor en brukstid på over 100 år (Hannevig / Seabrokers AS 2023).

I fremtiden vil det være aktuelt å finne gode rutiner for avfallshåndtering av brønner som ikke lenger er i bruk.

6 utfordringer og muligheter

Selv om energibrønner kan være en miljøvennlig og effektiv måte å hente ut varme på, finnes det også flere utfordringer knyttet til teknologien. Disse inkluderer geologiske utfordringer, tekniske begrensninger og økonomiske faktorer. Det er viktig å forstå utfordringene og å finne muligheter som gjøre det mulig å utnytte energibrønner på en bærekraftig og effektiv måte.

6.1 Infrastruktur, plassering og dimensjonering

Bruken av energibrønner øker og dermed øker også risikoen for at konflikter skal oppstå mellom brønner og annen infrastruktur. Man trenger i de aller fleste tilfeller ikke å sende en ordinær søknad om å bore en energibrønn ved bygningen, fordi det faller utenfor kravet i plan- og bygningsloven § 20-1 om søknadspliktige tiltak (NGU 2023). Det er likevel viktig å kartlegge den eksisterende infrastrukturen under bakken og over bakken (NGU 2023).

6.1.1 Konflikter med bygninger og infrastruktur

Bygger man energibrønnene for tett på bygninger kan dette skade dreneringen eller selve bygningen. Man bør derfor unngå å bore brønner nærmere enn fem meter fra bygninger eller bore i disse områdene med stor forsiktighet (NGU 2023). Ved planlegging av nybygg er det mulighet for å installere energibrønnen før byggeprosessen settes i gang. Da vil energibrønnen være under bygget.

Utbygging av underjordiske anleggsvirksomheter kan være problematisk for allerede eksisterende energibrønner. Et eksempel på dette var byggingen av Follobanen. Her måtte en kartlegge alle brønnene i bygningsområdet og Jernbaneløpene registrerte over 300 energibrønner. For brønnene som lå innen 50 meters avstand til banen kunne effektiviteten bli påvirket av utbyggingen i området. Lå brønnen helt nære arbeidsområdet var det risiko for at brønnen kunne bli ødelagt og for brønner lenger unna var det risiko for at grunnvannet kunne bli drenert bort. Før man starter boring og installering av energibrønn er det viktig å undersøke fremtidige planer i området og være klar over at energibrønnen kan bli påvirket av utbygginger fram i tid (NGU 2023) (BaneNOR 2016).

6.1.2 Feil dimensjonering

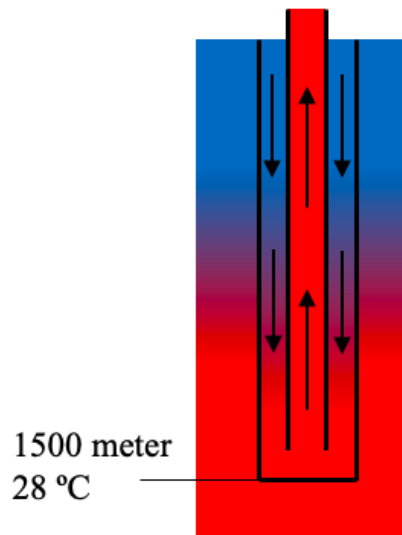
Det er viktig å unngå feil dimensjonering for å oppnå best mulig ytelse, effektivitet og økonomi i energibrønnen. Overdimensjonering kan gi økt varmeeffekt ut av energibrønnen, noe som resulterer i høyere COP_{VP} i varmepumpen og økt energieffektivitet. De økte boremeterne gir derimot høyere investeringskostnader og kan resultere i en unødvendig stor og kostbar brønn. Investeringskostnadene til boringen er høyere, men driftskostnadene lavere. Derfor må de økonomiske tilleggskostnadene vurderes nøye i prosjektbudsjettet (Li, et al. 2020).

Bygger man energibrønnene for nære hverandre eller ikke dype nok i forhold til energibehovet vil temperaturen i berggrunnen bli mye mindre enn beregnet. Energibehovet varierer med type bygning. Et stort industribygg trenger flere og dypere brønner enn en liten leilighet. Dette er fordi leiligheten har et lavere varmebehov enn industribygget. Underdimensjonerte energibrønner vil ikke være i stand til å overføre tilstrekkelig varmeenergi til for å dekke bygningens varmekrav. Dette skyldes at kollektorvæsken har for lav innkommende temperatur til varmepumpen. COP_{VP} minsker noe, som fører til redusert effektivitet. Dersom borehullet kjøles ned til det fryser, kan det skade kollektorslangene som følge av isdannelse i borehullet. For å øke kollektorvæskens temperatur må det bores dypere eller tilføres varme til brønnen med for eksempel tørrkjøler. Tørrkjølere veksler varme mellom væske og luft (ABK-Qviller AS 2023). Konsekvensen er høyere elektrisk energiforbruk og en lavere energieffektivitet. Dette skaper høye kostnader (Helliesen / ABK-Qviller AS 2023).

6.1.3 Arealutfordringer og dypere energibrønner

Ved oppvarming av store områder og bygninger trengs det mye energi. I mange tilfeller velger man da å bygge store områder med energibrønner, ofte under bygninger for å spare arealet. En løsning for å være mer arealeffektiv og samtidig få nok energi er å bore brønnene enda dypere. Det blir hele tiden forsket på og boret dypere energibrønner. Energiuttaket fra energibrønnen øker eksponentielt med dybden til brønnen. En brønn på 1500 meter kan sørge for like stort energiuttak som 20 brønner som er 250 meter dype og dermed kan man spare mange kvadratmeter på å bore dypere (Carstens 2022). På Gardemoen ble det i 2018 boret to brønner ned til 1500 meter for å varme opp betongdekket på «rusegropa» som skal være isfri. Temperaturen på bunnen av disse brønnene når 28 grader celsius. Oppvarmingen fungerer ved

at det sendes kaldt vann ned i brønnen som varmes opp av grunnen og blir pumpet opp igjen (Carstens 2022).



Figur 6.1: Strømning i energibrønnen

I figur 6.1 vises det hvordan vannet først går ned i brønnen, blir oppvarmet og deretter pumpes opp igjen via en koaksial kollektor. Norges geologiske undersøkelse (NGU) logget de to dype energibrønnene og målte flere ulike egenskaper, som temperatur og ledningsevne i vann. Hovedhensikten med loggingen var å beregne temperaturgradienten i brønnene. På grunn av ras i den ene brønnen fikk de kun logget temperaturen i en brønn. Denne brønnen ble boret ned til 1500 meter, men det ble påtruffet dårlig fjell og det var risiko for at utstyr skulle sette seg fast. Derfor ble det kun målt ned til 1448 meter. NGU konkluderte med at den gjennomsnittlige gradienten under 200 meter ligger på 15 °C/km. Gradienten øker svakt med dypet. Under 700 meter er gjennomsnittsgradienten på 16,1 grader celsius per kilometer (Elvebakk 2018). Fra formel 2.4 i delkapittel 2.3.1 *Varmeledning* vet vi at høyere temperaturgradient gir høyere varmeoverføring. Fra dette prosjektet kan man da konkludere med at man får bedre varmeoverføring jo lenger ned i fjellet man borer.

Dyp (m)	Gjennomsnittlig temperaturgradient (°C/km)
200-700	13,8
200-1448	15,3
700-1448	16,1

Tabell 6.1: Oversikt over temperaturgradienten ved ulike brønndybder. Data hentet fra (Elvebakk 2018)

For Gardemoen er prosjektet en omfattende energieffektivisering. Strøm som tidligere ble brukt på oppvarming kan kraftig reduseres eller brukes til andre områder (Carstens 2022). I tillegg sparte man store arealområder ved å bore brønnene dypere.

6.2 utfordringer ved boring og installasjon

Ved boring er det viktig at man har gjort gode forberedelser, valgt god plassering og dimensjonert riktig. Det kan likevel oppstå problemer under selve boringen av brønnen.

Treffer man en akvifer med artesisk grunnvann vil det oppstå problemer under boringen. Dette skjer hvor et porøst, vannledene lag, som sand eller løs sandstein, er dekket av et vanntett lag, som leire eller leirskifer (Bryhni, artesisk brønn 2018). Borer man gjennom dette vanntette laget og møter på grunnvann med høyt trykk risikerer man at vannet vil sprute ut av brønnen, som kan skylle ut store mengder finstoff og føre til setningsskader. For å minke ødeleggelsene i en artesisk brønn må man sette inn tetningstiltak umiddelbart. Dette er en krevende og kostbar prosess siden tetningen må settes under foringsrøret i fjellet for å unngå at grunnvannet trenger opp på utsiden av foringsrøret og eroderer jordmaterialet (NGU 2023).

Tapt sirkulasjon ved boring er et av problemene som skaper direkte kostnader ved boring av brønner. Tapt sirkulasjon skjer dersom borevæsken blir for tung og skaper et større hydrostatisk trykk enn det formasjonen i brønnen tåler. Da kan det oppstå sprekker i formasjonen og borevæsken kan lekke ut av disse sprekke. På overflaten oppdager man dette ved at det kommer mindre boreslam i retur enn man pumper inn. Tapt sirkulasjon øker kostnadene fordi man mister effektiv boretid og borevæske (Allahvirdizadeh 2020) (Lidal 2018).

Feil valg av dimensjonering, materiale og konstruksjon kan også føre til økt trykkfall i brønnen. Trykkfall oppstår når kollektorvæske sirkuleres ned i energibrønnen. Det er flere faktorer som påvirker trykkfallet, slik som (Banks 2012):

- Indre friksjon i kollektorvæsken, som er relatert til kollektorvæsken sin viskositet og strømningsregimet
- Motstanden i kollektoren, filter, ventiler
- Innsnevring i energibrønnen øker friksjonen og skaper høyere strømningsrate som gir økt trykkfall
- Trykkfall grunnet kompletteringsdesign

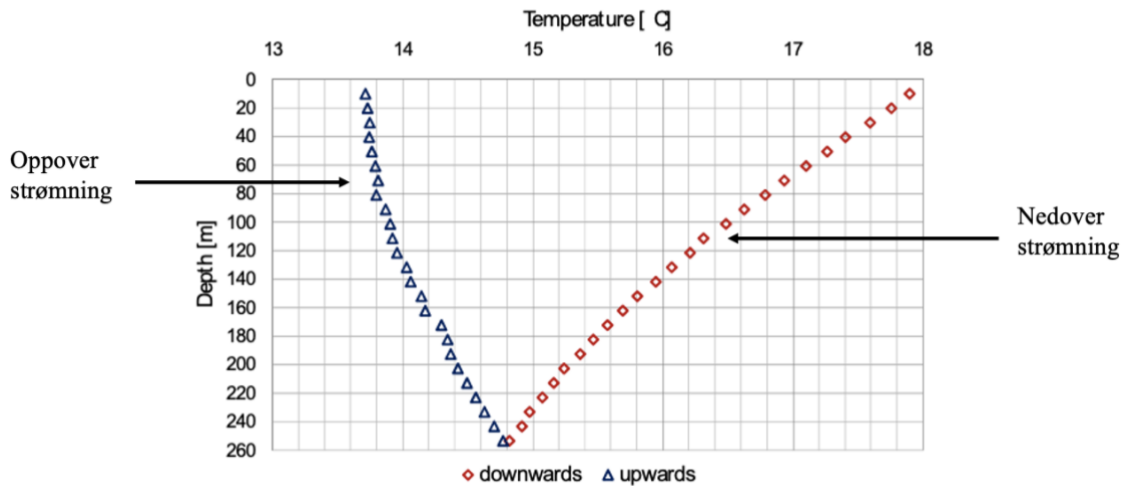
Disse faktorene representerer et trykkfall som må overvinnes av pumpen som sirkulerer kollektorvæsken. Høyere trykkfall krever en større pumpe med høyere pumpetrykk til å sirkulere kollektorvæsken. Høyere trykkfall vil dermed gi økte kostnader. For å unngå høyt trykkfall og opprettholde høy varmeledningsevne er det dermed avgjørende å dimensjonere og konstruere energibrønnen riktig (Banks 2012) (Helliesen / ABK- Qviller AS 2023).

Etter boreprosessen må brønnen fylles med fyllmasse dersom det ikke er grunnvann til stede i borehullet. Det øker installasjonstiden i tillegg til kostnader knyttet til arbeidskraft, fyllmasseproduktet og spesialutstyr som kreves for installasjonen (Kavanaugh og Rafferty 2014).

6.3 Kollektor

Det forskes stadig på forbedringspotensialet i u-rør og koaksial kollektorer. Et viktig forbedringspotensial med kollektorene er å finne effektive måter for varme å bli injisert og ekstrahert fra grunnen uten unødvendig varmetap. Ved koaksial kollektorer forskes det på ulike indre rør for å redusere den termisk motstand i borehullet, ved å unngå termisk kontakt mellom opp-og nedstrømning.

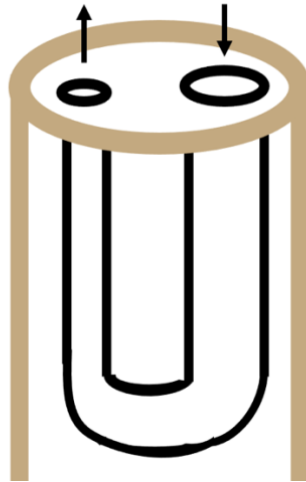
Ved bruk av en termisk respons test ble det gjennomført et eksperiment som viser resultater av temperaturen langs borebryden for to energibrønner med ulike kollektorer installert i Stockholm, Sverige (Acuña og Palm 2010). Utgangspunktet for begge energibrønnene var omtrent likt, ved en grunntemperatur på 9,10 grader celsius for u-røret og 8,45 grader celsius for koaksial kollektoren. U-rør kollektoren ble testet i en 260 meter dyp energibrønn, mens koaksial kollektoren ble testet i en 190 meters dyp brønn. Begge brønnene ble testet med lik injisert varmhastighet. Temperaturen til kollektorvæsken ble målt hver 10 meter, både for oppstrømning og nedstrømning i kollektoren.



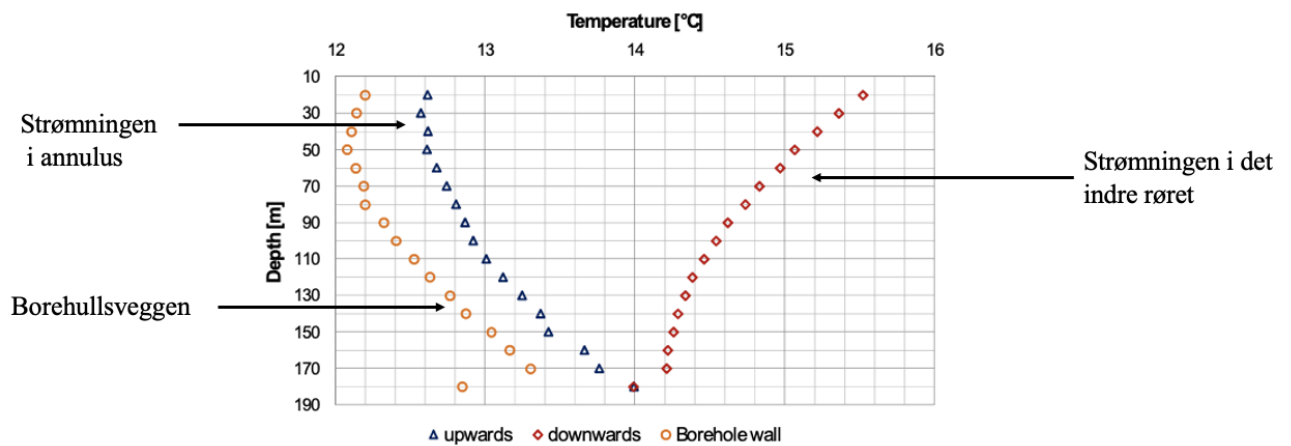
Figur 6.2: Gjennomsnittstemperatur i u-rør (Acuña og Palm 2010)

Diagrammet vist i figur 6.2 representerer en u-rør kollektor som henter ut varme, for å kjøle ned et hus. Det ønskes derfor å få en lav temperatur opp av kollektoren. Her illustrerer den røde grafen nedstrømning, mens den blå grafen illustrerer oppstrømning i u-rør kollektoren. I u-røret blir kollektorvæsken sirkulert ned i kollektoren ved en temperatur på 18 grader celsius. Når kollektorvæsken når bunnen av brønnen har væsken en temperatur på cirka 14,8 grader celsius og forlater kollektoren med 13,7 grader celsius på toppen av brønnen. Dette resulterer i en temperaturreduksjon på tre grader celsius ved nedstrømning og én grad celsius ved oppstrømning i u-rør kollektoren. Som indikerer at 75% av temperaturreduksjonen skjer ved nedstrømning i kollektoren. På figuren ser vi også at oppstrømningstemperaturen de siste 80 meterne er omtrent stabil, noe som betyr at det er omtrent ingen varmeoverføring de siste meterne i kollektoren. Dette skyldes termisk kontakt mellom oppstrømning og nedstrømning som resulterer i redusert nedkjøling av returvæsken (Acuña og Palm 2010).

En mulig løsning kan være å gjøre diameteren til nedstrømningsrøret større og diameteren til oppstrømningsrøret mindre. Farten til strømmingen og diameter er omvendt proporsjonale, som man kan se i formel 4.4 i delkapittel 4.6.2 *Strømning*. Grunnet en større diameter vil kollektorvæsken strømme saktere nedover, noe som vil gi en økt varmeoverføring ved nedstrømning. I tillegg vil et mindre oppstrømningsrør gi høyere fart ved oppstrømning slik at den termiske kontakten mellom oppstrømning og nedstrømning reduseres. (Hannevig / Seabrokers AS 2023). Dette er illustrert i figur 6.3.



Figur 6.3: En u-rør kollektor ved et større nedstrømningsrør og et mindre oppstrømningsrør.



Figur 6.4: Gjennomsnittstemperatur for koaksial kollektor (Acuña og Palm 2010))

Figuren 6.4 viser et diagram for en koaksial kollektor som også brukes til kjøling, der strømmingen går ned det indre røret og returnerer opp annulus. Her sirkuleres kollektorvæsken ned med en temperatur på 15,5 grader celsius. Når kollektorvæsken når bunnen er temperaturen 14,0 grader celsius, og forlater koaksial kollektoren med 12,6 grader celsius på toppen av brønnen. Grafen viser at det oppstår termisk kontakt mellom oppstrømning og nedstrømning de siste 40 meterne (Acuña og Palm 2010).

Diagrammet viser at temperaturen mellom strømmingen i annulus og borehullsveggen er omtrent lik (forskjell cirka 0.4 grader celsius). Denne minimale temperaturforskjellen mellom

annulus og borehullsveggen indikerer en effektiv varmeoverføring og lav termisk motstand i borehullet. Dette skyldes at koaksial kollektoren ligger inntil borehullsveggen. Det er dermed ønskelig å få temperaturen i annulus (blå graf) nærmest mulig temperaturen til borehullsveggen (gul graf) (Acuña og Palm 2010).

Isolasjon eller økning av tykkelsen til det indre røret er løsninger som vil minske den termiske motstanden i koaksial kollektoren enda mer. Det vil også hjelpe å isolere røret der det oppstår størst termisk kontakt, i dette tilfelle vil det hjelpe å isolere ned til 40 meters dybde (Acuña og Palm 2010).

6.4 Kollektorvæsker

I Norge er den mest vanlige kollektorvæsken en etanolbasert frostvæske, selv om disse ikke har de beste termiske egenskapene for en kollektorvæske. Internasjonalt forskes det på å finne den mest energieffektive kollektorvæsken. Over lenger tid vil effekten til en energibrønn reduseres, og denne reduksjonen er forskjellig ved ulike kollektorvæsker (Soltani, et al. 2021).

I Norge er den mest vanlige kollektorvæsken en etanolbasert frostvæske, selv om disse ikke har de beste termiske egenskapene for en kollektorvæske. Internasjonalt forskes det på å finne den mest energieffektive kollektorvæsken. Over lenger tid vil effekten til en energibrønn reduseres, og denne reduksjonen er forskjellig ved ulike kollektorvæsker (Soltani, et al. 2021).

Det har blitt gjennomført en analyse av ulike typer kollektorvæske for å kunne velge den beste kollektorvæsken og dermed optimalisere effekten til en energibrønn. For å gjennomføre dette prosjektet ble det brukt et boligbygg i Teheran, Iran. Bygningen er utstyrt med en optimal energibrønn med u-rørkollektor og blir evaluert gjennom 10 år av en programvare kalt TRNSYS (Soltani, et al. 2021).

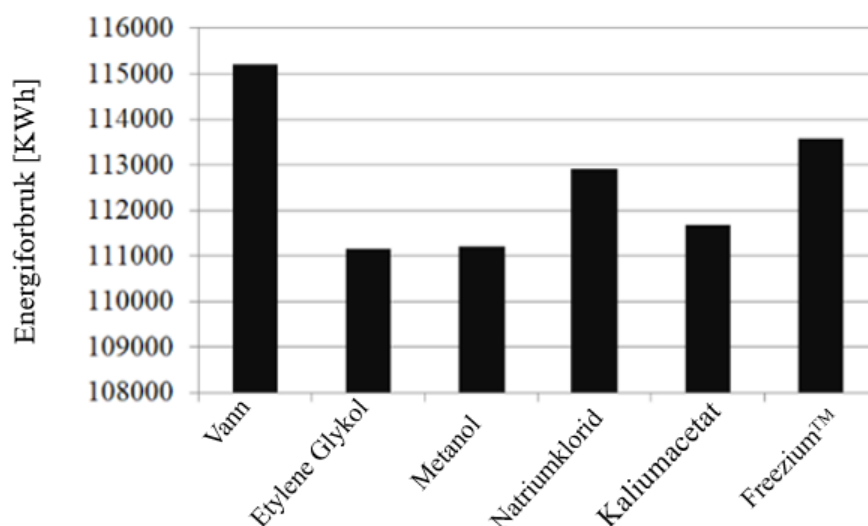
For å avgjøre hvilken kollektorvæske som er best, er det tre kriterier man ser på:

1. Lavt energiforbruk
2. Høy COP verdi
3. Lav effekt reduksjon over tid

Tabell 6.2 viser energiforbruket til ulike arbeidsmedier i en energibrønn etter 1 år og 10 år. Utfra tabellen kan man se hvor mye effekten reduseres etter 10 år.

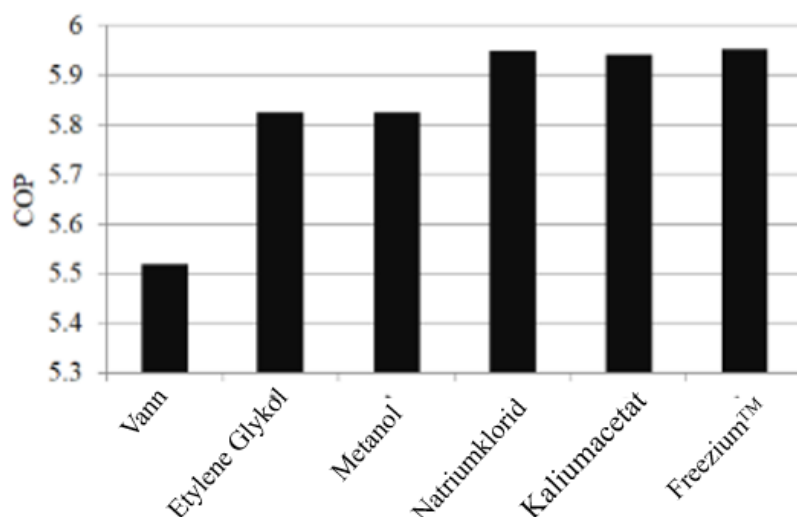
Kollektorvæske	Energiforbruk etter 1 år [KJ]	Energiforbruk etter 1 år · 10 [KJ]	Energiforbruk etter 10 år [KJ]	% økning av energiforbruk sammenliknet med energiforbruk etter 1 år · 10 [%]
Vann	41388399,05	413883990,5	414743197,6	0,207
Etylene Glykol	39969348.75	399693487.5	400177779.1	0.121
Metanol	39949493.76	399494937.6	400313236.2	0.204
Natriumklorid	40405823.04	404058230.4	406492273.8	0.598
Kaliumacetat	40144367.41	401443674.1	402074152.3	0.156
Freezium™	40876194.88	408761948.8	408853217.5	0.022

62 63 Tabell 6.4: Oversikt over energiforbruket til ulike frysevæsker over en tidsperiode hentet fra (Soltani, et al. 2021)



Figur 6.5: Energiforbruket i kWh etter 10 år hentet fra (Soltani, et al. 2021)

Ved å se på tabellen 6.2 ser vi at metanol er den kollektorvæsken med laveste energiforbruket etter 1 år, mens ved å se på energiforbruket etter 10 år er det etylene glykol som har lavest energiforbruk, se figur 6.4. Dette betyr at effekten reduseres fortere for metanol enn etylene Glykol. Ved å se på energiforbruket er etylene glykol mer gunstig. I kolonnen helt til høyre ser man at forskjellen mellom 1 år og 10 år er høyest for natriumklorid, noe som betyr at effekten reduseres fortest ved natriumklorid som kollektorvæske (Soltani, et al. 2021).



Figur 6.6: COP-verdier for ulike frysevæsker hentet fra (Soltani, et al. 2021)

Når ulike kollektorvæsker brukes endres COP-verdien til varmepumpen. COP-verdien til varmepumpen er illustrert som et søylediagram i figur 6.5. Her ser man at vann har den laveste COP-verdien på 5,52. Freezium™ har den høyeste COP-verdien ved en verdi på 5,95.

Ved å se på disse tre kriteriene er det etylene glykol som har de beste egenskapene som kollektorvæske. Dette skyldes etylene glykol sitt lave energiforbruk i tillegg til lav reduksjon i effekt over tid (Soltani, et al. 2021). Som nevnt tidligere i delkapittel 5.3 *Kollektorvæske* er derimot Etylene Glykol svært giftig og påvirker miljøet negativt. Ved å ta miljøet i betraktning vil Freezium™ være et bedre alternativ. Freezium™ har et litt høyere energiforbruk enn etylene glykol, men en enda lavere reduksjon i effekt over tid. I tillegg har Freezium™ den høyeste COP-verdien av alle kollektorvæskene.

6.5 Kostnadseffektivitet

Det er flere faktorer som påvirker kostnadene til en energibrønn, eksempelvis boreddybden, foringsrør og energibehov. Korrekt dimensjonering, konstruksjon og drift er avgjørende for lønnsomheten til en energibrønn (NGU 2023).

Prisen på boring og installasjon varierer med de geologiske forholdene og dybden på energibrønnen. Som nevnt tidligere i delkapittel 5.4.4 *Dimensjonering* avhenger brønndybden av energibehovet og mineralsammensetningen i berggrunnen. For eksempel har kalkstein dårligere varmeledningsevne enn granitt. Dermed vil det trenge en dypere brønn ved

berggrunn av kalkstein enn det trengs med granitt. Noe som betyr at det blir dyrere å installere en brønn i kalkstein (Boligsmart 2023).

Energibehovet vil også påvirke kostnadene relatert til varmepumpen og energibrønnen. Et høyere energibehov vil kreve en større varmepumpe eller en dypere brønn (Boligsmart 2023). Dette kan bety høyere kostnader ved varmepumpen fordi man trenger en varmepumpe med høyere varmeeffekt eller høyere kostnader ved brønnboringen siden den må bores dypere.

Flere bygg som ikke økonomisk egnet for bruk av energibrønner. Dette omfatter bygninger som ikke har vannbårent varmedistribusjonssystem (gulvvarme, radiatorer), noe som er en forutsetning for bruk av energibrønner. Omlegging til vannbåren varmedistribusjon i eksisterende bygg er ressurskrevende og byr på høye kostnader (Ramstad og Viak 2011). I snitt vil det koste mellom 1300-2500 kroner per kvadratmeter med innlegging av vannbåren gulvvarme (Boligsmart 2023).

Tykkelsen på løsmassedekket i boreområdet er en annen avgjørende faktor for brønnekostnadene. Ved boring i løsmasser settes det ned foringsrør i stål for å kunne stabilisere borehullet. Dette er dyrt. Det er omtrent 4 ganger dyrere å bore i løsmasse enn det er å bore i fast fjell. Noe som gjør at høy tykkelsen på løsmassedekket vil øke kostnadene betraktelig. I Norge er tykkelsen på løsmasse generelt lav, men i dalføre og deler av Østlandet, Trøndelag, Jæren og Finnmark kan tykkelsen være betydelige (NGU 2023).

Kostnad	Pris
Boring	350kr/m
Foringsrør	650kr/m
Væske-til-vann-varmepumpe	85 000-150 000 kr
Omlegging rørsystem for gulvvarme	1300-2500 kr/m

Tabell 6.5: Kostander knyttet til installering ved en energibrønn, verdier hentet fra (Boligsmart 2023)

En energibrønn er en dyr investering og totalprisen vil i det fleste tilfeller være i overkant av 250 000 kroner. Investeringen vil normalt tilbakebetales innen 8-12 år (Boligsmart 2023). Dette skyldes at energibrønnen har en jevn temperatur hele året og krever et lavere strømforbruk ved energibrønnen.

6.6 Geotermos

En utfordring man har ved mange fornybare energikilder er at man ikke kan kontrollere tilførselen i forhold til behovet som oppstår. På sommeren har man overflødig med energi, mens på vinteren er det ikke nok. Konseptet med en geotermos er å bruke grunnen som et termisk batteri og hente varme når man trenger det. I Norge har man drevet med grunnvarme i lang tid, men ikke ved så høye temperaturer man får i en geotermos. Temperaturen i en geotermos blir såpass høy at man ikke trenger en varmpumpe, men kan bruke varmen direkte (Drammen Kommune 2020) (Hannevig / Seabrokers AS 2023).

I Drammen er Norges første geotermos bygget i forbindelse med Fjell Skole og Knutepunkt Fjell. Konstruksjonen består av 100 energibrønner som er 50 meter dype. Brønnene er plassert i en sirkel med relativt tett avstand, under parkeringsplassen til skolen. For å varme opp energibrønnene på sommeren brukes to solvarmesystemer. Det brukes et solpanel på 125 kvadratmeter som lagrer høytemperert varme direkte i brønnene. I tillegg brukes det 1000 kvadratmeter med solceller som gir nok strøm til å drifte en CO₂- varmpumpe som henter varme fra uteluften og ved bruk av en tørrkjøler lagrer det nede i energibrønnene (Drammen Kommune 2020).

På vinteren hentes energien opp av energibrønnene og gir varme til et område på totalt 10 000 kvadratmeter (Drammen Kommune 2020). Vann sirkuleres gjennom energibrønnene og varmer gjennom byggets gulvvarmesystem. Vinteren 2021/2022 leverte anlegget omtrent 150 000 kWh på denne måten (Klimapartnere 2022). Siden temperaturen i geotermosen er høy trenger man kun å sirkulere vannet gjennom energibrønnene for å oppnå høy varme, uten å installere en varmpumpe. Dette gir mindre vedlikehold og krever også minimalt med strøm.

Geotermosen i Drammen er en del av et større forskningsprosjekt og vil derfor bli grundig vurdert. En svært viktig del av prosjektet er at erfaring og kunnskap skal bli overført videre til flere. Siden geotermos-prinsippet er arealeffektivt vil det være aktuelt for flere kommuner, byer og tettsteder å bygge sin egen geotermos (Drammen Kommune 2020). Konseptet er allerede i gang flere steder i Norge, og i Kolbotn har det blitt bygget en geotermos under kunstgressbanen til Kolbotn IL (Klimapartnere 2022).

6.7 Miljøpåvirkning

Energibrønner i seg selv er en svært miljøvennlig metode å varme opp bygninger på. Det kan allikevel skje uventede hendelser under boring og installasjon som fører til miljøpåvirkning.

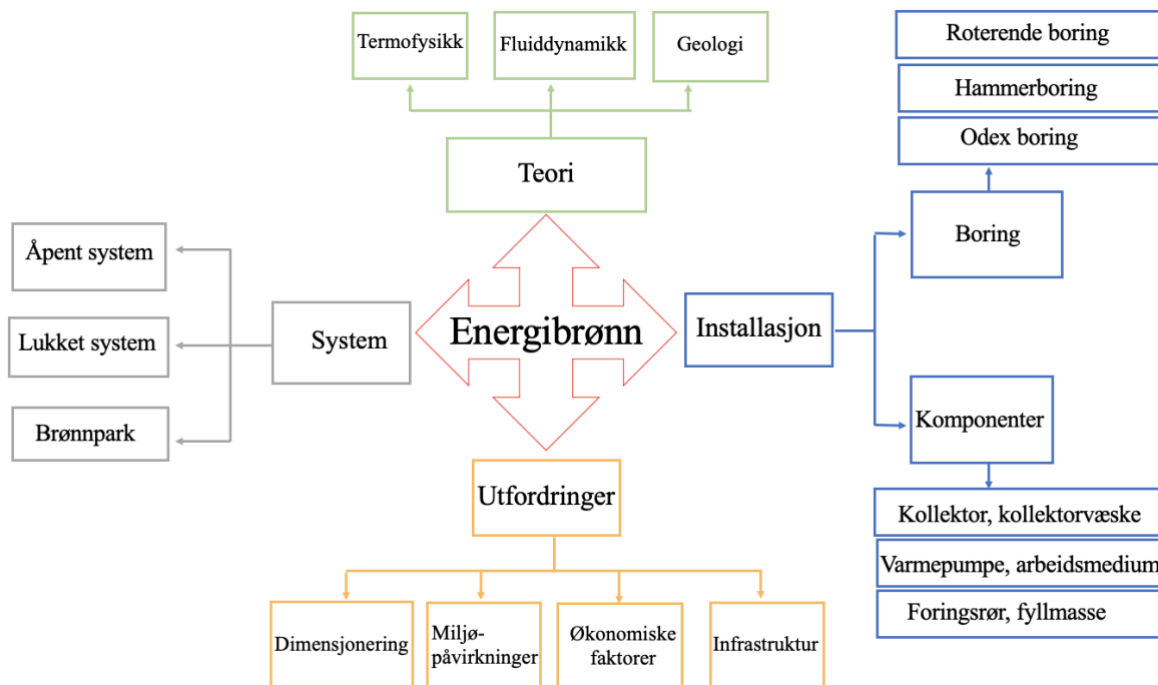
Ved boring og installering av energibrønner er det viktig at grunnvannet ikke blir forurenset. Brønnlokket skal konstrueres slik at det ikke løsner ved frost og isdannelse i brønnen, som kan føre til overflatevann lekker inn til grunnvannet (Båsum Boring AS 2014). I Norge er det ikke krav om å tette energibrønnen med fyllmasse, noe som flere andre land har for å beskytte grunnvannet (Hannevig / Seabrokers AS 2023). Dette betyr at grunnvannet i Norge har større risiko for å bli forurenset.

Spesielt brønner boret i nærheten av forurensningskilder som septiktanker, kloakkslanger og underjordiske drivstofftanker, står i fare for å forurense grunnvannet. Noen steder kan løsningen være å fylle energibrønnen med fyllmasse istedenfor grunnvann. Dette vil beskytte grunnvannet fra forurensning og gi god varmeeffekt. Som nevnt tidligere er derimot fyllmasse dyrt og vil øke kostnaden av energibrønnen betraktelig (Banks 2012) (Michigan Department of Environmental Quality 2010).

Når man velger kollektorvæske til kollektoren og arbeidsmedium til varmepumpen er miljøpåvirkning et av de første kravene man stiller. Flere arbeidsmedium og kollektorvæsker blir regulert og er gjort ulovlige fordi de er ødeleggende på miljøet eller giftige. Så lenge de ikke lekkes ut til atmosfæren eller grunnvannet, skader det ikke miljøet. Likevel er faren for en svært ødeleggende lekkasje nok til at man prøver å styre unna og bruke mindre miljøfiendtlige arbeidsmedium og kollektorvæsker (Banks 2012).

7 Avslutning

Som vi har sett gjennom denne oppgaven, er energibrønner en lovende teknologi for å utnytte jordas varmeenergi på en bærekraftig og effektiv måte.



Figur 7.1: Oversikt over en energibrønn

En energibrønn kan ha et åpent eller lukket system. Ved større bygninger benyttes det brønnparker for å varme og kjøle ned bygget. Lukkede system er det mest vanlige i Norge. Installasjon av slike brønner benytter ulike boringsmetoder og borekroner, som avgjøres ved å kartlegge geologien i området. Deretter installeres kollektoren med kollektorvæske i brønnen. Da har vi en energibrønn.

Teorien bak varmepumpe- og energibrønnsystemer er vesentlig for å utnytte systemet effektivt. I energibrønnen er varmeledningen, porøsiteten, grunnvannstrømningen og den termisk motstanden viktige faktorer som avgjør varmeoverføringen fra berggrunnen til kollektorvæsken. Sammenhengen mellom varme, arbeid og energi forklarer hvordan varmepumpen utnytter varmen som kommer fra energibrønnen.

Vi har diskutert noen av begrensningene og utfordringene knyttet til bruk av energibrønner, inkludert høye boring- og installasjonskostnader, samt potensielle miljømessige og geologiske risikoer. Det er viktig å vurdere disse faktorene nøye før man tar beslutningen om å installere

en energibrønn. Til tross for disse utfordringene har vi gjennomgått hvordan energibrønner kan være en attraktiv løsning for mange type bygninger. Med riktig design, installasjon og geologiske forhold kan systemene gi pålitelig og kostnadseffektiv oppvarming og kjøling i lang tid.

Energibrønner skiller seg fra andre fornybare energikilder fordi den, i motsetning til sol- og vindkraft, gir stabil energi hele året. Vi ser stadig i media at nye bærekraftige energikilder skaper uenighet om beliggenhet og arealbruk. Vi er nødt til å finne alternativer til fossile brensler, samtidig som man tar hensyn til natur, dyreliv og samfunnet. En fordel med energibrønner er at de ikke skaper slike konflikter. Dette skyldes at brønnen er plassert under bakken, noe som minimerer den visuelle påvirkningen på landskapet. Energibrønner vil heller ikke skape støy, forårsake forstyrrelser i dyrelivet eller ødelegge naturen.

I lys av den økende interessen for alternative og bærekraftige energikilder, var meningen med denne bacheloroppgaven å øke forståelsen for energibrønner som en effektiv og miljøvennlig løsning for oppvarming og kjøling av bygninger.

8 Kilder

- ABK-Qviller AS. 2023. *Varmevekslere og tørrkjølere*. Funnet april 27, 2023. <https://www.abkqviller.no/naringsbygg/torrkjolere-og-varmevekslere/>.
- Acuña, José. 2010. *Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchangers*. Stockholm: KTH Energy and Environmental Technology. <https://varmtochkallt.se/wp-content/uploads/Projekt/Effsys2/P08/Licenciate-Thesis-Jose-Acuna-final2.pdf>.
- Acuña, José, og Björn Palm. 2010. *A Novel Coaxial Borehole Heat Exchanger: Description and First Distributed Thermal Response Test Measurements*. Bali, Indonesia: Proceedings World Geothermal Congress.
- Allahvirdizadeh, Payam. 2020. *A review on geothermal wells: Well integrity issues*. 29 April. Funnet Mars 9, 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620340543>.
- Archer-Boyd, Alan. 2017. *Engineers drill world's hottest well hoping for clean energy eruption*. 12 April. Funnet Mars 21, 2023. <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/engineers-drill-worlds-hottest-well-hoping-clean-energy-eruption>.
- Aarnes, Halvor. 2022. *Dynamisk viskositet*. 30 November. Funnet Mars 6, 2023. <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/d/dynamisk.html>.
- . 2022. *Entropi*. 7 september. Funnet april 20, 2023. <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/e/entropi.html>.
- . 2021. *Gasslovene*. 24 August. Funnet Mars 5, 2023. <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/g/gasslovene.html>.
- Arteco. 2018. *Freezium*. Oktober. Funnet Mars 14, 2023. <https://www.arteco-coolants.com/en/products/heat-transfer-fluids/product-range/freezium>.
- AsbjørnhusBåsum Boring AS, intervjuet av Amalie Frafjord Andersen. 2023. *Borekroner* (11 April).
- Assadi, Mohsen, og Fredrik Skaug Fadnes, intervjuet av Amalie Frafjord Andersen og Sara Marlen Kolstø. 2023. *Varmepumpe* (8 Mai).
- Balkan, Elif, Kamil Erkan, og Müjgan Salk. 2017. «Thermal conductivity of major rock types in western and central Anatolia regions, Turkey.» *academic.oup.com*. 13 Juni. Funnet Februar 22, 2023. <https://academic.oup.com/jge/article/14/4/909/5108056>.
- BaneNOR. 2016. *Etterlyser flere energibrønner*. 6 Mars. Funnet Februar 28, 2023. <https://www.banenor.no/Prosjekter/prosjekter/follobanen/om-follobaneprojektet/innhold/2015/Har-du-eller-planlegger-du-a-etablere-energibronn/>.
- Banks, David. 2012. *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. Holymoor Consultancy Ltd UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Bøe, Maria Vetleseter. 2022. «energi.» *snl.no*. 16 Desember. Funnet Februar 23, 2023. <https://snl.no/energi>.
- Båsum Boring AS. 2023. «En miljøvennlig etanolbasert kuldebærer for varmpumper.» *basum.no*. Funnet Mars 13, 2023. https://basum.no/wp-content/uploads/HX_brosjyreark-1.pdf.

- Båsum Boring AS. 2014. *STANDARD ENERGIBRØNN MED LUKKET SYSTEM*. 29 august. Funnet Februar 27, 2023. <https://basum.no/fagomrader/energibronner/standard-energibronn-med-lukket-system/>.
- . 2012. *TERMISK RESPONSTEST BETALER SEG*. 10 Oktober. Funnet mars 7, 2023. <https://basum.no/fagomrader/energibronner/responstest/>.
- Beier, Richard A, José Acuna, Palne Mogensen, og Björn Palm. 2014. «Transient heat transfer in a coaxial borehole heat exchanger.» <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650514000236>.
- BLOCON AB. 2023. *EED – Earth Energy Designer*. Funnet April 26, 2023. <https://buildingphysics.com/eed-2/>.
- Boligsmart. 2023. *Hva koster bergvarme? Pris i 2023*. Funnet Mars 30, 2023. <https://www.boligsmart.no/pris/bergvarme>.
- . 2023. *Hva koster varmepumpe? Pris i 2023*. Funnet april 27, 2023. <https://www.boligsmart.no/pris/varmepumpe>.
- Bredesen, Arne M., og Gustav Lorentzen. 2021. *varmepumpe*. 6 juli. Funnet Januar 20, 2023. <https://snl.no/varmepumpe>.
- Brekke, Even. 2003. *ENERGIUTTAK FRA FJELL Et studium av data fra termisk responstesting*. Trondheim: Norges teknisk- Fakultet for ingeniørvitenskap og naturvitenskapelige universitet teknologi NTNU .
- Brekke, Even, og Kristi Midttømme. 2002. *Termisk responstesting*. Funnet Mars 8, 2023. https://www.ngu.no/FileArchive/91/termisk_responstesting_fou.pdf.
- Bryhni, Inge. 2018. *artesiske brønn*. 5 Juli . Funnet Mars 1, 2023. https://snl.no/artesisk_brønn.
- . 2020. *porøsitet*. 10 januar. Funnet februar 3, 2023. <https://snl.no/porositet>.
- Carstens, Halfdan. 2022. *Dype borehull gir mer varme*. 31 Januar. Funnet Mars 21, 2023. <https://geo365.no/dype-borehull-gir-mer-varme/>.
- Cengel, Yungus A, John M Cimbala, og Robert H Turner. 2012. *Fundamentals of thermal-fluid fourth edition*. New York: McGraw- Hill Education.
- Chiasson, A. D. 2016. *Geothermal heat pump and heat engine systems : Theory and practice*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Christensen, Arnfinn. 2006. *Se hvordan varmepumpa virker*. 23 August. Funnet Januar 19, 2023. <https://forskning.no/bakgrunn-energi-fysikk/se-hvordan-varmepumpa-virker/1022294>.
- CTC. 2023. *CTC EcoPart i600M*. Funnet april 12, 2023. <https://www.ctc.no/produkter/vaeske-vann-varmepumper/ctc-ecopart-i600m>.
- . 2017. *Hva er en inverterstyrt varmepumpe?* 27 Januar. Funnet Mars 13, 2023. <https://www.ctc.no/blog/nyheter/hva-er-en-inverterstyrt-varmepumpe>.
- Daler, Runar. 2016. «Borer Norges dypeste energibrønn.» *Anleggsmaskinen*. 30 Mai. Funnet April 12, 2023. <https://anleggsmaskinen.no/2016/05/borer-norges-dypeste-energibronn/>.
- Datt, P. 2011. «Latent Heat of Vaporization/Condensation.» Haritashya, U.K. . https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-90-481-2642-2_327.
- Department of Energy, Environment and Climate Action. 2021. *Understanding porosity and permeability*. 2 juni. Funnet januar 22, 2023.

- <https://earthresources.vic.gov.au/projects/victorian-gas-program/onshore-conventional-gas/porosity-permeability>.
- Drammen Kommune. 2020. *Unikt prosjekt med sesonglagring av solenergi*. 6 mai. Funnet april 25, 2023. <https://www.drammen.kommune.no/om-kommunen/aktuelt-arkiv/2020/unikt-prosjekt-med-sesonglagring-av-solenergi/>.
- Earth Energy Designer. 2023. *EED – Earth Energy Designer*. Funnet April 25, 2023. <https://buildingphysics.com/eed-2/>.
- Elvebakk, Harald. 2018. «Logging av dype energibrønner på Oslo Lufthavn, Gardermoen.» 6315 Torgard. https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2018/2018_020.pdf.
- Energiverket. 2023. *En energibrønn kan varme deg i 100 år*. Funnet Mars 23, 2023. <https://www.energiverket.no/en-energibronn-varmer-100-ar/>.
- Enova. 2016. *Luft-til-luft-varmepumpe*. 27 desember. Funnet april 27, 2023. <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/varmepumper/luft-til-luft-varmepumpe/>.
- . 2016. *Luft-til-vann-varmepumpe*. Funnet april 27, 2023. <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/varmepumper/luft-til-vann-varmepumpe/>.
- . 2016. *Væske-til-vann-varmepumpe*. 27 desember. Funnet april 27, 2023. <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/varmepumper/vaske-til-vann-varmepumpe-/>.
- EQUA. 2023. *IDA Indoor Climate and Energy*. Funnet April 26, 2023. <https://www.equa.se/en/ida-ice>.
- Fallet, Truls. 2021. *petroleumsbrønn*. 12 Januar. Funnet Mars 27, 2023. <https://snl.no/petroleumsbrønn>.
- Fang, Liang, Nairen Diao, Zhukun Shao, Ke Zhu, og Zhaohong Fang. 2018. *A computationally efficient numerical model for heat transfer simulation of deep borehole heat exchangers*. Shandong Jianzhu University, Fengming Road, Jinan 250001, China: ELSEVIER.
- Fjeld, Iselin Elise. 2022. *Kraften fra havbunnen*. 7 Mai. Funnet Mars 27, 2023. <https://www.nrk.no/norge/xl/kraften-fra-havbunnen-1.15854345>.
- Fjelde, Kjell Kåre. 2023. «Drilling program & Drilling problems.»
- FN-sambandet. 2022. *Klimaendringer*. 05 mai. Funnet Januar 15, 2023. <https://www.fn.no/tema/klima-og-miljoe/klimaendringer>.
- . 2020. *Montrealprotokollen*. 22 Desember. Funnet Februar 23, 2023. <https://www.fn.no/om-fn/avtaler/miljoe-og-klima/montrealprotokollen>.
- . 2020. *Parisavtalen*. 22 Desember. Funnet Januar 15, 2023. <https://www.fn.no/om-fn/avtaler/miljoe-og-klima/parisavtalen>.
- Fooladi, Erik, og Anders Isnes. 2009. *Varme og matlagning*. 18 August. Funnet Februar 2, 2023. <https://www.naturfag.no/artikkel/vis.html?tid=1227355>.
- Fossen, Haakon. 2023. *geotermisk energi*. 22 Januar. Funnet Mars 15, 2023. https://snl.no/geotermisk_energi.
- Fossen, Håkon. 2020. *permeabilitet (geologi)*. 17 mai. Funnet Mars 17, 2023. https://snl.no/permeabilitet_-_geologi.
- Galgaro, A, E Di Sipio, A Carrera, G Dalla Santa, A Ramos Escudero, J.M Cuevas, R Pasquali, B Sanner, og A Bernardi. 2022. «European and municipal scale drillability

- maps: A tool to identify the most suitable techniques to install borehole heat exchangers (BHE) probes.»
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148122005882>.
- Gehlin, S.E.A, og G Hellström. 2002. *Influence on thermal response test by groundwater flow in vertical fractures in hard rock*. Stockholm: ScienceDirect.
- Gettis, W.E, F.J Keller, og M.J Skove. 1989. *Physics Classical and Modern*. McGraw-Hill Company.
- Grøn, Øyvind. 2018. «Arbeid (fysikk).» *Store Norske Leksikon*. 22 August. Funnet Mars 17, 2023. https://snl.no/arbeid_-_fysikk.
- Grinde, Lars, Hanne Heiberg, Jostien, Skaland, Reidun Ganstø Mamen, Helga Tajet, Ketil Tunheim, og Ole Tveito. 2021. *Været i Norge*. Oslo: Meteorologisk insitiutt.
- Hammerstad, Kim Arne. 2021. *Slik fungerer vann-til-vann-varmepumper*. 09 juli. Funnet Februar 5, 2023. <https://varmepumpe.no/slik-fungerer-vann-til-vann-varmepumper>.
- Hammerstrøm, Inger Lise. 2018. *aftenposten.no*. 18 November. Funnet Februar 23, 2023. <https://www.aftenposten.no/verden/i/6nQE9W/verdnessamfunnet-reddet-ozonlaget-for-30-aar-siden-naa-stikker-kina-kjepper-i-hjulene>.
- HannevigHans Christian, intervjuet av Sara Marlen Kolstø og Amalie Frafjord Andersen. 2023. *Energibrønner* (24 April).
- Helliesen ABK- Qviller AS, intervjuet av Amalie Frafjord Andersen. 2023. *ABK-Qviller AS - Energibrønner* (8 Februar).
- Helmenstine, Anne Marie. 2022. *Critical Point Definition* . 29 september. Funnet april 12, 2023. <https://www.thoughtco.com/definition-of-critical-point-605853>.
- Helseth, Lars Egil. 2023. *damptrykk*. 1 Februar. Funnet Mars 13, 2023. <https://snl.no/damptrykk>.
- . 2024. *oppdrift*. 24 Februar. Funnet Mars 10, 2023. <https://snl.no/oppdrift>.
- . 2022. *Reynolds' tall* . 7 Desember. Funnet Februar 20, 2023. https://snl.no/Reynolds%27_tall.
- . 2022. *turbulens*. 8 Desember. Funnet Februar 20, 2023. <https://snl.no/turbulens>.
- . 2021. *viskositet*. 26 Oktober. Funnet Mars 1, 2023. <https://snl.no/viskositet>.
- Hofstad, Knut. 2019. *gradient (temperaturgradient)* . 4 desember. Funnet april 25, 2023. https://snl.no/gradient_-_temperaturgradient.
- . 2019. «grunnvarme.» *Store Norske Leksikon*. 18 September. Funnet Mars 10, 2023. <https://snl.no/grunnvarme>.
- . 2021. *masseetetthet*. 21 februar. Funnet mai 8, 2023. <https://snl.no/masseetetthet>.
- . 2021. *Varmefaktor*. 12 Oktober. Funnet Februar 21, 2023. <https://snl.no/varmefaktor>.
- Hofstad, Knut, og Tor Haakon Bakken. 2019. *akvifer*. 19 Desember. Funnet Mars 6, 2023. <https://snl.no/akvifer>.
- Institutt for biovitenskap. 2011. «Entalpi.» *Universitet i Oslo*. 4 Februar. Funnet April 21, 2023. <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/e/entalpi.html>.
- Kanoglu, Mehmet, Yunus A Cengel, og John M. Cimbala. 2020. *Fundamentals and Applications of Renewable Energy*. McGraw-Hill Education.
- Kavanaugh, Steve, og Kevin Rafferty. 2014. *Geothermal Heating and Cooling*.

- Klimapartnere. 2022. *VIRKELIGGJØR SESONGLAGRING AV SOLENERGI*. 19 september. Funnet april 25, 2023. <https://klimapartnere.no/losninger/virkeliggjor-sesonglagring-av-solenergi/>.
- Krogstad, Arne Petter, Kathrine Elshaug, Kjetil Bringaker, og Kirsti Stensland. 2002. «BRUK AV GRUNNVARME TIL OPPVARMING AV ENEBOLIGER OG NÆRINGSBYGG.» 24 April. Funnet April 5, 2023. http://www.ivt.ntnu.no/docs/igb/2002_gr2_bruk_av_grunnvarme_til_oppvarming_av_eneboliger_og_naeringsbygg.pdf.
- Lenes, Gorm. 2016. *R410A eller R32 kuldemedium*. 17 August. Funnet Februar 23, 2023. <https://www.gcmm.no/forklart-r410a-og-r32-kuldemedium>.
- Li, Baiyi, Min Zheng, Mehdi Shahrestani, og Shaoxing Zhang. 2020. «Driving factors of the thermal efficiency of ground source heat pump systems with vertical boreholes in Chongqing by experiments.» Sichuan. Funnet april 20, 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710219309787>.
- Li, Yong, Jinfeng Mao, Shibin Geng, Han Xu, og Hua Zhang. 2013. *Evaluation of thermal short-circuiting and influence on thermal response test for borehole heat exchanger*. Institute of Military Environmental Teaching & Research, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, PR China.
- Lidal, Linda Vasshus. 2018. *Boreproblemer relatert til brønnen*. 29 Juni. Funnet Mars 9, 2023. <https://ndla.no/nb/subject:1:98cbb757-a718-4275-b87a-2248cde4b58d/topic:8af47617-ac7b-4906-86ee-dd9d6092f560/resource:1:148937/185>.
- Linde. 2013. *Karbondioksid, nedkjølt, flytende*. 16 januar. Funnet april 18, 2023. https://www.linde-gas.no/no/images/Karbondioksid_nedkjølt_flytende_Biogon%20C_nedkjølt_flytende_R744%20refrigerant_1.5_tcm639-445181.pdf.
- . 2013. *SIKKERHETS DATABLAD Ammoniakk, vannfri*. 16 januar. Funnet april 18, 2023. https://www.linde-gas.no/no/images/Ammoniakk_vannfri_R717_2.2_NO_tcm639-552178.pdf.
- . 2013. *SIKKERHETS DATABLAD Difluormetan R32*. 01 januar. Funnet april 18, 2023. https://www.linde-gas.no/no/images/Difluormetan%20R32_1.3_NO_tcm639-445725.pdf.
- . 2013. *SIKKERHETS DATABLAD Propan, rent stoff*. 16 januar. Funnet april 18, 2023. https://www.linde-gas.no/no/images/Propan%20C%20rent%20stoff_2.2_NO_tcm639-481244.pdf.
- . 2014. *SIKKERHETS DATABLAD R 410A*. 12 november. Funnet april 18, 2023. https://www.linde-gas.no/no/images/R%20410A_2.0_NO_tcm639-445738.pdf.
- Mahmoud, Montaser, Mohamad Ramadan, Keith Pullen, Mohammad Ali Abdelkareem, Tabii Wilberforce, Abdul-Ghani Olabi, og Sumsun Naher. 2021. *The flexibility of bentonite makes it a good sealant to be used in GE and water well systems. Common types of bentonite used are sodium, calcium, and potassium. It is considered as one of the best fluid barriers due to its low permeability preventing flui*. London: ScienceDirect.

- Mathisen, Rune. 2018. *Strømning i rør*. 01 August. <https://ndla.no/nb/subject:1:5a5cac3f-46ff-4f4d-ba95-b256a706ec48/topic:5d631e43-f324-41ad-9cb2-16a26fc391ac/topic:a322c488-0fef-4a61-8128-cfee23b95dc4/resource:1:122074>.
- Michigan Department of Environmental Quality. 2010. «michigan.gov.» *Best Practices for Geothermal Vertical Closed-Loop Installations*. April. Funnet Mars 7, 2023. <https://www.michigan.gov/egle/-/media/Project/Websites/egle/Documents/Programs/DWEHD/Water-Well-Construction/Best-Practices-for-Geothermal-Vertical-Closed-Loop-Installations.pdf?rev=67d3b0ca05804883af4e5abedbbb6de0>.
- Midttømme, Kirsti, Bernt Olav Hilmo, og Randi Kalskin. 2000. «Kartlegging av grunnvarmepotensialet i løsmasser og berggrunn i Alvdal.» *ngu.no*. 26 Juli. Funnet Februar 23, 2023. https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2000/2000_063.pdf.
- Mol, Karoline, og Susanne Wilhelmsen. 2015. *Sammenlikning av to kollektorer for bruk i bergvarmesystemer til oppvarmings- og nedkjølingsformål ved analyse av termisk responstest*. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.
- Nævdal, Sondre Brennhovd, intervjuet av Amalie Andersen Frafjord og Sara Marlen Kolstø. 2023. *Energibrønner* (14 Februar).
- NGU. 2023. *Åpne systemer*. Funnet Mai 9, 2023. <https://www.ngu.no/grunnvanninorge/bore-en-bronn/energibronn/apne-systemer>.
- . 2023. «Begreper i berggrunnsgeologi.» *NGU*. Funnet Mai 9, 2023. <https://www.ngu.no/om-geologi/begreper-i-berggrunnsgeologi>.
- . 2023. *Boreslam og forurensning*. Funnet Mai 9, 2023. <https://www.ngu.no/geologiske-ressurser/boreslam-og-forurensning>.
- . 2023. *Brønner som påvirker hverandre*. Funnet Mai 9, 2023. <https://www.ngu.no/grunnvanninorge/bore-en-bronn/risiko/pavirkning>.
- . 2023. *Brønnparker*. Funnet Mai 9, 2023. <https://www.ngu.no/grunnvanninorge/bore-en-bronn/energibronn/brønnparker>.
- . 2023. *Energibrønn*. Funnet Mai 9, 2023. <https://www.ngu.no/grunnvanninorge/bore-en-bronn/energibronn>.
- . 2023. *Grunnvannets bevegelse*. Funnet Mai 9, 2023. <https://www.ngu.no/grunnvanninorge/alt-om-grunnvann/generelt-om-grunnvann/grunnvannsstromning>.
- . 2023. *Grunnvarme*. Funnet Mai 9, 2023. <https://www.ngu.no/emne/grunnvarme>.
- . 2020. *Grunnvarme*. 5 November. Funnet Mai 9, 2023. <https://www.ngu.no/emne/grunnvarme>.
- . 2023. *Konflikter under bakken*. Funnet Mai 9, 2023. <https://www.ngu.no/geologiske-ressurser/konflikter-under-bakken>.
- . 2023. *Lukkede systemer*. Funnet Mai 9, 2023. <https://www.ngu.no/geologiske-ressurser/lukkede-systemer>.
- NorgesEnergi. 2023. *Så mye får du i strømstøtte for mars*. 31 mars. Funnet april 27, 2023. <https://norgesenergi.no/stromsmart/statens-stromstotte-mars-2023/>.
- Novak, Jean Pierre. 2023. *Carnot heat pump (or Carnot refrigerator)*. Funnet Mai 9, 2023. <https://www.youphysics.education/heat-pumps/carnot-heat-pump/>.

- NOVAP. 2023. *Bergvarme*. 21 Februar. Funnet Mars 15, 2023.
<https://www.varmepumpeinfo.no/energikilder-for-varmepumper/bergvarme>.
- . 2023. *Energibrønn*. 2 Februar. Funnet Mars 15, 2023.
<https://www.varmepumpeinfo.no/energikilder-for-varmepumper/energibrønn>.
- . 2023. *Luft til luft varmepumpe: En komplett guide*. 12 mars. Funnet april 27, 2023.
<https://varmepumpeportalen.no/luft-til-luft-varmepumpe>.
- . 2023. *Luft-til-luft-varmepumpe*. 07 Februar. Funnet Februar 22, 2023.
<https://www.varmepumpeinfo.no/varmepumpetyper/luft-til-luft-varmepumpe>.
- . 2023. *Luft-til-vann-varmepumpe*. 09 Februar. Funnet Februar 22, 2023.
<https://www.varmepumpeinfo.no/varmepumpetyper/luft-til-vann-varmepumpe>.
- . 2023. *Nyttige begreper*. 7 Februar. Funnet Mai 10, 2023.
<https://www.varmepumpeinfo.no/verdt-a-vite-om-varmepumper/nyttige-begreper>.
- . 2023. *Slik virker en varmepumpe*. 7 februar. Funnet Februar 2023, 19.
<https://www.varmepumpeinfo.no/verdt-a-vite-om-varmepumper/slik-virker-en-varmepumpe>.
- . 2018. *Varmepumpeteknologi*. 13 Juli. Funnet Februar 23, 2023.
<https://www.novap.no/artikler/varmepumpeteknologi>.
- . 2023. *Væske-til-vann-varmepumpe*. 07 Februar. Funnet Februar 22, 2023.
<https://www.varmepumpeinfo.no/varmepumpetyper/vaske-til-vann-varmepumpe>.
- Nylund, Hilde Kari Nylund. 2023. *R32 i varmepumper*. 7 Februar. Funnet Februar 23, 2023.
<https://www.varmepumpeinfo.no/verdt-a-vite-om-varmepumper/r32-i-varmepumper>.
- Ore, Sven, og Aage Stori. 2022. *polyetylen*. 17 november. Funnet april 12, 2023.
<https://snl.no/polyetylen#-Fremstilling>.
- Ormestad, Helmut, og Bjørn Pedersen. 2022. *koking*. 9 oktober. Funnet Mars 13, 2023.
<https://snl.no/koking>.
- Pedersen, Bjørn. 2020. *arkimedesloven*. 18 November. Funnet Mars 10, 2023.
<https://snl.no/arkimedesloven>.
- . 2022. «entalpi.» *snl*. 8 september. Funnet mars 9, 2023. <https://snl.no/entalpi>.
- . 2021. *Fasediagram*. 20 juli. Funnet april 12, 2023. <https://snl.no/fasediagram>.
- . 2020. *faseovergang*. 29 desember. Funnet Mars 14, 2023. <https://snl.no/faseovergang>.
- . 2017. *varme*. 27 Oktober. Funnet April 19, 2023. <https://snl.no/varme>.
- Plastics Industry Association. 2023. *How Are Plastics Made?* Funnet april 13, 2023.
<https://thisisplastics.com/plastics-101/how-are-plastics-made/>.
- PRD Rigs. 2023. «Odex drilling.» *PRD Rigs*. Funnet April 19, 2023.
<https://prdrigs.com/odex-drilling/>.
- Ramstad, Randi Kalskin. 2017. «Energibrønner som varmekilde for varmepumper.» *tekna.no*. 26 Oktober. Funnet Februar 27, 2023.
https://www.tekna.no/contentassets/975d36ae0e7c40f986d92b129697c34d/energibrønner_norsk_kjc3b8leteknisk_forening_26.10.20171.pdf.
- Ramstad, Randi Kalskin, og Asplan Viak. 2011. *Grunnvarme i Norge - kartlegging av økonomisk potensial*. Oslo: Norges Vassdrags- og Energidirektorat .
- Rosvold, Knut A, og Knut Hofstad. 2019. *energibrønn*. 6 september. Funnet Januar 19, 2023.
<https://snl.no/energibrønn>.

- Rototec. 2023. *EED- og IDA ICE-simulering*. Funnet April 26, 2023. <https://www.rototec.no/tjenester/geoenergikonsultasjon/simulering>.
- Sandberg, Tor. 2021. *Nå vil flere bore for billigere energi*. 18 Desember. Funnet Mai 12, 2023. <https://www.dagsavisen.no/nyheter/innenriks/2021/12/18/na-vil-flere-bore-for-billigere-energi/>.
- Santa, Giorgia Dalla, Antonio Galgaro, Raffaele Sassi, Matteo Curtrera, Paolo Scotton, Johannes Mueller, David Bettermann, et al. 2020. *An updated ground thermal properties database for GSHP applications*. Funnet April 17, 2023. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0375650519301944?token=782A89BA7062FAD180ECE1ACA489C06A641E9E63FBCE5AB4F302537579D52ECC41ED0BAFDC0B3CB39AB235C8906F7FA3&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230213104050>.
- Serageldin, Ahmed A, Yoshitaka Sakata, Takao Katsura, og Katsunori Nagano. 2018. «Thermo-hydraulic performance of the U-tube borehole heat exchanger with a novel oval cross-section: Numerical approach.» Hokkaido University. Funnet Mars 2, 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890418310902>.
- Singh, Rao Martand, Abdelmalek Bouazza, og Bill Wang. 2015. «Near-field ground thermal response to heating of a geothermal energy pile: Observations from a field test.» *Sciencedirect.com*. desember. Funnet mars 8, 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080615001651>.
- Soltani, M, Pooya Farzanehkhameneh, Farsahd Moradi Kashkooli, Armughan Al-Haq, og Jatin Nathwani. 2021. *Optimization and energy assessment of geothermal heat exchangers for different circulating fluids*. ScienceDirect.
- Sorteberg, Asgeir. 2023. «folk.uib.no.» *Kapittel 2 Energi, varme og temperatur*. Funnet Februar 23, 2023. https://folk.uib.no/ngfhd/GEOF100/NOTATER-METEOROLOGI/GEOF100_Kap02.pdf.
- Spjeldnæs, Nils, og Håkon Fossen. 2023. *Geotermisk energi*. 22 Januar. Funnet Mai 9, 2023. https://snl.no/geotermisk_energi.
- SPRSUN. 2021. *How Do Inverter Heat Pumps Work?*. 29 Januar. Funnet Mars 13, 2023. <https://sprsunheatpump.com/How-Do-Inverter-Heat-Pumps-Work-id3505791.html>.
- Stene, Jørn. 2012. «VARMEPUMPER.» *ivt.ntnu.no*. Funnet april 18, 2023. <http://www.ivt.ntnu.no/ept/fag/tep4120/innhold/Laboppgaver/Varmepumpe%20Introforelesning.pdf>.
- Stene, Jørn, Trond Andresen, og Jacob Stang. 2004. «CO₂-varmepumper for oppvarming og kjøling av kontorbygg.» *sintef.no*. Juni. Funnet Mars 7, 2023. <https://www.sintef.no/globalassets/upload/smartbygg/wp3/co2-varmepumper-for-oppvarming-og-kjoling-av-kontorbygg.pdf>.
- Stensrud, Gjermund. 2019. *Geotermisk energi – Fremtidens energikilde?* 18 November. Funnet Februar 27, 2023. <https://xn--strm-ira.no/geotermisk-energi>.
- Store Norske Leksikon. 2022. *etanol*. 6 januar. Funnet april 13, 2023. <https://snl.no/etanol>.
- . 2019. *trykk (fysikk)*. 31 Oktober. Funnet Mars 10, 2023. https://snl.no/trykk_-_fysikk.
- Tanum, Julie. 2019. *Heat Transport in Geothermal Wells – A Comparison of Laboratory-Scale and Full-Scale Construction at Bryne VGS*. Stavanger: Faculty of Science and technology.

- Toldnæs, Jens Petter. 2022. *globale oppvarmingspotensialer*. 13 januar. Funnet april 19, 2023. https://snl.no/globale_oppvarmingspotensialer.
- Tollan, Arne. 2023. *Grunnvann*. 22 januar. Funnet Mars 5, 2023. <https://snl.no/grunnvann>.
- Turgeon, Andrew, og Elizabeth Morse. 2022. *Geothermal Energy*. 20 mai. Funnet februar 27, 2023. <https://education.nationalgeographic.org/resource/geothermal-energy>.
- UNEP Copenhagen Climate Centre. 2021. «Emissions Gap Report 2021.» Funnet Januar 10, 2023. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021>.
- Viak, Oslo Economics / Asplan. 2020. «Kartlegging og vurdering av potensial for effektivisering av oppvarming og kjøling i Norge.» august. Funnet Februar 24, 2023. https://publikasjoner.nve.no/eksternrapport/2020/eksternrapport2020_08.pdf.
- Vincent Thue, Jan. 2019. *varmeovergangstill*. 16 juli. <https://snl.no/varmeovergangstill>.
- Wang, Ji, Martin Belusko, Michael Evans, Ming Liu, Chunrong Zhao, og Frank Bruno. 2022. *A comprehensive review and analysis on CO2 heat pump water heaters*. 2 Juni. Funnet Mars 7, 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174522001003#b0065>.
- Øyås, Ove. 2011. «KJ1042 Grunnleggende termodynamikk Oppsummering.» 18 Mai. Funnet Mars 12, 2023. <https://folk.ntnu.no/haavartl/KJ1042%20Termodynamikk%20GK/Kompendie%20KJ1042,%20Ove%20%20C3%98y%C3%A5s.pdf>.
- Øyro, Gunnar. 2018. *Oppdrift og Arkimedes sin lov*. Funnet Mars 10, 2023. <https://www.oyro.no/oppdrift.html>.
- Zohuri, Bahman. 2018. *Physics of Cryogenics*.