



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2019 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Redusert elektrisitetsforbruk ved hjelp av sesonglagring av solvarme og varme fra mikrobølgeassistert pyrolyse

Håvard Lende Sørbråten
Miljøfysikk og fornybar energi

FORORD

Jeg vil takke min veileder Petter H. Heyerdahl for å ha stått til disposisjon gjennom skrivingen av denne masteroppgaven. Han introduserte meg for et utrolig spennende fagområde og bidro med tips og inspirasjon underveis. Jeg vil også takke Wilhelm Huus-Hansen for god hjelp og flere spennende møter.

Denne masteroppgaven utgjør mine siste 30 studiepoeng i studieretningen miljøfysikk og fornybar energi ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet.

Spesielt stor takk til Jane som har støttet meg gjennom hele studietiden.

SAMMENDRAG

Det er tydelig interesse for å redusere strømforbruket i bygninger, noe som kommer frem i virkemidlene som har blitt innført for å oppnå dette. Omkring 40 % av energiforbruket i Norge går til bygninger [3], og i en gjennomsnittlig enebolig går rundt 80 % av strømforbruket til oppvarming [4]. For å senke energibruken er bygg et logisk sted å starte.

I denne oppgaven utforskes muligheten for å erstatte elektrisk eller annen oppvarming i bygg med varme fra alternative kilder. Dette gjøres ved å velge to teknologier for varmeproduksjon og analysere disse under aktuelle driftssituasjoner. Solvarme velges som varmekilde til boliger, og mikrobølgeassistert pyrolyse velges som en mer bedriftsorientert metode for varmeproduksjon. Til solvarmeanlegget trengs et system for å lagre produsert varme fra sommer til vinter, og til dette velges sesonglagring av varme med borehullsbrønner. For å utforske systemet benyttes et teoretisk eksempel for et boligområde med 50 hus.

Sammenlikning gjøres av hus bygget etter nye forskrifter, og mindre isolerte hus som benytter solfangning. Det blir funnet at anlegget med solfangst blir 22 millioner kroner dyrere enn om boligene ble bygget etter nye forskrifter, men merkostnaden kan tjenes inn etter 10 år. Det er da 20 år igjen av den antatte levetiden til anlegget. Reduksjonen i klimagassutslipp gjennom lavere strømforbruk gjør at dette systemet er mer klimavennlig enn bygg som varmes opp med elektrisitet. Mikrobølgeassistert pyrolyse utforskes med en mulighetsanalyse for sluttbehandling av råtnerest på vannrenseanlegget VEAS. Med den oppgitte brennverdien til årlig mengde råtnerest vil anlegget være selvforsynt med energi, og produsere 6 *GWh* elektrisitet og 6,4 *GWh* høytemperatur varme. 3,2 *GWh* varme kan gjenvinnes med kondenser og varmeveksler. Anlegget kan altså betjene varmebehovet til 1260 TEK17-boliger med 150 m^2 BRA, eller ca. 96 100 kvadratmeter kommunale- og forretningsbygg. salget vil gi rundt 11 millioner kroner i inntekt per år. Den årlige inntekten kan økes ved å benytte sesonglagring av varme for å lagre varmen fra sommer til vinter, og selge hele varmemengden når prisen er høy. Det er ikke kjent om gjenvinning av stoffer fra råtneresten er mulig med denne teknologien.

ABSTRACT

There's an obvious interest for reducing the energy usage in buildings, something which becomes apparent by looking at the measures that has been introduced to achieve this. In Norway buildings are responsible for about 40 % of the total energy consumption [3], and in an average single family home about 80 % of the electricity usage goes to heating [4]. To lower the total energy consumption, buildings seem to be a logical place to begin.

In this paper, the possibility of replacing electric heating with heat from alternative sources is explored. This I done by choosing two technologies for heat production and analyzing these closer. Solar heat is chosen for heating of homes, and microwave assisted pyrolysis is chosen as a technology more suited for central heat production and use in businesses. For a solar heat plant to be able to provide heat year round, it needs to be integrated with a system that can delay usage of the produced heat from summer to winter. For this, seasonal heat storage with borehole thermal energy storage is chosen. To explore this, a theoretical example is used in which 50 single family homes is to be constructed either with modern insulation standards or with less insulation, but are maximized for solar heat collection and are connected to a communal heat storage. If the less insulated homes with solar heat collectors are built, the price will be about 22 million NOK more expensive than the alternative, but by reduced electricity use and sales of excess heat that sum in earned back in 10 years. This leaves 20 years left of the systems expected lifetime. The reduced emissions of climate gases makes this system more environmentally friendly than the modern houses heated by electricity.

Microwave assisted pyrolysis is explored by a viability study where it's used as waste disposal system at the water cleaning plant VEAS. The system will be self sustaining, and the yearly production will be 6 GWh electricity and 6,4 GWh of high temperature heat. This amount of energy is enough to supply 1260 modern houses, or 96 100 square meters of communal- or office buildings with their yearly heat demand. Yearly income from sales can reach 11 million NOK. This amount can be increased by incorporating seasonal heat storage with the system. The recovery of certain substances from the waste is of interest to the company, but with this technology it's unknown whether this is possible.

INNHALDSFORTEGNELSE

Forord	i
Sammendrag.....	ii
Abstract.....	iii
1 Innledning	9
1.1 Bakgrunn.....	9
1.2 Problembeskrivelse	10
2 Teori.....	11
2.1 Termodynamikk	11
2.1.1 Varmeroverføring.....	11
2.1.2 Overføringsmekanismer	11
2.2 Energibehov	12
2.2.1 Oppvarming av bolig	13
2.2.2 Oppvarming av kommunale bygg, forretninger og industri.....	13
2.2.3 Snøsmelting	13
2.3 Solenergi.....	13
2.3.1 Innstrålt energi.....	14
2.3.2 Solfanger	16
2.3.3 Flatplatesolfanger	16
2.3.4 Virkningsgrad flatplatesolfanger	17
2.3.5 Solfanging til ulike boligtyper	18
2.3.6 Solfangeres helning.....	19
2.3.7 Solfangere i svært høye og lave temperaturer	20
2.3.8 Levetiden til flatplatesolfangere	20
2.3.9 Meteonorm	21
2.4 Varmelagring	21
2.4.1 Bakken som varmelager	21

2.4.2	Bakkens termiske egenskaper.....	22
2.4.3	Geologi.....	22
2.4.4	BHE.....	26
2.4.5	BTES.....	28
2.4.6	Dimensjonering av brønnpark	28
2.5	Mikrobølgeassistert pyrolyse	30
2.6	VEAS.....	33
2.7	Økonomi	33
2.7.1	Solfanger	33
2.7.2	Økonomisk støtte til solfanger og vannbåren varme	33
2.7.3	BTES.....	34
2.7.4	MAP.....	34
2.7.5	Strømpriser	34
2.8	Miljø og klima.....	35
2.8.1	Solfanger	35
2.8.2	BTES.....	35
2.8.3	Elektrisitet	35
3	Metode	36
3.1	Energibehov	36
3.1.1	TEK-krav.....	36
3.1.2	Oppvarming av bolig	37
3.1.3	Oppvarming av kommunale bygg, forretninger og industri.....	38
3.1.4	Snøsmelting	39
3.2	Solenergi.....	39
3.2.1	Innstrålt energi.....	39
3.2.2	Solfanger	40
3.2.3	Solfanging til ulike boligtyper.....	40

3.3	Sesonglagring av varme i BTES	41
3.3.1	Geologi.....	41
3.3.2	Kollektor	41
3.3.3	Opplading av brønnpark.....	42
3.4	MAP	42
3.5	Eksempel 1 - Solfangere og BTES som varmesystem for nytt boligområde hvor boligene bygges etter gammel forskrift.....	42
3.5.1	Boligene	43
3.5.2	Varme fra solfangere.....	43
3.5.3	Varmebehov	43
3.5.4	BTES.....	43
3.5.5	Økonomi.....	44
3.5.6	Klima og miljø.....	45
3.6	Eksempel 2 – Mulighetsanalyse for MAP som sluttbehandling av råtnerest	46
4	Resultater	48
4.1	Energibehov	48
4.1.1	TEK-krav.....	48
4.1.2	Oppvarming av bolig	48
4.1.3	Oppvarming av kommunale bygg, forretninger og industri.....	49
4.1.4	Snøsmelting	49
4.2	Solenergi.....	50
4.2.1	Innstrålt energi.....	50
4.2.2	Solfanging til ulike boligtyper	50
4.2.3	Levetiden til flatplatesolfanger	51
4.3	Sesonglagring av varme i BTES	52
4.3.1	Geologi.....	52
4.3.2	Kollektor	52

4.4	MAP	52
4.5	Eksempel 1 - Solfangere og BTES som varmesystem for nytt boligområde hvor boligene bygges etter gammel forskrift.....	52
4.5.1	Boligene	52
4.5.2	Varme fra solfangere.....	53
4.5.3	Varmebehov	53
4.5.4	BTES.....	55
4.5.5	Økonomi.....	56
4.5.6	Klima og miljø.....	61
4.5.7	Oppladningstid.....	62
4.6	Eksempel 2 – Mulighetsanalyse for MAP som sluttbehandling av råtnerest	63
5	Diskusjon	65
5.1	TEK-krav	65
5.2	Oppvarming av bolig.....	65
5.3	Oppvarming av kommunale bygg, forretninger og lett industri	65
5.4	Snøsmelting.....	65
5.5	Solenergi.....	66
5.5.1	Solfanger	66
5.5.2	Solfanging til ulike boligtyper.....	66
5.5.3	Levetiden til flatplatesolfanger.....	66
5.6	Sesonglagring av varme i BTES	66
5.6.1	Geologi.....	66
5.6.2	Kollektor	66
5.7	Eksempel 1 - Solfangere og BTES som varmesystem for nytt boligområde hvor boligene bygges etter gammel forskrift.....	67
5.7.1	Boligene	67
5.7.2	Varme fra solfangere	67
5.7.3	Varmebehov.....	67

5.7.4	BTES.....	67
5.7.5	Økonomi.....	67
5.7.6	Klima og miljø.....	69
5.8	Eksempel 2 – Mulighetsanalyse for MAP som sluttbehandling av råtnerest	70
6	Konklusjon	72
7	Kilder	74

1 INNLEDNING

1.1 BAKGRUNN

Med dagens elektrifisering av samfunnet og en voksende befolkning vil det stadig økende energibehovet bare bli større. For å motvirke denne trenden har det blitt innført virkemidler som krav til energieffektivitet i nye boliger, og AMS-målere har gjort det mulig med effekttariffer på strømbruken. Det er altså stor interesse for å senke elektrisitetsforbruket i bygg. En gjennomsnittlig eneboligs elektrisitetsforbruk er fordelt slik at i underkant av 80 prosent av strømmen går til oppvarming og varmtvann[4], så for å senke totalt forbruk er dette et logisk sted å begynne. Her har også byggteknisk forskrift tatt steg, og strenge energikrav fører til at det i nye bygg må brukes store mengder isolasjon, avanserte materialer, og tiltak for lufttetting. Slike tiltak er effektive for å senke varmetap fra boliger, men det gjør dem også dyrere, og byggeprosessen tar lengre tid. Det har blitt estimert at innføringen av TEK07 førte til en prisstigning på nye boliger på omtrent 3000 kroner per kvadratmeter [5]. At strengere krav førte til høyere pris var forutsigbart, men for kjøpere er ikke dette en positiv utvikling. En annen måte å angripe problemet på er å produsere nok varme fra alternative kilder til at bygg kan holdes varme selv uten elektrisk oppvarming eller strenge krav til energieffektivitet.

Varme kan hentes fra mange steder for eksempel ved at spillvarme fra industri gjenvinnes, et riktig dimensjonert solvarmeanlegg kan levere varme til sin nabo, og varmepumper kan brukes for å få mer varme for strømmen. Potensialet til alternative kilder til varme for oppvarming av bygg utforskes ved at det velges ut to teknologier som skal undersøkes nærmere. Til oppvarming av boliger velges solfangere som produsent av varme. For at denne teknologien skal kunne dekke en boligs varmebehov gjennom hele året er et system for lagring av varme nødvendig for å utsette bruken av produsert varme fra sommer til vinter. En teknologi for sesonglagring av varme er en brønnpark av borehullsbrønner (BTES) som benytter massen i berggrunnen til å lagre varme. For en mer sentralisert produksjon av varme velges et system for avfallsbehandling. Mikrobølgeassistert pyrolyse (MAP) bruker avfall som råstoff og produserer olje, gass og kull som kan selges eller forbrennes. Forbrenning gir produksjon av varme og elektrisitet, og hvis store mengder avfall behandles vil store mengder varme kunne sendes til bygg for oppvarming.

1.2 PROBLEMBESKRIVELSE

For å utforske verdien av et solvarmesystem med solfangere og sesonglagring av varme skal det i denne oppgaven ses på to hovedområder for å finne ut om løsningen er et reelt alternativ.

- I hvilken grad ulike boligtyper kan være selvforsynt med varme fra solfangere, og om hus kan bygges etter eldre byggetekniske forskrifter og fortsatt produsere tilstrekkelig varme.
- Om boliger som benytter solvarme blir økonomisk lønnsomme i forhold til boliger bygd etter nye forskrifter, og hvordan klimaregnskapet vil se ut med dette systemet.

Gjennom et teoretisk eksempel med et nabolag som deler varmelager skal det skapes oversikt over hva som kan forventes av denne typen solvarmesystem. Det skal også undersøkes om systemet kan utnyttes i alle situasjoner eller kun i spesialtilfeller.

MAP utforskes også gjennom et eksempel, men her i en reell situasjon. Det gjøres med en mulighetsanalyse på VEAS vannrenseanlegg i Asker, hvor det skal undersøkes hvorvidt det er aktuelt å anvende MAP som sluttbehandling av råtnere etter biogassutvinning.

2 TEORI

I dette kapittelet forklares viktige mekanismer, begreper, formler og verdier som brukes i oppgaven.

2.1 TERMODYNAMIKK

2.1.1 Varmeoverføring

Varme kan overføres ved konduksjon, konveksjon og stråling. Av disse er det kun stråling som virker i vakuum, men for systemer med væsker og faste stoffer i kontakt med hverandre er det konduksjon og konveksjon som er de største bidragsyterne til varmeoverføring.

2.1.2 Overføringsmekanismer

Konduksjon er varmeoverføring ved berøring, også kalt varmeledning. Dette foregår ved at molekyler kolliderer og følgelig overfører deler av sin indre energi mellom seg. Overføringen skjer over en temperaturgradient mellom to materialer i kontakt eller innad i et materiale, og varmeenergien forflytter seg fra høy temperatur til lav temperatur. Varmeledning beskrives gjennom formelen

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{T_1 - T_2}{x} \quad [W] \quad \text{formel 1}$$

Hvor \dot{Q} er varmestrømmen, k er materialets termiske konduktivitet, A er kontaktarealet mellom kald og varm side, T_1 og T_2 er temperaturen på hver side av temperaturgradienten, og x er avstanden mellom områdene med temperaturene T_1 og T_2 . Termisk konduktivitet beskriver et materiales evne til å lede varme gjennom konduksjon, og er en materialkonstant. Termisk diffusivitet er et mål på hvor fort varme spres i et materiale og er definert som

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad \text{formel 2}$$

Hvor α er materialets termiske diffusivitet, k er den termiske konduktivitet til materialet, ρ er massetettheten, og C_p den spesifikke varmekapasiteten ved konstant trykk. U-verdi er et mål på mengde varme som krysser et flateareal per tidsenhet gitt en temperaturdifferanse på hver side av flaten. Den har enheten W/m^2K og brukes ofte til å beskrive varmetapet fra vegger, gulv og tak i hus.

Konveksjon er varmeoverføring som følge av at molekyler forflytter seg i et volum. Det skilles mellom naturlig og tvungen konveksjon. Konveksjon er naturlig når

temperaturforskjeller gir ulik tetthet i deler av et materiale og fører til en massestrøm. Dette er tilfellet når varm væske stiger og kald væske synker. Konveksjon er tvungen når den forårsakes av at ytre krefter virker på en væske. Dette skjer for eksempel når en pumpe eller vifte skrur på. Varmeoverføring fra en flate gjennom konveksjon beskrives av Newtons kjølingslov som

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad [W] \quad \text{formel 3}$$

Hvor h er konveksjonskoeffisienten til flaten, A er arealet til overflaten, T_s er overflatetemperaturen og T_∞ er temperaturen så langt ut i fluidet at overflatetemperaturen ikke lenger yter påvirkning.

Stråling avgis fra alle objekter som har en temperatur over absolutt null. Normalt vil strålingen ligge i det infrarøde spekteret, men når temperaturen blir høy nok vil materialet gløde i spekteret for synlig lys. Boltzmanns lov beskriver varmestrømmen fra et legeme i form av stråling som følger

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon\sigma A(T^4 - T_a^4) \quad [W] \quad \text{formel 4}$$

Hvor ε er emissiviteten til legemet, σ er Boltzmanns konstant, A er arealet det stråles ut fra, T er legemets temperatur, og T_a er temperaturen til omgivelsene. Boltzmanns konstant er $1,38064852 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$. Legemets emissivitet beskriver dets strålingsevne. Det er definert med forholdet mellom energien det stråler ut og energien et sort legeme stråler ut under samme forhold. Et sort legeme har altså emissivitet $\varepsilon = 1$.

2.2 ENERGIBEHOV

I bygg vil det i større eller mindre grad alltid være en pågående varmeoverføring mellom huset og omgivelsene. For å opprettholde en jevn innetemperatur må tilførselen av varme være stor nok til å dekke varmetapet gjennom tak, gulv, vegger, vinduer og dører. Hvor stort dette varmetapet er varierer etter byggets U-verdi.

I byggt teknisk forskrift, TEK, settes det krav til energieffektiviteten i nye bygg. Det beskriver øvre grense for tilførsel av energi som skal være nødvendig i bygget. Det omtales heretter som energikrav. For å tilfredsstillere energikravene bygges det tette bygg slik at varmetapene til omgivelsene blir små. Det trengs da lite tilført varme for å opprettholde en behagelig innetemperatur, og det årlige energibehovet til en bolig senkes.

2.2.1 Oppvarming av bolig

For å oppfylle beboernes krav om komfort må det i boliger holdes varmt hele året. Det kreves energi for å opprettholde temperaturen i hjemmet, og mengden energi kommer an på byggets type, alder og hvor godt det er isolert. I blokker har leilighetene 3 til 4 andre leiligheter som direkte nabo, noe som begrenser varmetapet til å skje gjennom 1 til 3 flater. Behovet for tilførsel av varme i blokkleiligheter blir på grunn av dette mindre enn i for eksempel eneboliger. Det er også store variasjoner i energibruk innad i boligtypene på grunn av ulik størrelse, tetthet i byggene og fordi man har ulike syn på hva som skal til for at det skal være komfortabelt. Energien som brukes i boliger kan komme fra ulike kilder, men felles for alle boliger er elektrisitetsbruken til alle dagligdagse ting som lys, komfyr, tørketrommel etc. For å dekke varmebehovet derimot kan mange kilder utnyttes. Store deler av oppvarmingen av norske hjem skjer med elektrisitet, men også varmepumper, vedfyring og fjernvarme er blant de mange alternative løsningene som kan brukes.

2.2.2 Oppvarming av kommunale bygg, forretninger og industri

For kommunale bygg, forretninger og industri varierer energibehovet etter byggets formål. En barnehage for eksempel vil ha et energiforbruk som i stor grad forårsakes av oppvarming, mens i tung industri vil en stor del av forbruket gå til operasjon av maskineri. Også innad i kategorier vil forbruket variere etter lokale forhold, størrelsen på bygget og personene som drifter det.

2.2.3 Snøsmelting

For å holde gangveier, trapper og oppkjørsler is- og snøfrie hele året kan varmeinstallasjoner i bakken benyttes. Det kan bestå av varmekabler eller vannbåren varme i rør som legges i sløyfer i trappen eller under asfalten. Et slikt anlegg kan styres manuelt eller bruke sensorer for temperatur eller snøfall. Energiforbruket til et slikt anlegg varierer etter hvor det befinner seg, værforholdene på stedet og hvordan det styres.

For å holde bakken bar har det et effektbehov som varierer fra 175 W/m^2 til 350 W/m^2 med lavest behov i Sør-Norge og høyest i Nord-Norge [6]. En effektbruk på dette nivået oppnår treg snøsmelting. For rask, eller momentan, snøsmelting trengs en høyere effekt. Effekten bør da ligge i intervallet fra 800 W/m^2 til 1000 W/m^2 .

2.3 SOLENERGI

Gjennom fusjon i solens kjerne frigjøres det store mengder energi som stråles ut i rommet i form av elektromagnetisk stråling. Jorden mottar konstant en del av denne energien, og

irradiansen som treffer atmosfærens ytterste lag kalles solarkonstanten. Solen har nærmest konstant utstråling av energi så irradiansen til Jorden endrer seg lite, men avstanden mellom Jorden og Sola fører til noe variasjon. Den ellipseformede banen Jorden har rundt Sola fører til en årlig variasjon i solarkonstanten på $\pm 3,4\%$ [7]. Solarkonstanten er funnet til å være 1367 W/m^2 .

2.3.1 Innstrålt energi

Til tross for at irradiansen ytterst i atmosfæren er nær konstant har irradiansen ved bakkenivå store variasjoner. På veien gjennom atmosfæren vil strålingen oppleve refleksjon, spredning og absorpsjon. Hvor mye av disse mekanismene den utsettes for kommer i stor grad an på hvor mye atmosfære den må gjennom før den treffer en flate nær bakken. Når solen står i senit må strålingen gjennom den minste mulige mengden luft for å nå flaten. Med økende vinkel til senit øker også mengden atmosfære strålingen må gjennom, og da også effekten fra tapsmekanismene. Dette beskrives gjennom størrelsen air mass (AM). AM er definert til å være

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad \text{formel 4}$$

Hvor θ er vinkelen mellom solinnstrålingen og senit. Utenfor atmosfæren brukes AM0, altså irradiansen før noen tapsmekanismer har tatt effekt. Når solen står i senit må strålingen gjennom det som betegnes som én luftmasse, og dette kalles AM1. Solens posisjon på himmelen varierer syklisk. Mens Jorden roterer i løpet av dagen vil solen bevege seg over himmelen, og gjennom året vil vinkelen til Jordens rotasjonsakse relativt til solen endres. Nærmere polene vil denne effekten være større enn mot ekvator, og det kan forventes lavere innstrålt energimengde i disse områdene. Hvor mye energi en flate på bakkenivå mottar i Norge varierer etter hvor i landet man befinner seg, med mest innstrålt energi på Sør- og Østlandet som illustrert i figur 1.



Figur 1: Innstrålt energi på en horisontal flate i Norge gitt i watt-timer per kvadratmeter per dag for januar (venstre) og juli (høyre) [8].

Foruten astrometriske effekter har også lokale forhold stor betydning for endelig irradians etter tapsmekanismer. AM gir en beskrivelse av innstrålt effekt etter tap i atmosfæren, men uten å regne med andre faktorer som kan bidra til lavere irradians på bakken. Blant annet skyer og forurensning vil bidra med større tap, mens horisonthevende og skyggende elementer vil totalt fjerne innstråling deler av dagen. For å få en nøyaktig beregning av irradians må altså lokal topografi og metrologi medberegnes.

Den totale mengden innstrålt energi på en flate vil bestå av noe direkte stråling og noe diffus stråling. Direkte stråling er den strålingen som går uhindret gjennom atmosfæren. Den strålingen som spres i luften kalles diffus. Også strålingen som reflekteres i bakken, vannet, bygninger eller andre objekter før den treffer flaten betegnes som diffus. Den totale mengden mottatt strålingsenergi kalles global innstråling.

Hvor stor andel av den innkommende strålingen som absorberes av en flate kommer blant annet an på vinkelen mellom innkommende stråling og flaten. Er flaten parallell med den direkte strålingen vil kun den diffuse delen av den globale strålingen absorberes. Maksimal mengde absorpsjon forekommer når strålingen har innfallsvinkel normalt på flaten. Også flatens og omgivelsenes albedo påvirker mengden absorbert stråling. Albedo beskriver

mengden stråling som reflekteres fra en flate med et tall mellom 0 og 1 hvor 0 betyr at all stråling absorberes, mens 1 beskriver en flate som reflekterer all innkommende stråling.

2.3.2 Solfanger

En solfanger har som oppgave å varme opp vann eller en annen energibærer ved å bruke energien som stråles fra solen slik at varmen enkelt kan fraktes og utnyttes der den behøves. For å sirkulere energibæreren i rørene kan det brukes aktive eller passive systemer. Et aktivt system benytter pumper som drivkraft for sirkulasjon, og man oppnår da stor frihet i utformingen av systemet fordi høydeforskjeller og avstand enkelt kan overkommes med pumpekraft. Det at systemet behøver pumper fører til et system med høyere krav. Det behøves strømtilkobling, og fordi det opereres med trykkforskjeller øker behovet for tetthet i rør og koblinger. Et passivt system er en enklere form for solfangning. Som drivkraft for sirkulasjon brukes tetthetsforskjellene i arbeidsmediet som oppstår ved temperaturdifferanser. For at dette skal skape sirkulasjon må systemet bygges på en slik måte at lagring eller bruk av varmen foregår på et høyere plan enn solfangningen.

Som energibærer er det normalt å benytte vann. Solfanging til luft benyttes også, men er mindre vanlig i Norge. To teknologier for solfangning som normalt brukes er flatplate solfangere og vakuumsolfangere. Vakuumsolfangere opererer med kollektorflaten i vakuum for å minimere varmetap fra kollektorflaten. Dette gjør at virkningsgraden blir høy, men det krever også kostbar produksjon som fører til et dyrere produkt. I denne oppgaven er det flatplate solfanger som utforskes.

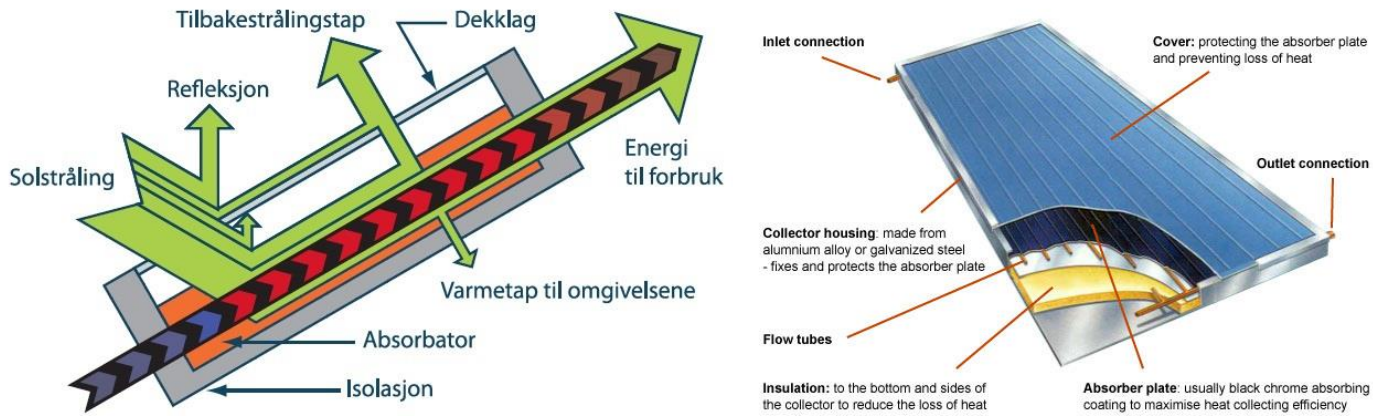
2.3.3 Flatplatesolfanger

En flatplatesolfanger består av en plate som fungerer som fangstflate for solenergien. I billige solfangere kan denne være av plast, men materialer med høyere varmeledningsevne egner seg bedre til formålet. På platen er det montert rør som en energibærer kan sirkulere i, og hvis det ønskes mindre tap plasseres det hele i en isolert kasse med et dekkglass på forsiden.

Solfangere kan monteres på stativ på eget område eller de kan monteres på soleksponerte bygningsoverflater. Tak og vegger kan utnyttes, og noen solfangere kan erstatte takstein.

Når solstråling treffer solfangeren vil strålingen gå gjennom det gjennomsiktige dekket før den absorberes av platen. Energien blir da omgjort til varme, og denne ledes gjennom platen til arbeidsmediet som sirkulerer i røret. Vann er enkelt og billig å bruke som energibærer i et system som dette. Det oppvarmede vannet sendes dit det skal utnyttes, for eksempel til

varmtvannsbereider, gulvvarme eller lignende. Vannet kjøles ned mens det gir fra seg den absorberte energien før det igjen føres til kollektoren i solfangeren. Flatplatesolfanger og energistrøm avbildes i figur 2.



Figur 2: Skisse over energistrømmen i en flatplatesolfanger [9] og hvordan den bygges opp [10].

Den enkle oppbyggingen til flatplatesolfangeren gjør at den er billig å produsere, og at den tåler bruk over lang tid.

2.3.4 Virkningsgrad flatplatesolfanger

Virkningsgraden til en solfanger varierer med ønsket temperatur på arbeidsmediet, temperaturen i omgivelsene rundt fangeren, og innstrålt effekt. Den kan beregnes med

$$\eta_{sf} = \eta_0 - \frac{a_1(T_p - T_a) + a_2(T_p - T_a)^2}{G} \quad \text{formel 5}$$

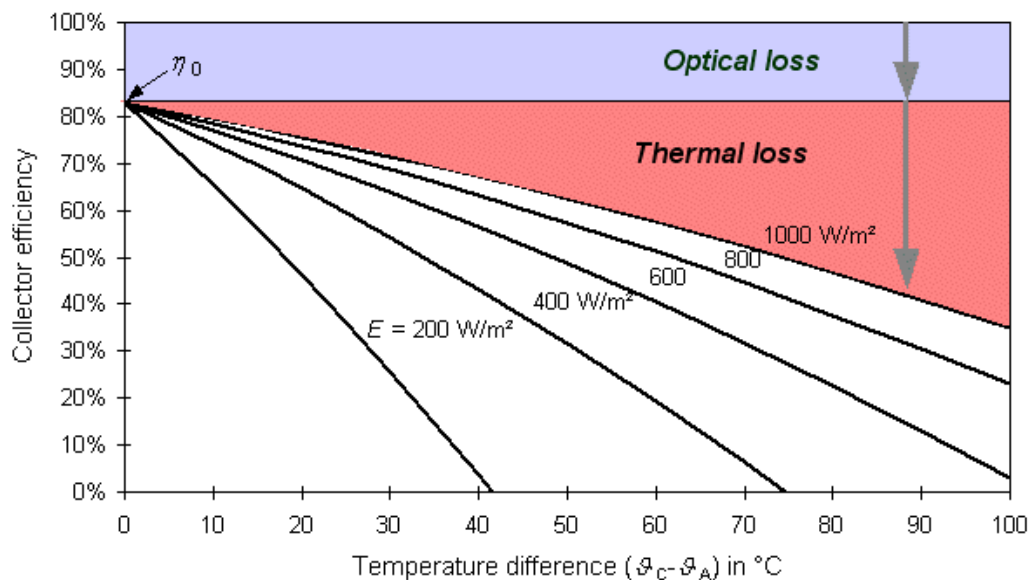
Hvor η_0 er optisk effektivitet, og er sammen med faktorene a_1 og a_2 estimert gjennom forsøk. T_p er temperaturen på kollektorplaten, T_a er temperaturen i luften rundt solfangeren, og G er irradiansen. Typiske verdier for η_0 , a_1 og a_2 for flatplatesolfanger med dekkglass gis i tabell 1.

Tabell 1: Typiske verdier for bruk av formel 5 til beregning av effektivitet til en flatplatesolfanger med dekkglass [11].

Variabel	Verdi	Enhet
η_0	0,78	—
a_1	3,2	$\frac{W}{K * m^2}$

a_2	0,015	$\frac{W}{K^2 * m^2}$
-------	-------	-----------------------

Figur 3 viser hvordan effektiviteten til flatplatesolfangere kan forventes å endre seg etter ulike irradianser og temperaturdifferanser mellom kollektorplate og omgivelsene.



Figur 3: Beskrivelse av hvordan virkningsgraden til en flatplatesolfanger typisk endrer seg ved ulike irradianser og temperaturdifferanser mellom kollektorplate og omgivelsene [12].

Virkningsgraden til en solfanger vil også variere med temperatur på innkommende energibærer. Temperaturdifferansen vil påvirke varmeoverføringen, så en stor forskjell i temperaturene til kollektorflaten og energibæreren vil gi en stor varmeoverføring. I en situasjon hvor noe skal varmes opp med solvarme vil energibæreren i starten ha lav temperatur på vei inn i solfangeren, og med tiden vil temperaturen øke gradvis. Da vil også virkningsgraden synke.

2.3.5 Solfanging til ulike boligtyper

Forholdet mellom hvor mye varme et solfangersystem kan produsere og hvor mye det er behov for endres etter bygningstype. En enebolig på ett plan vil kunne produsere store mengder varme fra solfangere da det vil ha et stort takareal som kan brukes til solfanging. En høy blokk med lite flateareal vil ha en liten flate som kan utnyttes til solfanging i forhold til bruksarealet i bygget. Hvor stor del av det totale varmebehovet et solfangeranlegg kan dekke kommer derfor i stor grad an på bygningstypen det skal betjene. En enebolig med takflate vendt mot syd med én 100 m^2 etasje med saltak som har en helningsvinkel på 45° vil ha et sørvendt takareal på 71 m^2 . Dette gir et solfangstareal til bruksarealforhold på 0,7. En

boligblokk på 10 etasjer med 6 leiligheter på 30 m^2 i hver etasje vil ha en grunnflate på omtrent 210 m^2 og et bruksareal på 1800 m^2 . På taket vil den ha trappeoppgang, ventilasjon, varmpumper etc. som fjerner potensielt fangstareal, og skygging mellom solfangere er også en faktor. Det antas at 70 % av takarealet kan utnyttes til solfangning. Blokken står da igjen med et solfangst- til bruksarealforhold på 0,08 hvis de monteres horisontalt. Monteres solfangerne med 45° helning blir forholdet 0,12. Skyggeeffekter er da ikke tatt høyde for.

2.3.6 Solfangeres helning

For boliger hvor solfangeren monteres direkte på taket eller erstatter takstein kan ikke vinkelen endres, men på bygg med flate tak eller ved installasjon på stativ bør optimal vinkel utforskes. Noen steder vil en solfanger samle mest energi hvis den monteres med bratt helning, men den vil da også kaste en lang skygge ved lav sol. Andre fangere kan da oppleve at skyggen senker deres varmefangst i perioder med lav sol. I slike situasjoner må effektene av økt solfangst og skygging sammenlignes og vurderes. Når vinkelen til solfangerne skal bestemmes må altså både innfallsvinkel på innstrålingen og skyggeeffekter regnes med.

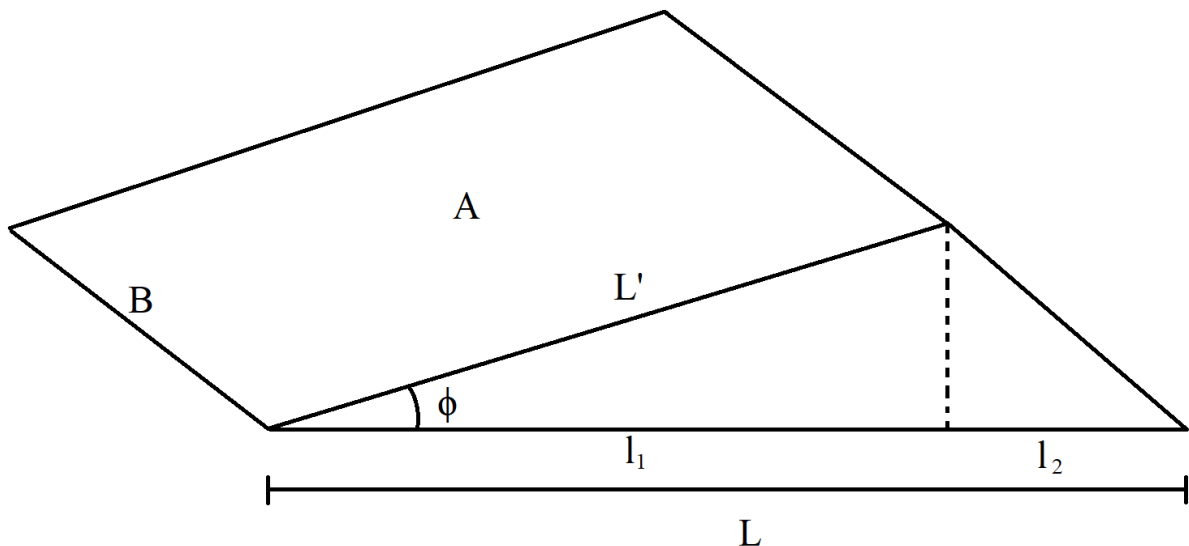
Verdier for innstrålt energi fra solen simuleres med Meteororm. Data blir gitt med enheten kWh/m^2 , så for å finne total mengde energi solfangerarealet mottar fra solen brukes formelen

$$E_{inn,tot} = E_{inn}A \quad [kWh] \quad \text{formel 6}$$

Hvor $E_{inn,tot}$ er den totale mengden innstrålt energi solfangerarealet mottar, E_{inn} er innstrålt energimengde per kvadratmeter, og A er arealet som solfangerne utgjør. For tak med helning beregnes takarealet som følger:

$$A = \frac{l_1}{\cos \phi} B \quad [m^2] \quad \text{formel 7}$$

Hvor l_1 er avstanden fra mønen til sørvendt vegg, ϕ er vinkelen mellom horisontalflaten og det sørvendte taket, og B er takets bredde. $\frac{l_1}{\cos \phi}$ gir lengden på taket fra sørvendt vegg til mønen, L' . I figur 4 vises dimensjonene på taket.



Figur 4: Taket på husene med mål. L varieres ikke, men ved å endre l_1 og ϕ vil lengden L' , og nødvendigvis også arealet A endres.

Varmemengden som kan hentes ut av solfangere bestemmes med formelen

$$Q_{\text{solfanger}} = E_{\text{inn,tot}} \eta_{\text{solfanger}} \quad [\text{kWh}] \quad \text{formel 8}$$

2.3.7 Solfangere i svært høye og lave temperaturer

For å i størst mulig grad forhindre skader på solfangeranlegget er det viktig å forhindre at arbeidsmediet endrer fase mens det er i rørsystemet. Ved svært varme og kalde driftssituasjoner kan det være hensiktsmessig å stoppe driften av anlegget og tømme alle rør for væske. Hvis systemet ikke tømmes på en kald dag når væsken nærmer seg sitt frysepunkt kan rør sprekke, eller andre komponenter ta skade. På svært varme dager kan strømningshastigheten justeres opp for å holde temperaturøkningen nede, men om det ikke skulle være nok, eller om anlegget ikke har denne funksjonen må også her systemet tømmes før det tar skade. Dette kalles drainback og innebærer at all væsken fra solfangerne ledes til en tank som står i et temperert rom.

2.3.8 Levetiden til flatplatesolfangere

Anslått levetid for solfangere varierer stort fra kilde til kilde og etter hvilken type som undersøkes. For en spesifikk flatplatesolfanger ble levetiden oppgitt som over 25 år [13], Hitech Energy oppgir en levetid på opp mot 40 år [14], og Norsk Solenergiforening mener at normal levetid er mellom 20 og 30 år [15]. En kollektorplate av for eksempel vannbestandig

aluminium vil ha svært lang levetid, så det er ikke denne som begrenser total levetid for solfangeren. Det gjennomsiktige dekket på forsiden vil kunne gulne med årene og slippe gjennom gradvis mindre stråling. Når mindre stråling treffer kollektorplaten vil det produseres mindre varme fra solfangeren, og virkningsgraden vil reduseres.

2.3.9 Meteonorm

Programmet Meteonorm brukes til å finne estimeringer for innstrålt solenergi. Meteonorm har en database som bruker data fra flere kilder, og gjennom sine kalkuleringsverktøy produserer det historiske tidsserier og værdata for typiske år. Det henter data fra værstasjoner over hele verden gjennom Global Energy Balance Archive Data, og fyller inn med data fra satellitter i de områdene hvor det ikke finnes data fra lokale værstasjoner. I områdene mellom værstasjoner vil det interpoleres mellom flere nærliggende stasjoner og satellittdata for å estimere verdier for ønsket område. For å øke nøyaktigheten i dataene kan horisont- og skyggeprofil brukes i kalkulasjonene. Bruker kan velge hvilken albedo, orientering og helning programmet skal bruke for kalkulasjon av innkommende strålingsenergi. All data valideres gjennom deres egen metode, Meteotest [16].

2.4 VARMELAGRING

2.4.1 Bakken som varmelager

Ved å nyttiggjøre berggrunnen kan store mengder masse brukes med det formål å lagre produsert varme til senere bruk. Borehole thermal energy storage, BTES, er en teknologi hvor dette gjøres med en samling av borehullsbrønner som sammen utgjør en brønnpark. Med denne løsningen utnyttes masse som allerede er på stedet og det trengs kun å bore seg ned for å få tilgang til den. Volumet som brukes er under bakken og arealet over brønnen kan i prinsippet brukes til andre ting [17]. I varmesystemer uten lagring må varme produseres i det øyeblikket varmebehovet oppstår, og produksjonskapasiteten må være stor nok til å dekke effekttopper. I et system med varmelagring kan produksjon holdes relativt stabil ved at varmen lagres når behovet er lite, og varme hentes ut av lageret når produksjonen ikke kan dekke behovet. Produksjon må altså ikke skje i sanntid, men etter samme prinsipp som en varmtvannsbereder kan lagret varme fra lageret utnyttes i perioder med høy etterspørsel for så å lades opp over lengre tid i etterkant. Det blir da en kontinuerlig syklus med opplading og utlading av brønnparken gjennom døgnet og året. I dette kapitlet beskrives BTES fra boring til ferdig system, og egenskaper til berggrunnen som er sentrale for varmelagring.

2.4.2 Bakkens termiske egenskaper

I bakken kan en finne mange forskjellige bergarter og typer løsmasse. Øverste del av grunnen består ofte av et lag med løsmasse som jord, steiner, sand eller leire. Under dette laget ligger berggrunnen. Berggrunnen er fast fjell som kan være homogent fjell eller inneholde porøse soner, sprekker eller løsmasser. Det er mange bergarter fjellet kan bestå av, og det kan være bygd opp av flere bergarter som ligger lagvis. Viktige egenskaper som er relevant for varmelagringssystemer er tetthet, termisk konduktivitet, termisk diffusivitet og varmekapasitet.

Varmekapasiteten til et materiale er et mål på hvor mye energi det må tilføres for at temperaturen dens skal økes med en grad. Uttrykket ser ut som følger

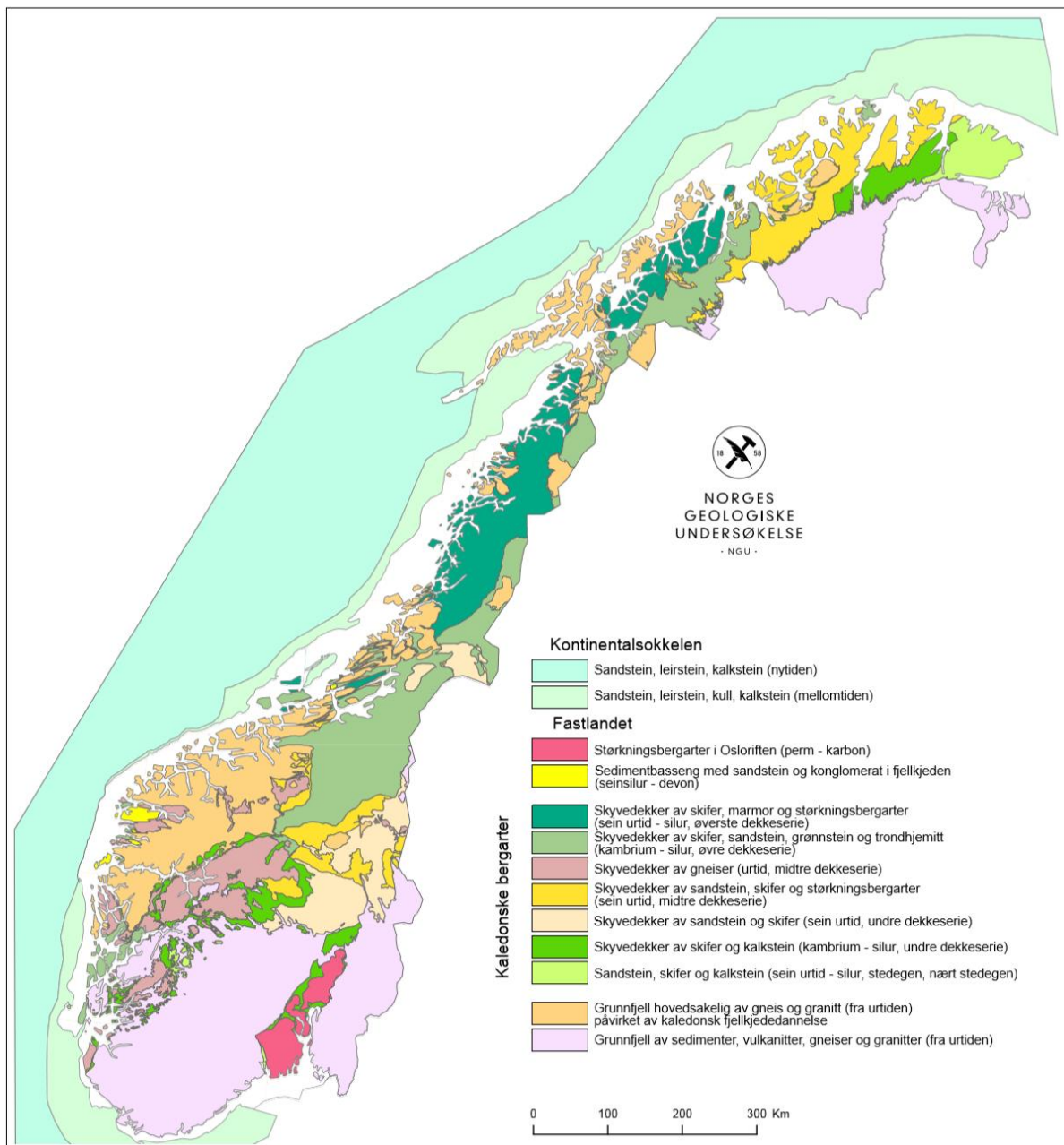
$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad \left[\frac{J}{K} \right] \quad \text{formel 9}$$

Hvor C er varmekapasiteten, ΔQ er den tilførte energien og ΔT er temperaturendringen. På denne generelle formen er enheten J/K , men når det brukes til beregning av systemer er det mer hensiktsmessig å bruke den spesifikke varmekapasiteten, c , til et materiale. Volumetrisk varmekapasitet har enheten J/m^3K . I denne oppgaven beskrives energi med enheten kWh , og den volumetriske varmekapasiteten til et materiale får da enheten kWh/m^3K .

Varmekapasitet beskriver altså i en varmelagringssammenheng hvor mye energi som kan lagres eller hentes ut fra et lager med et gitt volum ved en gitt temperaturdifferanse.

2.4.3 Geologi

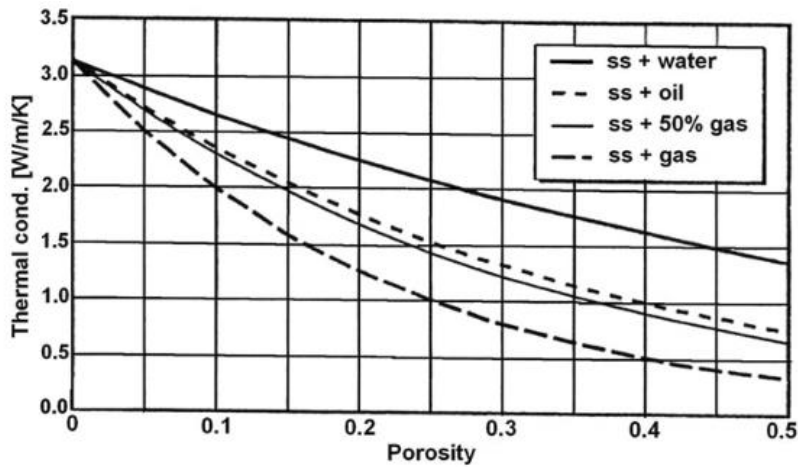
I Norge er det store områder som har mange forekomster av samme bergart, og Norges Geologiske Undersøkelse har kartlagt disse og tegnet et eget geologisk berggrunnskart, vist i figur 5.



Figur 5: Geologisk berggrunnskart over Norge [18].

Massivt fjell uten porøsitet er ønsket til varmelagringsystemer for langtidslagring. Det har god varmekapasitet og varmeledningsevne, kan holde på varmen over lang tid uten store tap, og det er lite sannsynlig med ras. For systemer med varmepumpe som benytter urørttemperaturen i bakken er det ønskelig med stor termisk diffusivitet. Massen rundt rørene i bakken vil da i større grad kunne holde en konstant temperatur enn hvis den hadde lav termisk diffusivitet. I berggrunnen finnes ofte porøse bergarter, eller områder med større porøsitet enn andre. I slike områder vil en del av volumet fylles av gass, væske eller løsmasser med liten partikkelstørrelse. Disse har andre egenskaper enn solid fjell, og kan gjøre stedet

mindre attraktivt for varmelagring. Hvordan porøsitet og hva som fyller rommet påvirker termisk konduktivitet i sandstein vises i figur 6.



Figur 6: Sammenhengen mellom termisk konduktivitet og porøsitet i sandstein. [1]

Løsmasser har andre egenskaper enn hva massivt fjell har. Fjell er en solid forekomst av ett materiale, men løsmasser består av partikler av mineraler eller organisk materiale. Løsmasser har mindre termisk ledningsevne enn fjell, og

det oppstår tomrom som fylles av gass eller væske. Dette gjør løsmasse mindre attraktivt for varmelagring. Data for utvalgte bergarter og løsmasser gis i tabell 2.

Tabell 2: Termisk konduktivitet og volumetrisk varmekapasitet for utvalgte bergarter [19], løsmasser [20] og skifer [21].

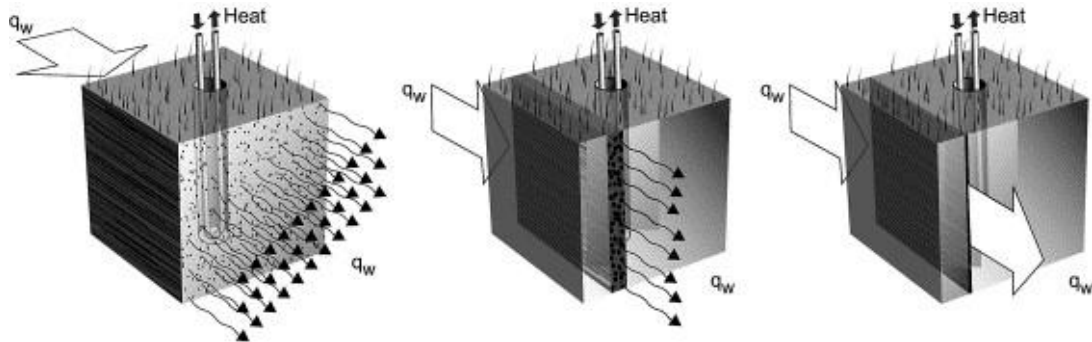
Bergart/løsmasse	Termisk konduktivitet [W/mK]	Volumetrisk varmekapasitet [kWh/m ³ K]
Kalkstein	1,5 – 3,0	0,53 – 0,67
Granitt	3,0 – 4,0	0,44 – 0,86
Sandstein	2,0 – 6,5	0,56 - 0,58
Skifer	2,0	0,58
Kvartsitt	5,5 – 7,5	0,53 – 0,75
Gneis	2,5 – 4,5	0,58 – 0,72
Leirskifer	1,5 – 3,5	0,64
Silt	0,9 – 1,7	0,36
Leire	0,5 – 1,7	0,36
Sand	0,7 – 2,5	0,33
Grus	0,7 – 1,7	0,33

Vann har en varmekapasitet på 1,16 kWh/m³K og de fleste bergarter har altså en varmekapasitet på rundt halvparten den til vann. Det vil si at for å lagre den samme mengden energi med den samme temperaturdifferansen vil det trengs rundt dobbelt så stort volum av fjell som av vann.

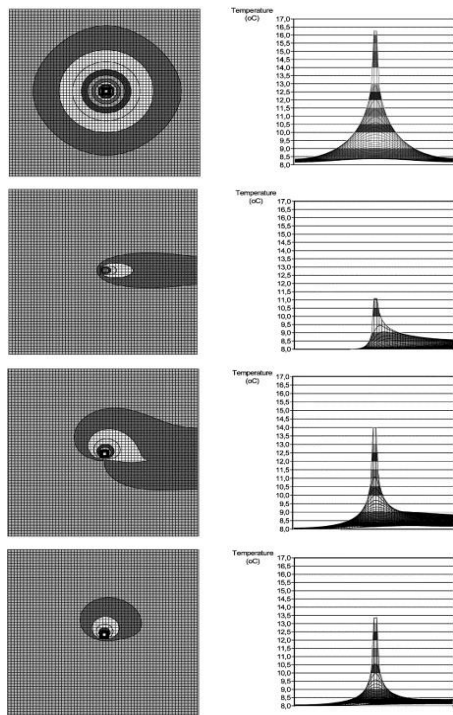
Grunnvannsbevegelser kan observeres i materialer med stor porøsitet eller med porøse områder. Med vannføring i nærheten av en varmebrønn vil deler av varmen fraktes bort med vannet. Det kan

derfor være vanskelig å opprettholde ønsket temperatur i en brønn som har nærliggende

vannføring. Gehlin og Hellström gjorde i 2003 en simulering av effekten av grunnvannsbevegelse i nærheten av en varmebrønn. I figur 7 vises de tre situasjonene som ble simulert i tillegg til en simulering uten grunnvannsbevegelse, og resultatene av simuleringen presenteres i figur 8.



Figur 7: Modell for homogen vannføring rundt brønnen gjennom porøst materiale (venstre), homogen vannføring gjennom en sone med porøst materiale i nærheten av en varmebrønn (midten), vannføring i en sprekk nær en varmebrønn i ikke-porøst materiale (høyre) [2].



Figur 8: Resultater fra simulering av varmebrønner. Temperatursonene rundt varmebrønnen vises til venstre, og temperaturen langs vannets strømningsretning til høyre. Fra toppen vises resultatet uten porøsitet, med homogen porøsitet, en porøs sone, og en sprekk i grunnen. Situasjonen er etter 100 simulerte timer [2].

Med strømning rundt hele brønnen i porøst materiale blir varmen fraktet vekk i retningen til vannstrømmen. Svært lite varme spres i retning mot strømmen, og temperaturen som oppnås er lavere enn ved solid fjell. Med vannføring i et porøst område blir varmesonen usymmetrisk, og varme fraktes med strømmen. Temperaturen blir lav, men ikke så lav som ved uniform strømning. Med en vannførende sprekk like ved brønnen blir ikke varmen fraktet bort med vannet på samme måte, men varmespredningen holdes liten og temperaturen lavere enn for solid fjell. For alle situasjonene med vannføring i nærheten av en brønn blir volumet rundt brønnen kjølt ned og da mindre attraktivt for varmelagring. For god lagring- og varmeoverføringsevne bør lageret også plasseres på et område uten løsmasse. For å avdekke løsmasser og vannførende slepper i berggrunnen bør det prøveborres før brønnboring begynnes.

For best mulige egenskaper for varmelagring i berggrunnen trengs det en varmeledningsevne innenfor et visst intervall. Hvis den er svært lav vil energibæreren fort oppnå en høy temperatur, men varmebrønnen vil bruke lang tid på å lades opp fordi varmen forblir i umiddelbar nærhet rundt varmebrønnen. Det samme gjelder når varme skal hentes ut fra ferdig oppladet brønnpark. Varmen vil forbli i rommet mellom varmebrønnene, og effekten som kan oppnås blir lav. Hvis varmeledningsevnen er svært høy vil energibæreren effektivt kunne avlevere varme til brønnen, men varmen vil også transporteres langt ut i berggrunnen. Dette gir større mengde varme som aldri kan gjenvinnes.

Varmestrøm styrkes ved stor temperaturforskjell, og urørttemperatur i bakken spiller derfor en rolle for varmelagring i bakken. Den dikterer hvor mye energi som må overføres til grunnen for å øke temperaturen til ønsket nivå, og den er en viktig faktor for varmetapet fra brønnen. Temperaturen i bakken er stort sett konstant gjennom året og øker svakt med dybden, men temperaturen i de øverste 10 – 20 m varierer med årstidene.

2.4.4 BHE

En borehullsvarmeveksler, BHE, består av en boret brønn med varmeveksler hvor det sirkulerer en energibærer som henter varme ut fra, eller leverer varme til grunnen. En slik varmebrønn har typisk en dybde fra 30 til 200 meter, med en diameter mellom 9 og 15 cm [22]. Hvis det er løsmasse over fast fjell bores det først ned til det faste fjellet og et stivt rør fores så ned i hullet. Dette er for å forhindre at løsmassen raser ned i brønnen. Når røret er på plass begynner selve brønnboringen i fjellet. Det er flere metoder boringen kan gjennomføres på, men prinsippet er det samme for de fleste. Borhodet knuser fjellet under seg mens det senkes nedover, og gass eller væske sendes ned gjennom borrhøret med høyt trykk for å fjerne løst materiale og sende det til overflaten.

For å gjøre et hull i bakken til en varmebrønn utstyres det med en kollektor. Kollektoren fungerer som en varmeveksler som energibæreren kan sirkulere i og utveksle varme med grunnen. Det skilles mellom åpen og lukket kollektor. I åpne kollektorer brukes grunnvannet som energibærer, men i lukkede kollektorer skilles energibæreren fra grunnvannet og brønnveggen. Dette gjøres ofte med u-rørskollektor eller koaksialkollektor.

En u-rørskollektor består av ett eller flere stive rør i u-form som senkes ned i brønnen. Rørene er ikke i direkte kontakt med brønnveggen. Det er grunnvannet i brønnen som er i kontakt med u-røret der grunnvannsspeilet er høyt nok. Hvis hele eller deler av røret er over

grunnvannsspeilet fylles tomrommet med fyllmasse for å skape termisk kontakt mellom u-rør og brønnvegg. En enkel u-rørskollektor er illustrert i figur 9.

En koaksialkollektor består av et indre og et ytre rør. Det ytre røret kan være i direkte kontakt med brønnveggen eller så kan fyllmasse brukes mellom rør og brønnvegg.

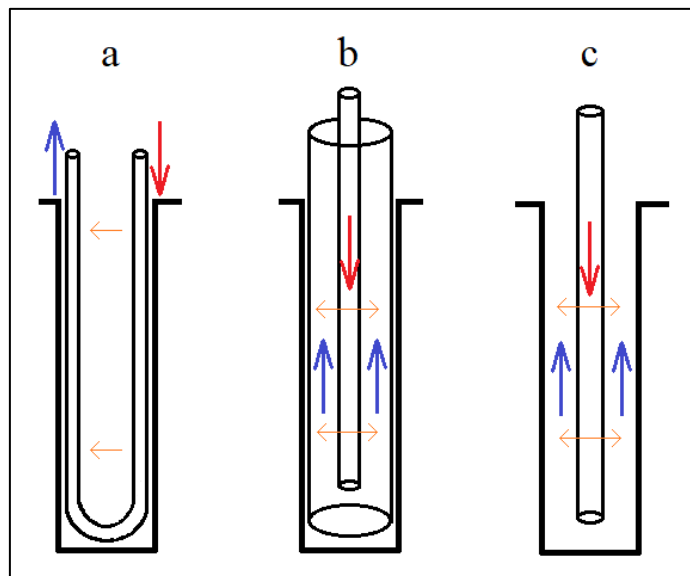
Strømningsretningen til energibæreren kan velges, slik at det kan strømme ned i det ytre røret og opp i det indre eller motsatt. Det

ytre røret kan være av stivt eller fleksibelt materiale, som regel i plast. Et stivt rør vil tåle større påkjenninger enn et fleksibelt rør, men et fleksibelt rør vil få god kontakt med ytterveggen når det trykkes. Det ønskes lite varmeutveksling mellom strømningsretningene i røret, men mye mellom det ytre røret og brønnveggen. Et indre rør med høy termisk motstand og et ytre rør med lav termisk motstand er derfor ønsket.

Koaksialkollektor er illustrert i figur 9.

En åpen kollektor har ikke noe ytre rør som skiller energibærer fra grunnvann eller brønnvegg. Det er derfor grunnvannet som blir energibæreren i dette systemet. Som vist i figur 9 plasseres det et indre rør i brønnen hvor vannet føres ned, og på vei opp er vannet i direkte kontakt med fjellet. Dette gir bedre varmeoverføring enn når varmen må gjennom en ytre rørvegg, men kan også føre til en del utfordringer. Vannet vil være i direkte kontakt med omgivelsene i brønnen og utfellinger eller vekster kan bli introdusert til systemet. Dette kan føre til problemer i rør, kollektorer og pumper.

I systemene denne oppgaven tar for seg brukes koaksialkollektoren til More Anergy hvor det ytre røret er en strømppe med armering vevd inn. Denne kollektoren gir noen fordeler over andre typer. Den er enkel å fore ned i ferdigboret brønn slik at det spares tid, og faren for ras før den er trykksatt blir da mindre. Når kollektoren er på plass i brønnen fylles den med vann og trykkes før den tettes igjen for å holde trykket. Den vil da presse mot brønnveggen med



Figur 9: Prinsippkisser for varmebrønner med (a) u-rør-, (b) koaksial-, og (c) åpen varmeveksler. Røde og blå piler viser strømningsretningen til varmt og kaldt vann, mens oransje piler viser retningen på varmestrømmen i brønnen.

et trykk på 5 *bar*, og faren for ras reduseres betraktelig selv ved boring av ny brønn få meter unna. [23]

2.4.5 BTES

Varmen fra en enkelt varmebrønn transporteres fort bort fra brønnen, og mye energi må tilføres for å opprettholde en høyere temperatur enn urørttemperaturen rundt varmebrønnen. BTES er en samling av flere varmebrønner som plasseres i nærheten av hverandre for å gjøre varmetapet mindre. Brønner plassert nærheten av hverandre vil som en enhet oppleve mindre varmetap til omgivelsene da det mellom brønnene oppstår soner med stabilt høy temperatur. Det er altså ønskelig med stort brønnavolum og lite overflateareal. Formfaktoren til en geometri beskriver forholdet mellom diameter og høyde. Lanini et al. har kommet frem til noen anbefalinger for at en brønnpark skal være et effektivt system for varmelagring. Brønnparken bør forme en sylinder og bør burde ha en formfaktor på 2, altså dobbel så stor diameter som dybde, og være isolert på oversiden for å minimere varmetap til atmosfæren. Den bør også ha en dybde på maksimum 100 meter og varmebrønnene bør være parallelle slik at de holder en konstant avstand til hverandre [24]. En formfaktor på 2 kan føre til at brønnparker får et overflateareal som er upraktisk stort. Senter-til-senteravstanden (C-C) mellom varmebrønnene bør holdes innenfor intervallet mellom 2 og 4 meter, og for middels store brønnparker mellom 3 og 3,5 meter [25]. Lanini et al. gjør simuleringer med en avstand mellom brønnene på 5 meter. En avstand mellom brønnen på denne størrelsen vil dette føre til et tregt system da varme vil bli værende i områdene mellom brønnene.

I BTES vil det være en temperaturgradient fra det varmeste området i sentrum av brønnparken til urørttemperaturen i berggrunnen et stykke utenfor de ytterste brønnene. Ved å benytte et styringssystem kan vann sendes til det området i brønnparken med en temperatur slik at vannet kan tilføre energi. På denne måten kan selv vann med lav temperatur tilføre brønnparken energi. De områdene i brønnparken som har for lav temperatur til at varmen kan utnyttes til oppvarming av rom eller tappevann kan benyttes til andre formål som ikke krever høy temperatur, for eksempel smelting av snø og is.

2.4.6 Dimensjonering av brønnpark

Når volumet til en brønnpark skal bestemmes er det flere faktorer som spiller inn.

Varmekapasiteten til grunnen dikterer hvor mye energi som kan lagres per volumenhet per grad temperaturendring. Temperaturvariasjonen som tillates fra slutten av en ladeperiode til starten av den neste, og total mengde energi som skal lagres er også avgjørende faktorer. Det

er også nødvendig å vite forventet varmetap fra brønnen. Nødvendig volum for lagring av ønsket energimengde uttrykkes som

$$V = \frac{Q}{c\Delta T} \quad [m^3] \quad \text{formel 10}$$

Hvor V er brønnenes volum, Q er mengde energi som skal lagres inkludert tap, c er grunnens volumetriske varmekapasitet, og ΔT er maksimum tillatt temperatursvingning i brønnen. En brønn som formes slik at lagervolumet utgjør en sylinder med formfaktor 1 vil ha lik høyde og diameter. Beregning for denne lengden gjøres med formelen

$$X = \sqrt[3]{\frac{4V}{\pi}} \quad [m] \quad \text{formel 11}$$

Hvor X er sylinderens diameter og høyde, og V er sylinderens volum.

Temperaturvariasjonen som tillates i BTES er viktig for nødvendig volum for brønnen, og det kan ha en effekt på temperaturen som kan hentes ut fra den. Ved høy tillatt temperatursvingning vil det behøves mindre lagervolum da mer energi tas ut av hver volumenhet, men ved starten av en ladeperiode kan temperaturforskjellen mellom brønnen og energibæreren være så lav at det blir vanskelig å hente ut varme med nødvendig temperatur. Ved lav tillatt temperatursvingning kan temperaturen holdes høy i brønnen gjennom hele forbruksperioden og uttak av varme med høy temperatur i slutten av forbruksperioden blir i mindre grad et problem. Fordi det tillates liten svingning i temperaturen kan det hentes ut mindre energi per volumenhet, og for et gitt energibehov må da volumet til brønnen være større enn for større temperatursvingninger. Når gjennomsnittstemperaturen i brønnen er høy vil det kreve mye energi å varme opp brønnen fra urørttemperaturen til driftstemperatur, og oppladningstiden blir lang. En brønn som har økende temperatur er under oppladning. Temperaturøkningen vil under oppladning skje periodevis med økning i overskuddsperioder og nedgående når varmetap til grunnen er større enn den tilførte energien.

Energien som er lagret i en brønn gis ved

$$Q = cV(T_f - T_{u.t.}) \quad [kWh] \quad \text{formel 12}$$

Hvor Q er energimengden, V er volumet som utgjør brønnparken, c er fjellets volumetriske varmekapasitet, T_f er temperaturen til fjellet i ferdig oppladet brønnpark, og $T_{u.t.}$ er urørttemperaturen i fjellet. Mengden energi som hentes ut fra brønnparken kan finnes med

$$Q = cV(T_{f\ddot{o}r} - T_{etter}) \quad [kWh] \quad \text{formel 13}$$

Hvor Q er energimengden, V er volumet som utgjør brønnparken, c er fjellets volumetriske varmekapasitet, $T_{f\ddot{o}r}$ er temperaturen i brønnparken før energi hentes ut, og T_{etter} er brønnparkens temperatur etter energi har blitt hentet ut. Brønnparkens tilbakevinningsgrad av varme kan utnyttes for beregning av energimengde som kan hentes ut av BTES etter sesonglagring. Tilbakevunnet varme kan finnes med

$$Q_{fra\ lager} = Q_{til\ lager}\eta_{BTES} \quad [kWh] \quad \text{formel 14}$$

Hvor $Q_{fra\ lager}$ er varmemengden som kan hentes ut av brønnparken etter sesonglagring, $Q_{til\ lager}$ er mengde energi tilført brønnparken, og η_{BTES} er brønnparkens tilbakevinningsgrad av varme. Størrelsen til en brønnpark dikterer i stor grad hvor mye varme som kan tilbakevinnes etter sesonglagring. En økning i størrelse gir større økning i volum enn i overflateareal, og da øker også parkens evne til å lagre varme over tid. For en varmebrønn dimensjonert for én bolig antas en tilbakevinningsgrad av varme på en tredjedel, for et system dimensjonert til rundt femti boliger antas det at halvparten av varmen tilbakevinnes, og for anlegg i størrelsesordenen $10^6 kWh$ antas det en tilbakevinningsgrad på 80 prosent.

Antall varmebrønner i en brønnpark bestemmes ved å velge en C-C og bruke denne til å finne brønntettheten arealet vil ha. Brønntettheten finnes ved

$$\text{Brønntetthet} = \left(\frac{1}{c - c}\right)^2 \left[\frac{\text{brønner}}{m^2}\right] \quad \text{formel 15}$$

Med en C-C på 3,5 meter blir brønntettheten $0,082 \text{ brønner}/m^2$.

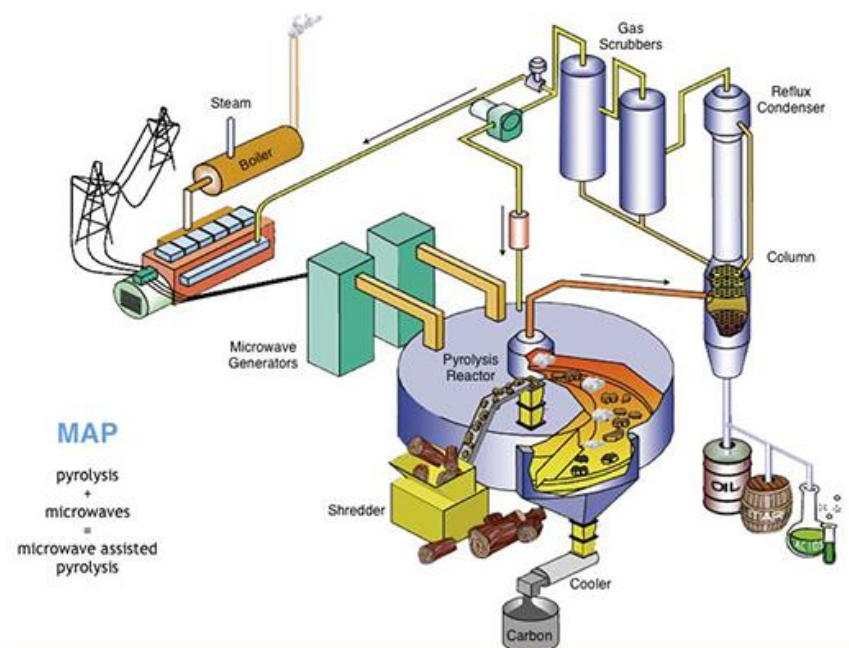
2.5 MIKROBØLGEASSISTERT PYROLYSE

Det er mye tilgjengelig energi i avfall, men i forbrenningsanlegg kan bare deler av energien utnyttes og i verste fall blir søppelet liggende som deponert avfall. Teknologier som kan hente ut større mengder av denne energien er derfor interessante å utforske.

Biomasse kan konverteres til energi gjennom termiske, fysiske og biologiske prosesser. For hydrokarboner er det termiske prosesser som er aktuelle for energigjenvinning. Vanlige

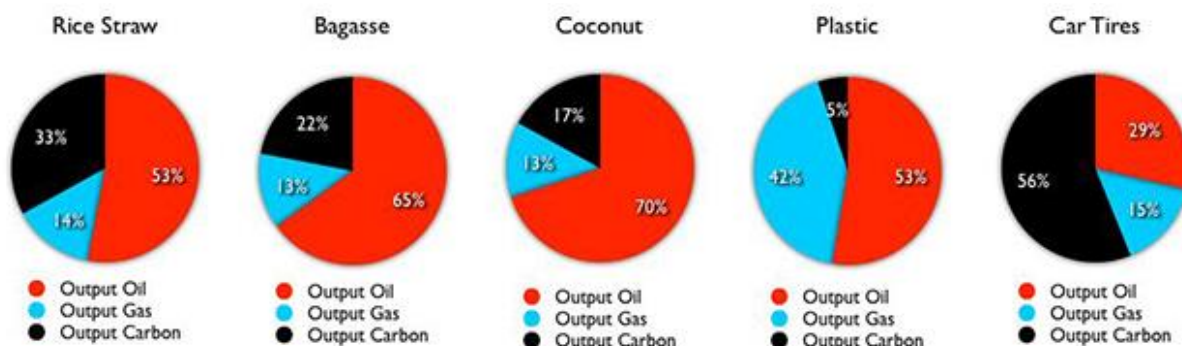
metoder for termisk energigjenvinning er forbrenning, gassifisering og pyrolyse. Forbrenning er en vanlig avfallshåndteringsteknikk, og det hentes ofte ut varme fra eksosen etter denne prosessen. Gassifisering skjer ved å varme opp et materiale til høye temperaturer og begrense oksygentilførselen til et nivå som ikke tillater fullstendig forbrenning. Det dannes da syntesegass som kan utnyttes som energibærer til andre formål. Ved pyrolyse varmes materialer også opp til høye temperaturer, men i dette tilfellet skjer det i oksygenfri omgivelser. Under disse forholdene vil materialet dekomponere til sine mindre bestanddeler og danne fraksjoner av gass, olje og kull.

Mikrobølgeassistert pyrolyse bruker mikrobølger for å oppnå den ønskede temperaturen i materialet. Ved å bestråle et stoff med mikrobølger vil temperaturen øke, og med nok tilført energi vil dekomponering oppnås. Mikrobølger består av elektromagnetiske bølger med frekvenser fra 300 MHz til 2,5 GHz. Ved å bruke mikrobølger fremfor konvensjonelle oppvarmingsmetoder kan råstoffet i større grad varmes opp uniformt gjennom volumet, oppstart og stans foregår hurtigere, og det er enklere å automatisere [26]. Pyrolyseprosessen starter ved at råstoffet mates inn i en kvern som knuser det til mindre biter. Dette gjøres for å oppnå større homogenitet i oppvarmingen i materialet. Fra kvernen føres råstoffet inn i et lufttett forbrenningskammer hvor det eksponeres for mikrobølgestråling som absorberes i materialet og øker temperaturen. Strålingen justeres spesifikt for det aktuelle råstoffet. Oljen som dannes er i gassform rett etter dekomponeringen, men kondenserer når den kjøles til romtemperatur. En skisse av prosessen vises i figur 10.



Figur 10: Diagram som viser hvordan mikrobølgeassistert pyrolyse gjennomføres [27].

Produksjonen fra MAP består av komponentene gass, olje og kull, men fordelingen av disse vil variere etter hvilket materiale som brukes som råstoff. I figur 11 vises eksempler på fordelingen av produserte fraksjoner fra ulike råstoff.



Figur 11: Fordeling av produktkategorier ved pyrolysing av ulike materialer i MAP fra Scandinavian biofuel ved rask pyrolyse (<1 sekund) [27].

Fordelingen av produserte fraksjoner kan også påvirkes ved å manipulere prosstemperaturen og råstoffets oppholdstid i pyrolysekammeret. Det har blitt funnet at rask pyrolyse med høy temperatur kan gi høyere fraksjoner av gass i produktene [28], og pyrolyse av trevirke kan gi svært ulik fordeling av produktene etter hvordan pyrolysen utføres. Dette vises i tabell 3.

Tabell 3: Produksjonsfraksjoner fra pyrolyse av trevirke ved ulike temperaturer og oppholdstider i pyrolysekammeret [29]

Prosess	Forhold	Olje	Kull	Gass
Rask pyrolyse	Moderat temperatur, kort oppholdstid	75%	12%	13%
Karbonisering	Lav temperatur, svært lang oppholdstid	30%	35%	35%
Gassifisering	Høy temperatur, lang oppholdstid	5%	10%	85%

MAP gir stor fleksibilitet i bruk av råstoff. Biomasse og hydrokarboner er aktuelle for innmating, og dette innebærer produkter som mat-, plast- og papp og papiravfall, brukte bildekk, brukte oljer og råtnerest. Denne fleksibiliteten åpner for bruk av MAP til lokal behandling av avfall samt produksjon av elektrisitet og varme. Ved pyrolyse av treverk vil MAP i motsetning til andre pyrolysemetoder dra nytte av at biomassen er moderat fuktig (20-

40%). Dette skyldes at mikrobølgestrålingen spres mer effektivt i vann enn i tørt treverk[30]. Ved tradisjonell pyrolyse må vanninnholdet fordampes før omdanningen av biomassen kan skje.

Oljen og gassen som produseres i MAP kan raffineres videre og lages til drivstoff, eller det kan brennes i en multifuelgenerator og brukes til å produsere strøm og varme. Hvis dette gjøres kan deler av den produserte strømmen brukes til å drive pyrolysen. Skulle råstoffet ha et fuktighetsinnhold slik at det er ønskelig med tørking før pyrolysing kan deler av spillvarmen fra prosessen brukes til dette formålet. Om disse tiltakene gjøres vil en MAP kunne være selvforsynt med elektrisitet og varme.

2.6 VEAS

VEAS er et vannrenseanlegg i Asker og er et sameie mellom Oslo, Asker og Bærum. De tar imot avløpsvannet fra mer enn 600 000 innbyggere fra kommunene i sameiet, og der blir avløpsvannet renset før det slippes ut i Oslofjorden. Sjøppl som er i vannet skilles ut med rister, og sand, kaffebrut og andre liknede partikler fjernes i sandfang. Det dannes slam når organisk stoff skal skilles ut fra vannet. Det tilsettes da kjemikalier som får små partikler til å klumpe seg sammen slik at de synker til bunn og er enkle å fjerne fra vannet. Det rene vannet sendes så ut i Oslofjorden mens slammet sendes til videre behandling. Det legges i utråtningstanker i 20 dager mens det råtner og produserer biogass. Gassen brennes for produksjon av elektrisitet og varme som brukes av dem selv. Slammet omtales etter forråtning som råtnerest. Det tilsettes kalk før det tørkes og brukes i produksjon av VEAS-jord som fraktes gratis til forbruker. Vannet fra tørkingen inneholder nitrogen som skilles ut og brukes til annen produksjon. [31]

2.7 ØKONOMI

2.7.1 Solfanger

Solfangere kan fås kjøpt i ulike teknologier, størrelser og med variasjon i hvor avanserte de er. Flatplatesolfangerne utviklet av More Anergy anslås til en pris på 2500 kr/m² ferdig montert [25].

2.7.2 Økonomisk støtte til solfanger og vannbåren varme

Når systemer for varmeproduksjon ved solfangning og vannbåren varme skal installeres i ny eller gammel bolig kan det søkes om økonomisk støtte fra Enova. For solfangersystemer er maksimal støtte 15.000 kroner hvor 10.000 kroner støtter selve anlegget og 200 kroner kan

mottas per kvadratmeter installert solfanger opp til 25 kvadratmeter [32]. Ved installasjon av vannbåren varme kan støtte på inntil 10.000 kroner mottas [33].

2.7.3 BTES

For en brønnpark bestående av borehullsbrønner med en diameter på 115 mm i bakke med 3 meter løsmasse over fast fjell har overslagstall for kostnad blitt undersøkt av W. Huus-Hansen. Borhastigheten er mellom 16 og 17 m/h, og det kan forventes at en brønnpark bestående av 20 brønner á 200 meter vil ta rundt 21 arbeidsdager av lengden 10 til 14 timer. En brønn med 115 mm diameter og en dybde på 200 meter koster fra 55000 kr til 60000 kr. [23]

2.7.4 MAP

Fordi MAP innebærer en betydelig investeringskostnad vil det lønne seg å la maskinen produsere kontinuerlig.

2.7.5 Strømpriser

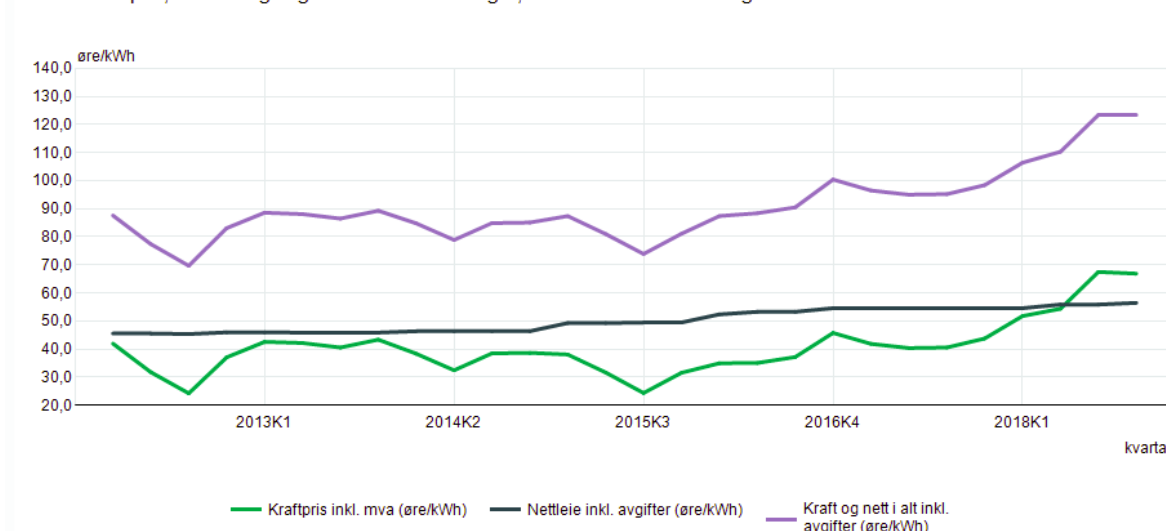
Den endelige prisen på strømforbruk består av flere deler. Selve strømmen har en pris, nettleie har en pris fordelt på en konstant og en variabel del, noe går til Enova, og avgifter er en del. Totalt blir prisen for strømforbruk

$$\text{Strømkostnad} = \text{Strømpris} + \text{Nettleie} + \text{Avgifter} \quad \text{formel 15}$$

Nettleien til Hafslund består for private kunder av et fastledd på 100 kr/mnd og et energiledd på 47,95 øre/kWh forbruk. For private kunder er moms inkludert i oppgitte priser. Lovpålagt innbetaling til Enova på 1 øre/kWh, og forbruksavgift på elektrisitet er også inkludert i nettleieprisen. [34]

Mellom første kvartal 2013 og andre kvartal 2018 har kraftprisen hatt en gjennomsnittlig pris på 40,65 øre/kWh. Den totale kostnaden på strømforbruk har variert mellom 70 øre/kWh og 123 øre/kWh, med et gjennomsnitt på 90,8 øre/kWh. Prisutviklingen er vist i figur 12. [35]

09387: Kraftpris, nettleie og avgifter for husholdninger, etter statistikkvariabel og kvartal.



Figur 12: Utviklingen til kraftprisen, nettleien og total kostnad ved elektrisitetsforbruk inkludert avgifter [35].

2.8 MILJØ OG KLIMA

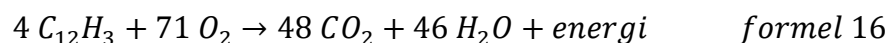
2.8.1 Solfanger

Under drift av solfangere vil det ikke produseres klimagassutslipp foruten det indirekte utslippet gjennom elektrisitetsforbruk hvis pumper drives av strøm fra strømmettet.

Produksjon og transport av komponenter vil medføre utslipp.

2.8.2 BTES

Under boringen av borehullsbrønner er forbruket av diesel omtrent 65 l/h, som på per meter basis gir forbruket 3,9 l/m [23]. Diesel som forbrennes har følgende reaksjonslikning



Tettheten til diesel er 840 kg/m³.

2.8.3 Elektrisitet

I NVEs «Nasjonal varedeklarasjon 2017» blir det beregnet at CO₂-utslippet forbundet med elektrisitetsforbruk i Norge ligger på 531 gram per kWh [36].

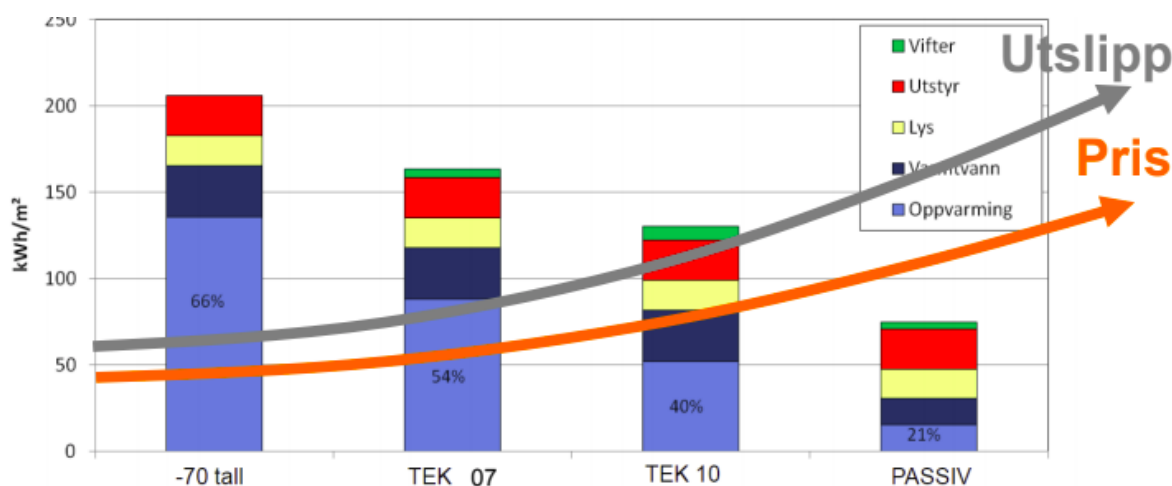
3 METODE

3.1 ENERGIBEHOV

3.1.1 TEK-krav

Energikravene som oppgis i TEK17, TEK10 og TEK07 hentes fra de respektive forskriftene. Direktoratet for byggkvalitet oppgir på sine nettsider beregninger for energikrav for boliger med 160 kvadratmeter bruksareal (BRA) for TEK10 før og etter 1. januar 2016. Det vil si at energikravet ble endret i TEK10 og beholdt uendret inn i TEK17. Den samme beregningen gjøres i denne oppgaven for TEK07.

Petter H. Heyerdahl har anbefalt figur 13 som antydning på hvordan strømforbruket fordeler seg i hus bygget under ulike forskrifter. Denne brukes for å finne varmebehovet i boligene og også energibehovet i en bolig fra syttitallet. Det er ikke tydelig hvordan beregningen er gjort på figuren da verdien for TEK10 passer med forskrift, men for TEK07 er den i figuren høyere enn energikravet. Det velges å gå ut fra at verdiene for syttitallsboligen gjelder for en bolig på $160 m^2$.



Figur 13: Energibehov i hus etter ulike forskrifter inndelt etter formål.

For energikrav i bolig fra syttitallet brukes oppgitt data for energibehov for å konstruere formelen på samme form som for senere forskrifter. For energibehov i TEK10-bolig på $160 m^2$ BRA velges det å bruke verdien fra før 1. januar 2016. Varmebehovet i TEK17 finnes ikke på figur, så det velges å tilnærme verdien ved å anta at varmebehovet i TEK17 utgjør en noe mindre andel av totalt energibehov. Energikrav oppgis i tabell 4.

Tabell 4: Energikrav i eneboliger fra TEK07 til TEK17. BRA er antall oppvarmede kvadratmeter bruksareal i boligen.

Småhus	TEK17 (kWh/m ²)	TEK10 (kWh/m ²)	TEK07 (kWh/m ²)	Tidligere (kWh/m ²)
Energikrav gitt av forskrift	100+(1600/BRA)	100+(1600/BRA)	125+(1600/BRA)	
Enebolig med 160 m ² BRA	110	130	135	210
Hvorav varmebehov	65	80	100	160

TEK17 og TEK10 har de samme energikravene i nyeste versjon av forskriftene. For å finne energikravet i TEK10 før 1. januar 2016 brukes beregnet verdi for 160 m² bolig. Beregning av varmebehov gjøres ved å gå ut fra energikravene og bruke verdier for 160 m² bolig for å finne andelen av totalt varmebehov som går til oppvarming. For en TEK07-bolig brukes altså energikravet $125 + \left(\frac{1600}{BRA}\right) \left[\frac{kWh}{m^2}\right]$ til å finne energibehov, og hvor mye av dette som går til oppvarming finnes ved å bruke forholdet mellom energibehov og varmebehov som i tabell 4 er verdiene $135 \frac{kWh}{m^2}$ og $100 \frac{kWh}{m^2}$. Det vil se ut som følger

$$\text{Varmebehov} = \left(125 + \frac{1600}{BRA}\right) \frac{kWh}{m^2} * \frac{100 \frac{kWh}{m^2}}{135 \frac{kWh}{m^2}} \quad \left[\frac{kWh}{m^2}\right]$$

3.1.2 Oppvarming av bolig

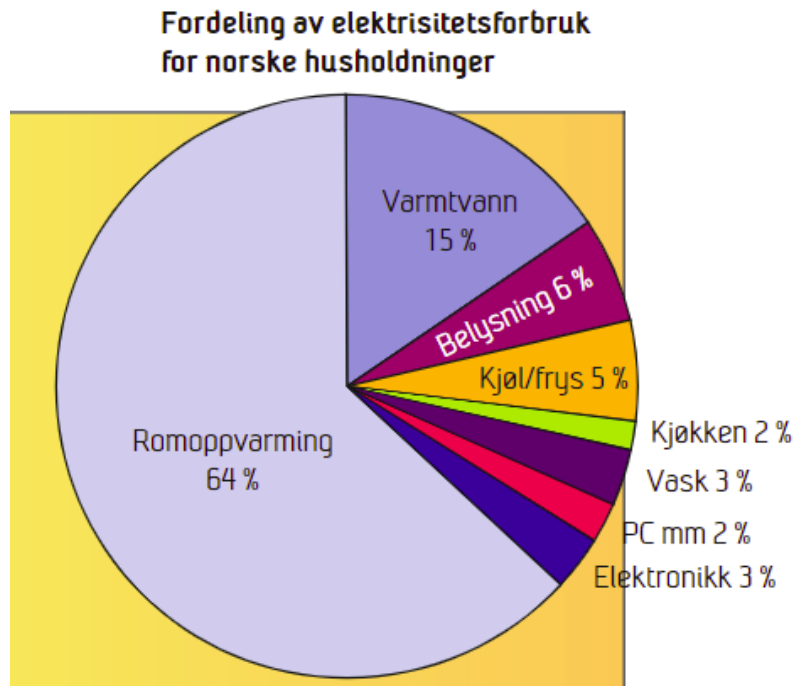
For beregning av energibehov i eksisterende boligmasse hentes data om gjennomsnittlig energiforbruk i eneboliger fra Statistisk sentralbyrå og vises i tabell 5. Tallene er fra 2012.

Tabell 5: Gjennomsnittlig energiforbruk i norske boliger i 2012 ifølge SSB [37].

Boligtype	Totalt årlig energiforbruk (kWh)	Spesifikt årlig energiforbruk (kWh/m ²)
Enebolig	25 776	198

For beregning av varmebehov brukes data fra SINTEF. De har funnet at strømforbruket i boliger i Norge fordeles slik at i gjennomsnitt går 64 % av totalt forbruk til romoppvarming,

og 15 % av totalen går til oppvarming av tappevann [4]. Fordelingen av strømforbruk etter formål er vist i figur 14.



Figur 14: Strømforbruket i norske boliger fordelt etter formål [4].

H. B. Tømmerbakke har gjort beregninger for å finne månedlig energibehov til en TEK10 bolig på Ås med 200 m² BRA. Det har blitt gjort ved å beregne varmetap fra boligen og trekke fra interne varmetilskudd [38]. Koeffisienter, metode og standardiserte verdier ble hentet fra NS3031:2008.

For å finne fordelingen av varmebehov i en bolig gjennom året benyttes beregningen gjort av Tømmerbakke. Ved å anta at boligens fordeling av energibehov gjennom året er overførbar til andre boliger kan en generell fordeling lages.

3.1.3 Oppvarming av kommunale bygg, forretninger og industri

Kommunale bygg og forretningsers energibehov varierer etter deres formål. Data for energibruk i ulike byggkategorier er gitt i tabell 6.

Tabell 6: Årlig spesifikk energibruk til oppvarming og kjøling etter byggekategori og formål [39].

Byggekategori	Oppvarming (kWh/m ²)	Oppvarming av tappevann (kWh/m ²)	Kjøling (kWh/m ²)
Barnehage	121	9	0
Kontor	72	11	20
Skole	99	6	0
Universitet/høgskole	96	18	20
Sykehus	125	32	52
Sykehjem	136	26	1
Hotell	101	39	3
Idrettsbygg	85	24	23
Forretning	71	8	19
Kulturbygg	166	3	3
Lett industri/verksted	161	4	6

For å beregne energibehov til en ukjent samling av bygg fra tabell over brukes gjennomsnitt for totalt varmebehov for alle kategorier.

3.1.4 Snøsmelting

For beregning av energiforbruk ved snø- og issmelting blir det antatt at det for hver dag med en gjennomsnittstemperatur under null er nødvendig å kjøre varmeanlegget i 10 timer for å holde bakken is- og snøfri. Oslo velges som lokasjon, og fordi dette er sør i landet antas det at det er nødvendig med en tilført effekt på 175 W/m^2 .

3.2 SOLENERGI

3.2.1 Innstrålt energi

Innhenting av data om innstrålt energi gjøres med Meteonorm. For simuleringer brukes følgende innstillinger:

- Oslo velges som lokasjon for simuleringene
- Data for innstråling i perioden 1991-2010 brukes
- Horisonteffekter tas ikke hensyn til

- Albedo velges til 0,2
- Turbiditeten finnes gjennom interpolering mellom flere nærliggende værstasjoner
- Vinklene 0°, 15°, 30°, 45° og 60° brukes som helning på simulert flate
- Asimutvinkel 0° velges

Data om innstråling hentes fra resultatmatrisen fra kolonnen G_h for innstrålingen i det horisontale planet, og G_k for innstrålingen i planet med den valgte vinkelen.

3.2.2 Solfanger

På grunn av tilgjengelig informasjon om pris og virkningsgrad brukes i denne oppgaven flatplatesolfangeren til More Anergy. Denne kan erstatte taktekke på boliger. Som solfangerens gjennomsnittlige virkningsgrad brukes $\eta_{solfanger} = 0,5$ [25].

3.2.3 Solfanging til ulike boligtyper

En boligs evne til å dekke eget varmebehov påvirkes av forholdet mellom tilgjengelig solfangstareal og bruksareal. For å skape et bilde av hvordan denne effekten tar form beregnes nødvendig solfangstareal for en bolig under ulike omstendigheter. Det gjøres beregninger for et hus med 120 m² grunnareal under følgende situasjoner

- Etasjer
 - 1
 - 3
- Taktyper
 - Saltak
 - Asymmetrisk tak (møne plassert 8 meter fra sørvendt vegg)
 - Pulttak
- Takvinkler
 - 0°
 - 15°
 - 30°
 - 45°
 - 60°
- Asimutvinkel 0°
- Hus bygget etter krav fra
 - TEK17

- TEK10
- TEK07
- Tidligere

For beregning av nødvendig areal til solfangning brukes energikrav fra forskriftene. Fordi TEK17 og TEK10 har det samme kravet i nyeste versjon brukes kravene som presentert i tabell 9. Nødvendig solfangerareal blir funnet med

$$A = \frac{\text{Nødvendig varmemengde}}{\text{Innstrålt energi per areal} * \eta_{\text{solfanger}}}$$

3.3 SESONGLAGRING AV VARME I BTES

3.3.1 Geologi

Fra figur 5 kommer det frem at store deler av Sør- og Østlandet består av en berggrunn av sedimenter, vulkanitter, gneiser og granitter. Gneis velges for beregninger, og dens termiske egenskaper vises i tabell 7.

Tabell 7: Termisk konduktivitet og volumetrisk varmekapasitet for gneis.

Bergart	Termisk konduktivitet (W/mK)	Volumetrisk varmekapasitet (kWh/m ³ K)
Gneis	2,5 – 4,5	0,58 – 0,72

For beregninger i gneis velges middelverdien i intervallet.

3.3.2 Kollektor

For å unngå problemer med utfellinger etc. som følger med åpen kollektor velges det å bruke lukket kollektor. Koaksialkollektor har et stort innvendig volum som kan romme store mengder vann. Dette vannet vil ha en temperatur omtrent lik omkringliggende masser. Et system med koaksialkollektor kan altså betjene store varmebehov på en god måte ved at vannet i kollektoren gir rask tilgang til høy effekt. Et system med u-rørskollektor har lite innvendig volum og lite varmt vann klart til bruk. Brønner med u-rørskollektor må også fylles med masse hvis vannspeilet ikke er høyt nok slik at kollektoren oppnår termisk kontakt med brønnveggen.

Det velges å brukes koaksialkolektor med diameter 115 mm da data om denne er tilgjengelig.

3.3.3 Opplading av brønnpark

Energimengden som trengs for å heve temperaturen i en brønnpark fra urørttemperatur til ønsket driftstemperatur finnes med formel 12. I de første årene mens brønnparken er under opplading vil temperaturen i fjellet være lavere, og som en ser i formel 1 er temperaturforskjell en driver for varmetransport via konduksjon. Dermed blir varmetapet fra volumet i denne perioden lavere enn under normal drift. Det antas en tilbakevinningsgrad av varme fra brønnparken på 80 % i år 1, 70 % i år 2, og 60 % i år 3 før den går mot 50 %.

3.4 MAP

Scandinavian Biofuel Company har laget et prosjekt eksempelpel med data om råstoff, produserte fraksjoner og elektrisitetsproduksjon ved mikrobølgeassistert pyrolyse. I dette tilfellet er elektrisitetsproduksjon maksimert. For å finne energibruken til MAP brukes informasjon fra tabell 8. Spesifikk energibruk finnes med «electricity use» og «net capacity/yr».

Tabell 8: Data om råstoff, fraksjoner og strømproduksjon fra et eksempelprosjekt med MAP [40].

Feedstock	Rice straw	Bagasse	Coconut	Plastic	Car tires
Capacity/yr	27 778 tons	28 409 tons	25 000 tons	25 000 tons	25 000 tons
Water content	20 %	20 %	15 %	5 %	1 %
Net capacity/yr	25 000 tons	25 000 tons	25 000 tons	25 000 tons	20 000 tons
Output oil	13 250 tons	16 250 tons	17 500 tons	12 500 tons	5 600 tons
Output gas	3 500 tons	3 250 tons	3 250 tons	10 000 tons	3 000 tons
Output carbon	8 250 tons	5 500 tons	4 250 tons	1 240 tons	11 000 tons
Electricity output	32,4 GWh	39 GWh	38,5 GWh	103,4 GWh	44,5 GWh
Electricity use	3,79 GWh	3,79 GWh	3,79 GWh	3,79 GWh	4,57 GWh
Electricity sales	28,66 GWh	35,17 GWh	34,74 GWh	99,65 GWh	39,89 GWh

3.5 EKSEMPEL 1 - SOLFANGERE OG BTES SOM VARMESYSTEM FOR NYTT BOLIGOMRÅDE HVOR BOLIGENE BYGGES ETTER GAMMEL FORSKRIFT

I denne delen av oppgaven skal det ses på konsekvensene av å bygge et nabolag hvor hus med høy U-verdi maksimerer solfangning og er tilkoblet en felles brønnpark for sesonglagring av varme. Det skal utforskes hvorvidt husene blir selvforsynte med varme, og om

varmeproduksjonen er stor nok til at overskuddsvarme kan selges. Inntjeningstiden for anlegget skal finnes, og denne løsningen skal sammenlignes med bygging av moderne TEK17-boliger med elektrisk oppvarming.

3.5.1 Boligene

For å utføre beregninger må det tas valg om antall boliger, berggrunn, bruksareal etc. Valgene gjøres som følger:

- 50 boliger med ett takareal i asimutvinkel 0°
- Homogen gneis i berggrunnen
- Hele takarealet dekkes med solfangere
- Solfangerne er av typen produsert av More Anergy og erstatter annet taktekke
- Alle hus har én etasje og pulttak med 30° takvinkel
- 120 m^2 oppvarmet bruksareal i hver bolig
- Krav om energieffektivitet i boligene velges til $200 + \frac{1600}{BRA} \text{ kWh/m}^2$

3.5.2 Varme fra solfangere

For beregning av mengde utnyttbar energi samlet av solfangerne antas det at innfallende stråling i november, desember, januar og februar ikke kan benyttes til oppvarming. Den lave irradiansen vil gi liten økning i temperatur på kollektorplaten, og varmeoverføring til det sirkulerende vannet vil derfor være liten. Den lave omgivelsestemperaturen som forventes i disse månedene vil øke tapet fra solfangerne, og senke virkningsgraden. Totalt er det sannsynlig at lite eller ingen energi kan tilføres verken huset eller brønnparken fra solfangerne under disse forholdene.

3.5.3 Varmebehov

Varmebehovet i overskuddsmånedene antas dekket av nylig produsert solvarme slik at denne energimengden ikke må sesonglagres. Varmen som brukes i overskuddsmånedene antas lagret i så kort tid at varmetapene kan neglisjeres. Varmebehovet til boligene beregnes som beskrevet i tabell 9, og månedlig varmebehov beregnes med fordelingen i tabell 10.

3.5.4 BTES

Nødvendig brønnparkvolum finnes med formel 10, og høyden og diameteren finnes med formel 11. Brønntettheten med en C-C på 3,5 meter er $0,082 \text{ brønner/m}^2$. Det tas utgangspunkt i at tillatt temperatursvingning er 10 K .

3.5.5 Økonomi

Solfangere

P. H. Heyerdahls prisanslag på ferdigmonterte solfangere på 2500 kr/m² benyttes for beregninger.

Enovas støtteordning til solfangere vil gi 15.000 kroner i støtte per bolig, og til vannbåren varme vil 10.000 kroner mottas per bolig.

Brønnpark

For beregninger av brønnpark brukes det at for 20 brønner á 200 meter regner en med at arbeidet vil ta omtrent 21 arbeidsdager av lengden 10 til 14 timer.

Boring av varmebrønner med diameter 115 mm koster mellom 275 og 300 kroner per meter [23], og W. Huus-Hansen har anslått at boring av brønn inkludert kollektor og alt som trengs av deler frem til teknisk rom vil koste omtrent 1.000 kroner per meter brønn.

Elektrisitet

For beregning av prisen på elektrisitet til oppvarming brukes nettleieprisen til Hafslund, og gjennomsnittlig kraftpris fra 2013 til 2018. Nettleieprisen består av en månedlig fast avgift på 100 kroner og et energiledd på 47,95 øre/kWh. Den gjennomsnittlige kraftprisen er 40,65 øre/kWh. De to forbruksavhengige leddene adderes slik at de danner ett ledd i beregningen.

Årlig kostnad for bruk av elektrisitet blir altså $1200 \text{ kr} + 0,9 \frac{\text{kr}}{\text{kWh}} * \text{kWh forbruk}$.

Inntjeningstid

Solfangere erstatter taktekke så byggeprisen blir noe redusert. Pris for taktekke hentes fra Maxbos nettsider, og det velges å bruke gjennomsnittet av prisene oppgitt per kvadratmeter. Hovedkostnadene til et system som dette er solfangerne og konstruksjon av brønnpark. Sammen med taktekke vil også støtte fra Enova kunne gjøre total pris lavere. Den totale utgiften for systemet deles på årlig inntekt og besparelse for å finne inntjeningstiden til anlegget.

For å utforske effekten av å tillate en større temperatursvingning i brønnparken gjøres en ny beregning for inntjeningstid med $\Delta T = 15 \text{ K}$.

Byggekostnad for husene

For beregning av byggekostnad brukes spesifikk kostnad for husene på 22 000 kroner for husene med høy U-verdi og 25 000 kroner for TEK17-hus. Prisen på TEK17-hus er valgt etter å ha undersøkt nettsidene boligfix[41] og nyhuskatalog[42]. Videre brukes funnene gjort av N. Macic som tilsier at innføringen av TEK07 førte til at bygging av nye eneboliger ble 3000 kroner dyrere per kvadratmeter[5]. Denne økningen brukes her for sammenligning av boliger med høy og lav U-verdi.

Når et byggeprosjekt er bestemt må det velges mellom ulike løsninger for gjennomføring. Da er det merkostnaden som er drivende faktor, og da inntjeningsstiden av denne som er av betydning.

3.5.6 Klima og miljø

Solfangere

Solfangerne vil ikke slippe ut klimagasser under drift, men produksjon av komponenter vil føre til utslipp. Det samme gjelder pumper, rør, kollektor og andre komponenter.

Levetidsutslipp er ikke betraktet i denne oppgaven.

Brønnpark

Konstruksjonen av brønnparken vil medføre utslipp under boring. For beregning brukes oppgitt verdi for forbruk av diesel på 3,9 l/m som beskrevet i kapittel 2.8.2. Dieselforbruket og tettheten til diesel brukes til å finne CO₂-utslipp per meter. Dieselforbruket i kilogram per meter finnes med

$$\text{Dieselforbruk} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}} \right] = \text{forbruk} \left[\frac{\text{l}}{\text{m}} \right] * \rho_{\text{diesel}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{l}} \right]$$

Utslipp per meter finnes med

$$\text{Utslipp} \left[\frac{\text{kg}_{\text{CO}_2}}{\text{m}} \right] = \text{dieselforbruk} \left[\frac{\text{kg}_{\text{diesel}}}{\text{m}} \right] * \text{vektforhold} \left[\frac{\text{kg}_{\text{CO}_2}}{\text{kg}_{\text{diesel}}} \right]$$

Vektforholdet mellom CO₂ og diesel finnes ved å dividere de molare massene på hverandre som følger

$$\text{vektforhold}_{\text{CO}_2/\text{diesel}} = \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{diesel}}}$$

Elektrisitet

For beregning av utslipp fra strømforbruk brukes NVEs tall for utslipp fra norsk kraftproduksjon oppgitt i nasjonal varedeklarasjon 2017. Utslippene anslås til 16,4 g/kWh.

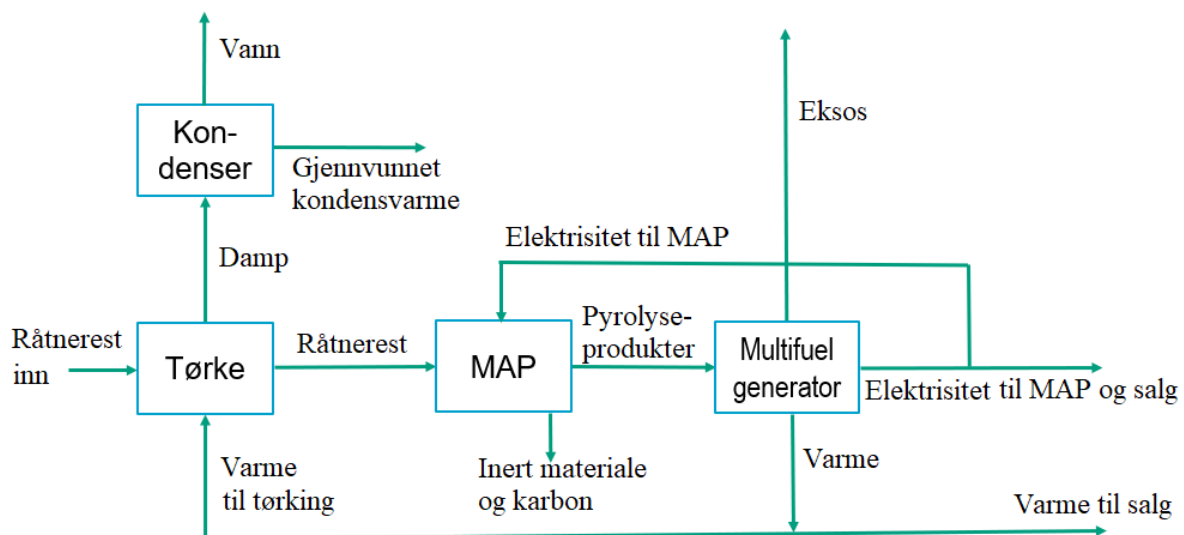
Inntjeningstid

For den utslippsrelaterte inntjeningstiden betraktes utslipp fra produksjon av BTES, spart utslipp på redusert strømforbruk for boligene i nabolaget og den solgte varmen fra brønnparken. For en god sammenligning av alternativene må også strømforbruket til TEK17-boligene tas med i beregningen.

3.6 EKSEMPEL 2 – MULIGHETSANALYSE FOR MAP SOM SLUTTBEHANDLING AV RÅTNEREST

Vannrenseanlegget i Asker, VEAS, betraktes. Det har blitt foreslått av P. H. Heyerdahl at sluttbehandlingen av råtnerest ved VEAS kan gjøres med mikrobølgeassistert pyrolyse, og at dette vil gi overskuddsproduksjon av elektrisitet og varme. I tillegg til at systemet skal være selvdrivende er målet at overproduksjon skal selges. Forslaget ble lagt frem i en presentasjon under «Nullutslipp innen 2040 – fagseminar om forskningsbehov og muligheter for VEAS sin visjon» [43].

Systemet vil bestå av en enhet for tørking, MAP og en generator. For størst mulig grad av energigjenvinning brukes en kondensator for å hente ut kondensvarme, og i en multifuel generator produseres det elektrisitet og høytemperatur varme. Systemskisse er som vist i figur 15.



Figur 15: Systemskisse for anlegg med MAP som sluttbehandling av råtnerest [43] (redigert).

Mengden råtnereest som skal sluttbehandles hvert år er 12600 tonn, og har etter biogassutvinning et vanninnhold på 45 prosent. Mengden tørrstoff er 6930 tonn. Et lavere fuktinnhold vil gi mer effektiv pyrolyse, så for å redusere vanninnholdet tas råtnereesten gjennom en tørkeprosess. Temperaturen til vannet er ukjent. Det antas at vannet holder 30 °C etter biogassutvinning, og at vannets egenskaper ikke endres av nitrogen- eller annet innhold. Etter tørkingen vil vanninnholdet i råtnereesten være omtrent 15 prosent og råtnereesten sendes så til MAP. Den årlige mengden tørrstoff i råtnereesten har en brennverdi som oppgis som omtrent 27 *GWh*. Fra tabell 3 kommer det frem at ved å manipulere temperatur og oppholdstid i reaktorkammeret kan fordelingen av fraksjoner i produktene endres. Det antas at det har blitt funnet en kombinasjon som gir en produksjon av karbon som inneholder 10 % av total brennverdi. Etter pyrolysingen vil inerte stoffer være skilt fra produktene som skal brennes i generatoren. Karbonet som produseres skilles ut sammen med inert materiale. Oljen og gassen fra MAP brennes deretter i multifuel generator. Det antas at generatoren har en virkningsgrad på 30 % under omgjøring fra kjemisk energi til elektrisitet, og at 40 % av varmen fra forbrenning kan gjenvinnes.

Det er ikke kjent hvor mye elektrisk energi som må tilføres MAP for å pyrolysere ønsket mengde råtnereest. Data om energibruk til pyrolyse med MAP hentes fra tabell 8, og det antas at pyrolysing av råtnereest behøver tilnærmet samme energimengde som pyrolyse av risstrå, kokkosnøtt, plast og bagasse.

4 RESULTATER

4.1 ENERGIBEHOV

4.1.1 TEK-krav

Energikrav som benyttes i oppgaven vises i tabell 9.

Tabell 9: Energikrav for småhus i ulike forskrifter. Kravene i TEK10 og «tidligere» beregnes fra energibehovet til en bolig med BRA på 160 m².

	TEK17 (kWh)	TEK10 (kWh)	TEK07 (kWh)	Tidligere (kWh)
Energikrav	100+(1600/BRA)	120+(1600/BRA)	125+(1600/BRA)	200+(1600/BRA)
Andel av totalt behov som utgjør varmebehov	0,59	0,62	0,74	0,76

4.1.2 Oppvarming av bolig

Månedlige verdier for energibehov til romvarme og tappevann er gitt i tabell 10. Dette er verdier beregnet for en TEK10-bolig på Ås med 200 kvadratmeter bruksareal. Tabell 10 viser også månedlig varmebehov som andel av årlig varmebehov.

Tabell 10: Energibehov til oppvarming av rom og tappevann. Boligen som er brukt i beregning er en TEK10 bolig på Ås med 200 m² BRA [38]. Månedlig varmebehov som andel av årlig varmebehov.

Måned	Romvarme (kWh)	Tappevann (kWh)	Totalt månedlig varmebehov (kWh)	Andel av årlig behov (%)
Januar	1919	510	2429	13,9
Februar	1733	460	2193	12,6
Mars	1536	510	2046	11,7
April	1054	493	1547	8,9
Mai	511	510	1021	5,9
Juni	89	493	582	3,3
Juli	-29	510	481	2,8
August	82	510	592	3,4
September	468	493	961	5,5
Oktober	893	510	1403	8,0
November	1388	493	1881	10,8
Desember	1788	510	2298	13,2
Totalt	11432	6002	17434	100

4.1.3 Oppvarming av kommunale bygg, forretninger og industri

Gjennomsnittlig spesifikt varmebehov i året for alle byggkategoriene i tabell 6 i kapittel 3.1.3 er 129 kWh/m² per år.

4.1.4 Snøsmelting

Gjennom vinteren 2018-2019 (fra november til mars) hadde Oslo 70 dager med en gjennomsnittstemperatur under null grader [44]. Under disse forholdene krever smeltingen

$$70 \text{ dager} * 10 \frac{\text{h}}{\text{dag}} * 175 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 123 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$$

Altså omtrent 120 kWh/m² for hele vinteren. En trapp på 25 m² vil trenge tilførsel av 3000 kWh, og en gangvei på 200 m² vil trenge 24000 kWh tilført.

4.2 SOLENERGI

4.2.1 Innstrålt energi

Data for innstrålt energimengde i Oslo vises i tabell 11.

Tabell 11: Verdier for månedlig innstrålt energimengde per flateenhet på flater med ulik vinkel i Oslo. Data hentet gjennom simulering med Meteororm med asimutvinkel 0°.

Måned	Innstrålt energi per flateenhet på vinklede flater (kWh/m ²)				
	0 grader	15 grader	30 grader	45 grader	60 grader
Januar	8	14	19	23	25
Februar	23	32	40	45	48
Mars	64	82	95	103	106
April	102	116	125	127	122
Mai	152	163	166	162	150
Juni	161	167	167	159	144
Juli	154	161	161	155	141
August	113	124	130	130	123
September	73	88	98	103	103
Oktober	31	40	47	52	54
November	10	14	18	21	22
Desember	5	7	9	11	12
Totalt	893	1008	1075	1090	1052

4.2.2 Solfanging til ulike boligtyper

Tabell 12 viser nødvendig solfangerareal for å dekke hele varmebehovet til en bolig med 120 m² grunnareal under ulike forhold. Grønne ruter viser at takarealet er stort nok til å montere nødvendig mengde solfangere for å dekke behovet. Røde ruter viser situasjoner hvor taket er for lite. Beregningene er gjort med asimutvinkel på solfangerne lik 0°.

Tabell 12: Nødvendig solfangerareal i m² for å betjene varmebehovet til en enebolig med 120 m² grunnareal under ulike krav og forhold, og om tilgjengelig areal er stort nok. Grønne ruter viser at takarealet er stort nok til nødvendig mengde solfangere. Røde ruter viser situasjoner hvor takarealet er for lite.

Forskrift	Takvinkel	1 etasje (120 m ² BRA)			3 etasjer (360 m ² BRA)		
		Saltak	Asymmetrisk tak	Pulttak	Saltak	Asymmetrisk tak	Pulttak
TEK 17	0	38	38	38	113	113	113
	15	34	34	34	101	101	101
	30	32	32	32	97	97	97
	45	32	32	32	97	97	97
	60	34	34	34	102	102	102
TEK 10	0	46	46	46	139	139	139
	15	41	41	41	124	124	124
	30	40	40	40	119	102	102
	45	40	40	40	119	102	102
	60	42	42	42	125	107	107
TEK 07	0	58	59	59	174	178	178
	15	52	53	53	155	159	159
	30	50	51	51	149	153	153
	45	50	51	51	149	153	153
	60	52	53	53	156	160	160
Tidligere	0	92	90	90	275	271	271
	15	82	81	81	246	243	243
	30	79	78	78	236	233	233
	45	79	78	78	236	233	233
	60	83	81	81	248	244	244

4.2.3 Levetiden til flatplatesolfanger

Det antas at forventet levetid på flatplatesolfangere er 30 år.

4.3 SESONGLAGRING AV VARME I BTES

4.3.1 Geologi

Middelverdier av termisk konduktivitet og volumetrisk varmekapasitet til gneis vises i tabell 13.

Tabell 13: Middelverdier for termisk konduktivitet og volumetrisk varmekapasitet for gneis.

	Termisk konduktivitet (W/mK)	Volumetrisk varmekapasitet (kWh/m³K)
Middelverdier for gneis	3,5	0,65

4.3.2 Kollektor

Med en diameter på 115 mm vil volumet i kollektoren være 0,01 m³/m eller 10 l/m. En brønnlengde på 100 meter vil inneholde 1 m³ eller 1000 liter oppvarmet vann. En brønnpark med temperaturen 45 °C brukes til romoppvarming og vil få returvann inn med en temperatur på omtrent 20 °C. Denne brønnparken vil ha en energimengde på

$$Q = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1 \text{ m}^3 * (1,163 * 10^{-3}) \frac{\text{kWh}}{\text{kgK}} * (45 - 20)\text{K} = 29 \text{ kWh}$$

29 kWh per 100 meter brønn umiddelbart tilgjengelig i vannet.

4.4 MAP

MAP av risstrå, bagasse, kokosnøtt og plast har samme strømforbruk og samme mengde råstoff. Spesifikt strømforbruk er

$$\frac{3,79 * 10^6 \text{ kWh}}{25\ 000 \text{ tonn}} = 152 \frac{\text{kWh}}{\text{tonn}}$$

Altså omtrent 150 kWh/tonn av disse materialene.

4.5 EKSEMPEL 1 - SOLFANGERE OG BTES SOM VARME SYSTEM FOR NYTT BOLIGOMRÅDE HVOR BOLIGENE BYGGES ETTER GAMMEL FORSKRIFT

4.5.1 Boligene

Energikravet til boligene finnes med verdier fra tabell 9 og gir et årlig varmebehov på

$$\left(200 \frac{kWh}{m^2} + \frac{1600 kWh}{120 m^2}\right) * 0,76 = 162,13 \frac{kWh}{m^2}$$

162,13 kWh/m². Husene har et sørvendt takareal på 139 m² som benyttes til solfangst.

4.5.2 Varme fra solfangere

Mengde energi som kan hentes ut fra solfangere per kvadratmeter ved 30 grader helning vises i tabell 14.

Tabell 14: Energien som kan hentes ut av hver kvadratmeter solfanger hver måned og totalt gjennom året for solfangere med 30 grader helning, asimutvinkel 0° og virkningsgrad $\eta = 0,5$.

Måned	Varmemengde fra flatplatesolfanger med 30 grader helning (kWh/m ²)
Januar	9
Februar	20
Mars	48
April	62
Mai	83
Juni	84
Juli	80
August	65
September	49
Oktober	24
November	9
Desember	4
Totalt	537

Med antakelse om at innstrålt energi i november, desember, januar og februar ikke kan utnyttes kan 495 kWh/m² varme hentes ut fra solfangere i året.

4.5.3 Varmebehov

Årlig varmebehov for boligene er 19500 kWh, og fordelingen av energibruken per måned er som vist i tabell 15.

Tabell 15: Månedlig varmebehov til romoppvarming og varmtvann for boligene med 120 m² BRA og et årlig varmebehov på 19500 kWh.

Måned	Varmebehov (kWh)
Januar	2717
Februar	2452
Mars	2288
April	1730
Mai	1142
Juni	651
Juli	538
August	662
September	1075
Oktober	1569
November	2104
Desember	2570
Totalt	19500

Varmebalansen til brønnparken etter at varmebehovet i boligen er dekket presenteres i tabell 16.

Tabell 16: Varmebalansen til felles brønnpark etter at boligens varmebehov er dekket.

Måned	Varmebehov (kWh)	Varmemengde fra solfangere (kWh)	Varmebalanse etter forbruk i bolig (kWh)
Januar	2675	0	-2675
Februar	2415	0	-2415
Mars	2253	6584	4330
April	1704	8663	6959
Mai	1124	11504	10379
Juni	641	11573	10932
Juli	530	11157	10628
August	652	9009	8357
September	1058	6791	5733
Oktober	1545	3257	1712
November	2072	0	-2072
Desember	2531	0	-2531

4.5.4 BTES

Det totale varmebehovet gjennom vinteren finnes fra tabell 16 og er 9693 kWh. Varmen som sendes til sesonglagring er totalt 59030 kWh. Med en antatt tilbakevinningsgrad på 50 prosent fra sesonglagring er varmemengden som kan brukes etter varmetap 29515 kWh. Etter boligens vinterforbruk kan 19822 kWh hentes ut fra brønnen.

Alle 50 husene vil til sammen tilføre brønnparken 3 *GWh*. Etter sesonglagring er den utnyttbare varmemengden 1,5 *GWh*. Totalt forbruk gjennom vinteren er 485 *MWh*. Etter forbruk er gjenværende varmemengde 1 *GWh*.

Nødvendig brønnparkvolum finnes med formel 10 og er

$$V = \frac{3 * 10^6 \text{ kWh}}{0,65 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{K}} * 10 \text{ K}} = 460\,000 \text{ m}^3$$

for å lagre 3 *GWh* med en tillatt temperatursvingning på 10 *K*. Diameteren og dybden til brønnparken finnes med formel 11 og er

$$X = \sqrt[3]{\frac{4 * 460\,000 \text{ m}^3}{\pi}} = 83,7 \text{ m}$$

Brønnparkens areal ved overflaten vil være 5500 *m*², og det må bores 451 brønner. 451 brønner á 83,7 meter gir en total brønnlengde på 37 700 meter.

4.5.5 Økonomi

Solfangere

Prisen for solfangere på en bolig blir 346 500. For hele boligområdet blir prisen på solfangere 17 325 000 kroner. Den økonomiske støtten som vil mottas for solfangere er totalt 750 000 kroner, og for vannbåren varme vil 500 000 kroner mottas. Total pris for solfangeranlegget presenteres i tabell 17.

Tabell 17: Pris på solfangere for hele boligområdet inkludert Enovastøtte.

Utgiftspost	Pris (1000 kr)
Solfangere	17 325
Støtte (solfangere)	-750
Støtte (vannbåren varme)	-500
Totalt	16 075

Brønnpark

Kostnad for BTES vises i tabell 18.

Tabell 18: Kostnad for å konstruere brønnparken til boligområdet.

	Enhet	Mengde
Kostnad for konstruksjon av BTES	<i>kr/m</i>	1 000
	<i>m</i>	37 700
	<i>kr</i>	37 700 000

Resultatene er altså som vist i tabell 19.

Tabell 19: Beregning av BTES med en tillatt temperatursvingning på 10 K

	Beregning	Resultat	Enhet
Varmemengde til BTES	–	3	<i>GWh</i>
Tillatt ΔT i brønnparken	–	15	<i>K</i>
Brønnparkvolum	$V = \frac{3 * 10^6 \text{ kWh}}{0,65 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{K}} * 1 \text{ K}}$	460 000	<i>m³</i>
Høyde og diameter	$X = \sqrt[3]{\frac{4 * 460\,000 \text{ m}^3}{\pi}}$	83,7	<i>m</i>
Areal ved overflaten	$A = \frac{\pi(83,7 \text{ m})^2}{4}$	5500	<i>m²</i>
Brønntetthet med C-C=3,5 m	–	0,082	<i>brønner/m²</i>
Antall brønner	$n = 5500 \text{ m}^2 * 0,082 \frac{\text{brønner}}{\text{m}^2}$	451	<i>brønner</i>
Total brønnlengde i BTES	$L_{\text{brønn}} = 451 \text{ brønner} * 83,7 \frac{\text{m}}{\text{brønn}}$	37 700	<i>m</i>
Pris per brønnmeter	–	1 000	<i>kr/m</i>
Pris BTES	$\text{pris}_{\text{BTES}} = 1000 \frac{\text{kr}}{\text{m}} * 37\,700 \text{ m}$	37 700 000	<i>kr</i>

Elektrisitet

Det vil koste omtrent 18 500 kroner årlig å dekke en boligs varmebehov med elektrisitet.

Samlet pris for hele boligområdet vises i tabell 20.

Tabell 20: Årlig kostnad for å dekke ett hus, og hele boligområdet varmebehov med elektrisitet.

	Enhet	Mengde
Kostnad for å dekke varmebehov med elektrisitet	<i>kr/bolig</i>	18 477
	<i>boliger</i>	50
	<i>kr</i>	923 850

Inntjeningstid

At solfangere erstatter taktekke gir en redusert byggepris på omtrent 180 kroner per kvadratmeter takareal. For ett hus reduseres prisen med 24 950 kroner, og for alle husene reduseres den med 1 247 500 kroner. Tabell 21 viser prisen for solfangerne og BTES medberegnet sparte midler på taktekke og Enovastøtte.

Tabell 21: Total kostnad for solfangere og BTES ($\Delta T=10\text{ K}$) etter besparing fra taktekke og støtte fra Enova.

Utgift	Pris (1000 kr)
Solfangere	16 000
BTES	37 700
Taktekke	-1 200
Enovastøtte	-1 300
Totalt	51 200

Årlig inntekt på salg av varme fra brønnpark og besparelse på redusert strømforbruk vises i tabell 22.

Tabell 22: Årlig resultat fra salg av varme og sparing på redusert strømbruk.

	Enhet	Mengde
Solgt varme	<i>MWh</i>	990
Total årlig inntekt på solgt varme	<i>1000 kr</i>	880
Årlig besparelse på redusert strømforbruk	<i>1000 kr</i>	900
Totalt	<i>1000 kr</i>	1 780

Verdier brukes til å beregne inntjeningstiden for anlegget.

$$\text{Inntjeningstid} = \frac{51\,200\,000 \text{ kr}}{1\,780\,000 \text{ kr/år}} = 28,8 \text{ år}$$

Inntjeningstiden til varmesystemet med solfangere og BTES er 28,8 år.

Dette er for en brønnpark med tillatt temperatursvingning på 10 K. For det samme solfangstsystemet, men med en tillatt temperatursvingning i brønnparken på 15 K blir resultatet som vist i tabell 23.

Tabell 23: Beregning av BTES med en tillatt temperatursvingning på 15 K.

	Beregning	Resultat	Enhet
Varmemengde til BTES	–	3	GWh
Tillatt ΔT i brønnparken	–	15	K
Brønnparkvolum	$V = \frac{3 * 10^6 \text{ kWh}}{0,65 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{K}} * 15 \text{ K}}$	308 000	m^3
Høyde og diameter	$X = \sqrt[3]{\frac{4 * 308\,000 \text{ m}^3}{\pi}}$	73,2	m
Areal ved overflaten	$A = \frac{\pi(73,2\text{m})^2}{4}$	4 200	m^2
Brønntetthet med C-C=3,5 m	–	0,082	brønner/m ²
Antall brønner	$n = 4200 \text{ m}^2 * 0,082 \frac{\text{brønner}}{\text{m}^2}$	344	brønner
Total brønnlengde i BTES	$L_{\text{brønn}} = 344 \text{ brønner} * 73,2 \frac{\text{m}}{\text{brønn}}$	25 200	m
Pris per brønnmeter	–	1 000	kr/m
Pris BTES	$\text{pris}_{\text{BTES}} = 1000 \frac{\text{kr}}{\text{m}} * 25\,200 \text{ m}$	25 200 000	kr

Den årlige inntjeningen og besparelsen blir den samme summen på 1 780 000 kroner. Total kostnad for solfangere og BTES inkludert besparinger vises i tabell 24.

Tabell 24: Total kostnad for solfangere og BTES ($\Delta T=15\text{ K}$) etter besparing fra taktekke og støtte fra Enova.

Utgift	Pris (1000 kr)
Solfangere	16 000
BTES	25 200
Taktekke	-1 200
Enovastøtte	-1 300
Totalt	38 700

Inntjeningstiden for denne løsningen er 21,7 år.

Byggekostnad for husene

Et hus på 120 m^2 BRA som bygges etter TEK17-standard vil koste 3 000 000 kroner, og et hus bygd etter eldre forskrifter koster 2 640 000 kroner. Besparelsen per hus blir 360 000 kroner, og for alle 50 boligene blir den 18 000 000 kroner. Når det skal velges mellom å bygge etter eldre forskrift med solfangere og BTES eller TEK17-hus med elektrisk oppvarming må byggekostnadene med i budsjettet, som vist i tabell 25.

Tabell 25: Pris for bygging av TEK17-boliger uten alternativ varme, og anlegg for boliger bygget etter eldre forskrift og med solfangere og BTES.

	Pris med TEK17 (1000 kr)	Pris med eldre forskrift (1000 kr)
50 hus á 120 m^2 BRA	150 000	132 000
Solfangere	—	17 325
BTES	—	24 825
Taktekke	—	-970
Enovastøtte	—	-1 250
Total	150 000	171 930

Merkostnaden for husene med solvarmeanlegg er 21 930 000 kroner. I tillegg til at boligene som benytter solvarme til oppvarming sparer penger på redusert strømbruk og tjener penger på solgt varme, vil også TEK17-boligene måtte varmes opp med elektrisitet. Årlig

energiforbruk til oppvarming i en TEK17-bolig er 8035 kWh/bolig og vil koste de 50 boligene 416 000 kr. Inntjeningstiden for merkostnaden blir

$$\text{Inntjeningstid} = \frac{21\,930\,000 \text{ kr}}{(1\,780\,000 + 416\,000) \text{ kr/år}} = 10,0 \text{ år}$$

4.5.6 Klima og miljø

Solfangere

Solfangerne har ikke direkte klimagassutslipp under drift.

Brønnpark

Brønnparken med 15 K tillatt temperatursvingning betraktes. Ved forbrenning av diesel er reaksjonslikningen som oppgitt i formel 16. Diesel har i reaksjonslikningen sammensetningen $4C_{12}H_3$ og en vekt på

$$4 \left(12 * 12 \frac{g}{mol} + 3 * 1 \frac{g}{mol} \right) = 588 \frac{g}{mol}$$

CO_2 på produksiden har formen $48CO_2$ og dette har en vekt på

$$48 \left(12 \frac{g}{mol} + 2 * 16 \frac{g}{mol} \right) = 2112 \frac{g}{mol}$$

Vektforholdet mellom diesel og CO_2 er

$$\frac{2112 \frac{g_{CO_2}}{mol}}{588 \frac{g_{diesel}}{mol}} = 3,6 \frac{g_{CO_2}}{g_{diesel}} = 3,6 \frac{kg_{CO_2}}{kg_{diesel}}$$

Dieselforbruket under boring vil være omtrent 3,3 kilogram per meter, vektforholdet mellom diesel og CO_2 er $3,59 \text{ kg}_{CO_2}/\text{kg}_{diesel}$, og utslippet under boring er $11,85 \text{ kg}_{CO_2}/\text{m}$. Boring av 24825 meter brønnlengde vil medføre et utslipp på 294 tonn CO_2 .

Elektrisitet

En reduksjon i strømforbruk for 50 boliger på 19500 kWh gir en reduksjon i indirekte utslipp på

$$0,0164 \frac{kgCO_2}{kWh} * 19500 kWh * 50 boliger = 16000 kgCO_2$$

Altså 16 tonn CO_2 årlig. For reduksjonen i strømforbruk fra den solgte varmen blir det reduserte utslippet

$$0,0164 \frac{kgCO_2}{kWh} * 990000 kWh = 16200 kgCO_2$$

Altså 16,2 tonn CO_2 årlig.

Oppvarming av TEK17-boliger med elektrisitet vil føre til et utslipp på

$$0,0164 \frac{kgCO_2}{kWh} * (8035 * 50) kWh = 6590 kgCO_2$$

Altså 6,6 tonn CO_2 årlig.

Inntjeningstid

$$\frac{294 \text{ tonn}CO_2}{(16 + 16,2 + 6,6) \text{ tonn}CO_2/\text{år}} = 7,6 \text{ år}$$

Det vil ta omtrent syv og et halvt år med normal drift før anlegget har et lavere klimagassutslipp enn boligene som varmes opp med elektrisitet.

4.5.7 Oppladningstid

Brønnparken med tillatt temperatursvingning på 15 K betraktes. Nødvendige verdier gis i tabell 26.

Tabell 26: Nødvendige verdier for beregning av oppladningstid.

	Enhet	Verdi
Brønnparkvolum	m^3	308 000
Volumetrisk varmekapasitet	kWh/m^3K	0,65
Urørttemperatur	$^{\circ}C$	4
Temperatur ved ferdig oppladet brønn	$^{\circ}C$	45
ΔT	K	41
Varme tilført brønnen årlig	GWh	3

Nødvendig varmemengde for opplading blir

$$Q = 0,65 \frac{kWh}{m^3 K} * 308\,000 m^3 * 41 K = 8,2 GWh$$

Tilført mengde energi til brønnen de første årene vises i tabell 27.

Tabell 27: Mengde lagret energi i brønnparken fra år 1 til år 5 med ulike η_{BTES} .

År	Tilbakevinningsgrad av varme (%)	Tilført energi	Lagret energi (GWh)
1	80	3 GWh * 0,8	2,4
2	70	2,4 GWh + 3 GWh * 0,7	4,5
3	60	4,5 GWh + 3 GWh * 0,6	6,3
4	50	6,3 GWh + 3 GWh * 0,5	7,8
5	50	7,8 GWh + 3 GWh * 0,5	9,3

Brønnparken vil være fullt oppladet i løpet av år 5.

4.6 EKSEMPEL 2 – MULIGHETSANALYSE FOR MAP SOM SLUTTBEHANDLING AV RÅTNEREST

Med en produksjon av karbon slik at det vil inneholde 10 % av total brennverdi vil det under pyrolysen dannes olje og gass som til sammen har en brennverdi på 24 GWh. Forbrenning av produktene i generator med virkningsgrad på 30 % vil gi en produksjon 7,2 GWh elektrisitet, og det vil være mulig å gjenvinne 9,6 GWh høytemperatur varme fra generatoren.

Under tørkeprosessen må 4450 tonn vann fordampes. Dette krever en energimengde på

$$(4,45 * 10^6 kg) * 0,63 \frac{kWh}{kg} = 2,8 GWh$$

For å øke vannets temperatur 70 grader trengs en energimengde på

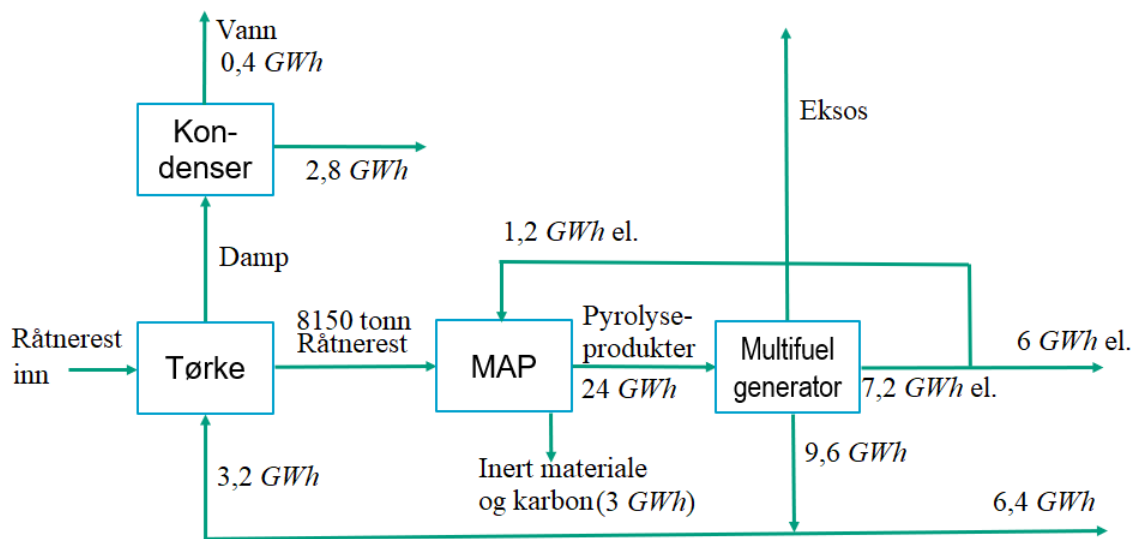
$$(4,45 * 10^6 kg) * 1,16 * 10^{-3} \frac{kWh}{kgK} * 70 K = 0,36 GWh$$

Total tilført energimengde for å oppnå ønsket tørking av råtneresten er 3,2 GWh.

Spesifikk energimengde for å gjennomføre pyrolysen er

$$\frac{3,79 * 10^6 kWh}{25\,000 tonn} = 152 \frac{kWh}{tonn}$$

For pyrolysing av den årlige mengden råtnereist på 8150 tonn er nødvendig tilført energimengde 1,2 GWh elektrisitet. Skisse med resultater fra beregninger vises i figur 16.



Figur 16: Skisse over sluttbehandling av råtnereist med MAP med verdier fra beregning [43] (redigert).

Høytemperaturvarmen som utgjør 6,4 GWh kan betjene det årlige varmebehovet til 652 TEK17-boliger med 150 m² bruksareal. Elektrisitetsproduksjonen på 6 GWh kan dekke varmebehovet til 611 boliger av samme type. Hvis både høytemperatur varme og elektrisitet brukes til oppvarming av boliger kan altså 1260 TEK17-boliger få sitt varmebehov dekket av energien fra dette anlegget. Gjenvunnet varme fra kondenser og varmeveksler kommer i tillegg til dette, og hvis brukt til samme formål vil det gi ytterligere 326 boliger som kan få varmebehovet dekket. Forretninger og kommunale bygg har et gjennomsnittlig årlig energibehov til oppvarming på 129 kWh/m². Høytemperaturvarmen og elektrisiteten kan betjene varmebehovet til 96 100 kvadratmeter bygg av denne typen, og med kondensvarme og gjenvunnet varme kan varmebehovet til 121 000 kvadratmeter bygg dekket. Hvis kondensvarmen og gjenvunnet varme fra vannet etter kondensering benyttes til smelting kan det holde 27 000 kvadratmeter bakke is- og snøfri.

Hvis varmen selges til samme pris som strøm kjøpes for blir total pris for hele varmemengden 8 506 800 kroner. Salg av elektrisitet antas gjennomført for halv pris av innkjøp. Salg av produsert strøm vil gi en inntekt på 2 658 600 kroner.

5 DISKUSJON

5.1 TEK-KRAV

Tabell 4 i kapittel 3.1.1 oppgir energikrav og beregning for en bolig med 160 m² BRA. For en TEK17-bolig og en TEK10-bolig er oppgitte beregninger ulike til tross for at energikravene er de samme. De siste oppdateringene til energikrav kom 1. januar 2016 og ble beholdt inn i TEK17. Det antas at det var verdier for tidligere versjoner av forskriften som ble brukt til beregningen.

5.2 OPPVARMING AV BOLIG

Det går ut fra figur 13 for å finne visse verdier i oppgaven, men denne figuren ser ut som mangler noe informasjon. Dette gjør det vanskelig å vite om informasjonen er korrekt.

Energiforbruket er ikke det samme for alle boliger av samme boligtype, men det varierer etter størrelse, byggeår og bruksmønster. Tabell 5 i kapittel 3.1.2 brukes som utgangspunkt for beregninger som innebærer eksisterende boligmasse, men ikke som nøyaktig mål til enhver bolig av samme sort.

5.3 OPPVARMING AV KOMMUNALE BYGG, FORRETNINGER OG LETT INDUSTRI

Gjennomsnittlig totalt varmebehov for kommunale bygg, kulturbygg og lett industri vil ikke gi nøyaktig informasjon om energibruk i et spesifikt område med en kjent fordeling av areal i de ulike byggekategoriene. Det brukes for å oppdrive et omtrentlig tall som kan brukes som en tilnærming til en faktisk situasjon i et tilfeldig område.

5.4 SNØSMELTING

Energibehovet til snø- og ismelting vil variere med mange faktorer, men spesielt med de metrologiske forholdene i området det opererer i. Antakelser om operasjonstid og nødvendig tilført energimengde vil være grove tilnærmelser. Med informasjon om hvor i landet det skal operere og historiske værdata kan en dypere analyse gjennomføres for bedre presisjon i beregninger. Nødvendig energimengde vil også variere mellom sørvendte og nordvendte arealer. Dette gir stor usikkerhet i verdiene.

5.5 SOLENERGI

5.5.1 Solfanger

Solfangeren til More Anergy brukes på grunn av enkelt tilgjengelig informasjon om pris og virkningsgrad, samt at den kan erstatte taktekke slik at byggeprosess ved nybygg blir billigere.

5.5.2 Solfanging til ulike boligtyper

Tabell 12 viser som forventet at forholdet mellom tilgjengelig solfangstareal og bruksareal som skal varmes opp har betydning for om en bolig kan dekke eget varmebehov eller ikke. Hus med én etasje er altså optimalt, og taktyper med store sørvendte flater gir mulighet for å produsere overskudd av varme. Beregningene som ble gjort for tabellen tok ikke hensyn til temperatur på energibærer. Varmtvannsberederen må holde en viss temperatur for å hindre bakterievekst i vannet, og hvis temperaturen solfangerne produserer er lavere enn dette vil bare deler av totalt varmebehov til oppvarming av tappevann kunne dekkes. Nødvendig mengde tilført solvarme vil da bli lavere, og takarealet som behøves mindre. Det samme gjelder hvis solvarme kun skal dekke deler av nødvendig varmebehov. Ved beregning av energibehov til en bolig på tre etasjer ble energibehovet til boligen med én etasje tredoblet. Denne fremgangsmåten tar ikke hensyn til eventuell varmeutveksling mellom etasjene og hvordan dette påvirker totalt varmebehov.

5.5.3 Levetiden til flatplatesolfanger

Den estimerte levetiden til flatplatesolfangere varierer fra kilde til kilde. Det er dekkglasset som er den begrensende faktoren i levetiden da det blekner med årene og lar gradvis mindre stråling passere. Andre komponenter i anlegget har betraktelig lengre levetid, så hvis dekkglasset byttes ut ved endt levetid vil anlegget kunne driftes i opptil 60 år. Også sirkulasjonspumper kan behøve utskift gjennom levetiden.

5.6 SESONGLAGRING AV VARME I BTES

5.6.1 Geologi

Varmekapasiteten til et spesifikt volum av fjell varierer med bergart, porøsitet og vannføring. For nøyaktige tall for et bestemt område bør prøveboring utføres.

5.6.2 Kollektor

Ved å øke diameteren på kollektor og varmebrønn vil overflatearealet øke og da også kontaktarealet mellom kollektor og brønnvegg. Økt overføringskapasitet vil da oppnås, og en større mengde vann vil til en hver tid befinne seg i kollektorene i brønnparken.

5.7 EKSEMPEL 1 - SOLFANGERE OG BTES SOM VARMESYSTEM FOR NYTT BOLIGOMRÅDE HVOR BOLIGENE BYGGES ETTER GAMMEL FORSKRIFT

5.7.1 Boligene

Det velges å bruke en standard for husene som vil føre til stort varmebehov for å utforske i hvilken grad denne type prosjekt kan gjennomføres og være lønnsomt.

5.7.2 *Varme fra solfangere*

Antakelse om lik virkningsgrad på solfangning gjennom solfangstperioden kan være kilde til feil i beregninger. Med omgivelser som varierer med månedene vil solfangerne kunne ha en virkningsgrad som endrer seg gjennom året. Total mengde varme ut av solfangerne kan altså ha avvik fra beregnet verdi.

5.7.3 *Varmebehov*

Antakelsen om at varmebehovet i overskuddsmåneder dekkes av nylig produsert varme kan være kilde til feil. Det antas at denne energien brukes før tap tar sted, men om dette ikke stemmer vil total mengde samlet energi være mindre enn beregnet.

Månedlig varmebehov finnes ved å ta utgangspunkt i beregning gjort av H. B. Tømmerbakke for en TEK10-bolig, og anta at fordelingen av totalt forbruk over månedene kan overføres til andre boliger bygd etter andre forskrifter. Antakelsen ligger altså i at det kun er størrelsen på varmebehovet som endrer seg, men fordelingen over året er lik. Dette kan være kilde til feil.

5.7.4 BTES

Varmetapet i dette systemet vil sannsynligvis være mindre enn 50 % da brønnen vil være i størrelsesordenen *GWh*. Denne brønnparken vil være så stor at det er sannsynlig med en høyere tilbakevinningsgrad av varme.

5.7.5 Økonomi

Solfangere

Andre eventuelle kostnader ved integrering av vannbåren varme som hovedkilde til oppvarming i husene er ikke medberegnet. Skulle dette øke prisen vil totalkostnad og inntjeningstid endres.

Brønnpark

Borehastighet kan variere etter blant annet bergart og mengde løsmasse over fast fjell. Slike faktorer vil kunne gi andre priser for arbeidet. W. Huus-Hansens anslag på 1000 kr/m for hele arbeidet og alt utstyr per meter brønn kan være forskjellig fra faktisk pris, og er da en mulig kilde til feil.

Elektrisitet

Prisen på elektrisitet har steget under perioden brukt for å beregne gjennomsnitt. Hvis denne utviklingen fortsetter i fremtiden vil ikke verdier brukt i denne oppgaven være gode tilnærminger over tid.

Inntjeningstid

Salg av lagret varme antas i beregning å skje etter samme pris som en ville betalt for elektrisitet. Prisen på varme vil sannsynligvis følge strømprisen til en viss grad, men de vil sjeldent være like. Beregnet årlig inntekt på salg av varme i denne oppgaven kan være høyere enn reell verdi.

En inntjeningstid på 28 år eller 21 år er ikke optimalt for et solfangeranlegg med estimert levetid på 30 år. I tillegg til at variasjoner i været kan føre til mindre varmeproduksjon og feil på anlegget kan gi uforutsette utgifter, kan oppladningstiden til brønnparken være slik at utgiftene ikke vil tjenes inn i løpet av levetiden. Dette er dog inntjeningstiden for hele solvarmeanlegget, og uten å ta byggekostnad med i beregningen.

En økning i tillatt temperatursvingning i brønnparken på 5 kelvin fører til at kostnaden for hele anlegget blir 76 % av hva den var med lavere temperatursvingning. For bare BTES blir prisen ved tillatt temperatursvingning 15 K 67 % av prisen for BTES med $\Delta T = 10 K$. Inntjeningstiden for anlegget synker med 7 år ved å gjøre denne endringen.

Oppladningstid

En enkel beregning av oppladningstid viste at brønnparken vil være ferdig ladet opp i løpet av år 5. Denne beregningen tar ikke hensyn til eventuelle ekstra varmetap utover det årets

innsamlede varme opplever. Det tas ikke hensyn til at solfangerne vil ha økt virkningsgrad de første årene grunnet energibærerens lave temperatur inn i solfangerne. Tilbakevinningen av varme i oppladningsårene er ikke kjente verdier, og andre verdier kan finnes hvis empirisk data benyttes.

Byggekostnad for husene

Verdiene som brukes som spesifikk kostnad på husene er estimater på middelverdier. Ettersom dyre eller billige løsninger velges kan denne prisen bli høyere eller lavere.

En inntjeningsstid på 10 år vil si at anlegget har 20 år med drift før levetiden til solfangerne nås. I denne perioden vil salg av varme kunne gi en inntekt på 17 600 000 kroner. Penger spart på redusert strømforbruk kommer i tillegg. Dekkglasset på solfangerne kan byttes ut når slutten på levetiden nærmer seg, og med det gi solfangerne 30 nye år levetid.

5.7.6 Klima og miljø

Boligene

TEK17-boliger krever blant annet større mengde isolasjon og lufttetting for å møte kravene om energieffektivitet. Et slikt hus kan ha høyere klimagassutslipp over levetiden enn en enklere bolig. Dette betraktes ikke i denne oppgaven.

Solfangere

For et fullstendig bilde av utslippene over livsløpet må utslipp fra produksjon og strømforbruk for å drive pumper medberegnes. Det gjøres ikke i denne oppgaven.

Brønnpark

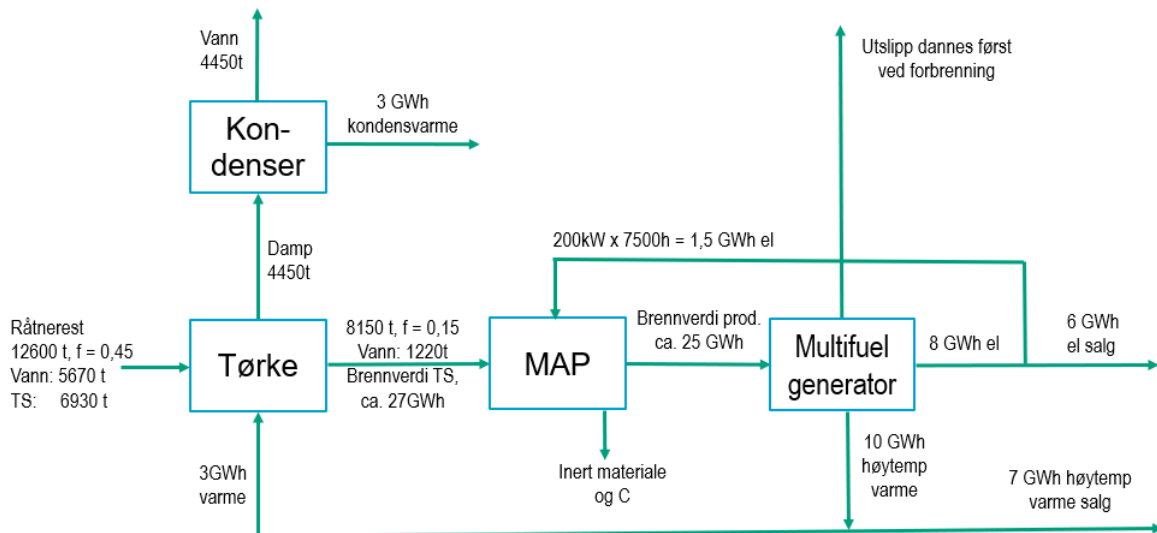
Som for solfangere er det også her utslipp under produksjon av komponenter og indirekte utslipp gjennom bruk av elektriske pumper. Forskjellene i utslipp mellom brønnparkene med temperatursvingning på 10 K og 15 K er det samme som prisforskjellen, altså 67 % av utslippene ved større ΔT .

Elektrisitet

For beregning av utslipp fra elektrisitet velges det å forutsette at hele elektrisitetsbruken kommer fra norsk kraftproduksjon. Dette er sannsynligvis ikke tilfellet og er derfor er mulig kilde til feil.

5.8 EKSEMPEL 2 – MULIGHETSANALYSE FOR MAP SOM SLUTTBEHANDLING AV RÅTNEREST

Under oppgitte antakelser vil MAP og tørkeprosess være selvforsynte med energi og det vil produseres et overskudd av elektrisitet og varme som kan selges. Resultatene passer godt med P. H. Heyerdahls beregninger som ble brukt i hans presentasjon. Figur 17 viser verdier som ble presentert til VEAS.



Figur 17: Flytdiagram av sluttbehandling av råtnereest med MAP [43].

Salg av produsert elektrisitet vil skje ved lavere pris enn innkjøp. Ved å dekke eget strømbehov med elektrisitet produsert i generator vil hver kWh ha samme verdi som hvis strømmen ble kjøpt fra nettet. På denne måten vil verdien til elektrisiteten være høyere enn om den ble solgt til nettet. Hvis salg er ønskelig kan en bedre løsning være å bruke strømmen til å varme opp vann og selge dette til samme pris som resten av den produserte varmen.

Når det kommer til gjenvinning av stoffer i råtnereesten er det ikke klart hvordan dette skal foregå i et slikt system. Det er ikke kjent hva som skjer med stoffene under fordampning og MAP, så for å finne ut om gjenvinning er mulig må det gjennomføres forskning på dette.

En MAP kan produsere kontinuerlig hele året hvis den får tilført tilstrekkelig mengde råstoff. Dette er effektivt for behandling av avfall, men mindre effektivt for inntekten på salg av produsert elektrisitet og varme. Gjennom døgnet og året vil strømprisen svinge, og for en som ønsker høyest mulig inntekt på salg av varme og elektrisitet er det lite gunstig å selge når prisen er lav. Av denne grunn er det smart, og i noen tilfeller kan det være essensielt, å kombinere MAP med et system for sesonglagring av varme. Med for eksempel en brønnpark av stor nok dimensjon kan den produserte varmen lagres fra sommer til vinter, og hele varmemengden kan selges for høyest mulig pris. Også elektrisiteten kan brukes til å produsere varme som igjen kan sesonglagres for senere salg.

6 KONKLUSJON

Gjennom teoretisk eksempel med 50 boliger ble det funnet at et boligområde bestående av boliger med høyt energibehov, maksimert solfangning og tilkobling til felles brønnpark ble 22 millioner kroner dyrere å bygge enn TEK17-boliger som benytter elektrisitet til oppvarming. Gjennom redusert strømforbruk og salg av produsert overskuddsvarme vil merkostnaden fra å velge denne løsningen fremfor TEK17-boliger ha en inntjeningstid på omtrent 10 år. Anlegget har da en resterende levetid på 20 år. Det vil ta 7,6 år med drift før et slikt anlegg har sluppet ut mindre klimagasser enn boliger med elektrisk oppvarming.

Mikrobølgeassistert pyrolyse som sluttbehandling av råtnerest vil produsere et overskudd av varme og elektrisitet. Energimengden i disse produktene er nok til å dekke varmebehovet til 1263 TEK17-boliger med 150 m² BRA, og salget vil gi rundt 11 millioner kroner i inntekt per år. Den årlige inntekten kan økes ved å benytte sesonglagring av varme for å lagre varmen fra sommer til vinter, og selge hele varmemengden når prisen er høy. Det er ikke kjent om gjenvinning av stoffer fra råtneresten er mulig med denne teknologien.

7 KILDER

1. Lev Eppelbaum, I.K., Arkady Pilchin, *Applied geothermics*. 2014, Springer. p. 106.
2. Hellström, S.E.A.G.G.A.J., *Influence on thermal response test by groundwater flow in vertical fractures in hard rock*. *Renewable Energy*, 2003. **28**(14): p. 17.
3. Regjeringen.no. *Klimavennlige bygg for fremtiden*. 2015 [Funnet 20. mai 2019]; [Internett]. Available from: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/klimavennlige-bygg-for-fremtiden/id2396220/>.
4. SINTEF. *Ny kunnskap om fordeling av strømforbruket*. u.d. [Funnet 3. april 2019]; [Internett]. Available from: <https://www.sintef.no/globalassets/upload/energi/nyhetsbrev/ny-kunnskap-om-fordeling-av-stromforbruket.pdf>.
5. Macic, N., *Gir strengere energikrav høyere boligpriser?*, in *Økonomisk Institutt*. 2014, Universitetet i Oslo. p. 90.
6. Jonsson, K.B., *Bruk av værprognoser for optimal styring av snøsmelteanlegg*, in *Institutt for energi- og prosesssteknikk*. 2014, NTNU.
7. Engvold, O. *irradians - Sola*. 2018 [Funnet 20. april 2019]; [Internett]. Available from: <https://snl.no/irradians - Sola>.
8. Barstad, E. n.d.: fornybar.no.
9. Brantenberg, K., *Generell prinsippsskisse av en plan solfanger*. n.d.: fornybar.no.
10. Greenspec. *Solar collector technology*. u.d. [Funnet 27. april 2019]; [Internett]. Available from: <http://www.greenspec.co.uk/building-design/solar-collectors/>.
11. Agency, I.E., *Recommendation: Converting solar thermal collector area onto installed capacity*. IEA SHC, 2004.
12. Quaschnig, V., *Solar thermal water heating*. *Renewable Energy World*, 2004(2): p. 95-99.
13. AventaSolar. *Ny studie av solfangere med fokus på miljøfaktorer og totalkostnader 2013* [Funnet 27. april 2019]; [Internett]. Available from: <https://aventa.no/2013/05/23/ny-studie-av-solfangere-med-fokus-pa-miljofaktorer-og-totalkostnader-aventa-best-i-test/>.
14. Energy, H. *Vi tilbyr solfangere*. u.d. [Funnet 27. april 2019]; [Internett]. Available from: <https://www.hitechenergy.no/tjenester/solfangere/>.

15. Norsk Solenergiforening. *Solfangere*. u.d. [Funnet 27. april 2019]; [Internett]. Available from: <https://www.solenergi.no/solvarme>.
16. Meteonorm. u.d. [Funnet 25. april 2019]; [Internett]. Available from: <https://meteonorm.com/en/meteonorm-features>.
17. Sibbitt, B.M., D, *Seasonal Borehole Thermal Energy Storage – Guidelines for design & construction*. IEA-SHC INFO SHEET, 2015. **45.B.3.1**.
18. Undersøkelse, N.G. *Berggrunn*. 2019 [Funnet 21. april 2019]; [Internett]. Available from: <https://www.ngu.no/emne/berggrunn>.
19. Banks, D., *An Introduction to Thermogeology*. 2nd ed. 2012: Wiley-Blackwell.
20. Chiasson, A.D., *Geothermal Heat Pump and Heat Engine Systems: Theory and Practice*. 2016: Wiley.
21. Helliesen, T., *Solvarmet bolig med lagring av energi i grunnen*, in *Institutt for matematiske realfag og teknologi*. 2015, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.
22. Gehlin, S., *Thermal response test, method development evaluation in Department of environmental engineering, division of water resources engineering*. 2002, Luleå university of technology.
23. Huus-Hansen, W., *Samtale om priser og dieselbruk rundt BTES*. 2019.
24. Nguyen, S.L.F.D.X.P.R.O.D., *Improvement of Borehole Thermal Energy Storage Design Based on Experimental and Modelling Results*. HAL, 2014.
25. Heyerdahl, P.H., *Samtale om solfangning, varmelagring og pyrolyse*. 2019.
26. Lo, Y.-F.H.P.-T.C.S.-L., *A review on microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass*. Sustainable Environment Research, 2016. **26**(3): p. 103-109.
27. Scandinavian Biofuel Company. *Scandinavian biofuel presentation on microwave assisted pyrolysis*. u.d. [Funnet 11. mars 2019]; [Internett]. Available from: <https://www.sbiofuel.com/presentation.html>.
28. Q. M. K. Waheed, M.A.N., P. T. Williams *Pyrolysis of waste biomass: investigation of fast pyrolysis and slow pyrolysis process conditions on product yield and gas composition*. Journal of the Energy Institute, 2013. **86**(4): p. 233 - 241.
29. Bridgewater, A., *Biomass fast pyrolysis*. Thermal Science, 2004. **8**(2): p. 21-50.
30. A. O'Toole, A.G., *Produksjon av 2. generasjons- biodrivstoff via termokjemiske prosesser* 2012.
31. VEAS. *Om VEAS*. u.d. [Funnet 01. mai 2019]; [Internett]. Available from: <https://www.veas.nu/om-veas>.

32. Enova. *Solfanger*. u.d. [Funnet 05. mai 2019]; [Internett]. Available from: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/solenergi/solfanger/>.
33. Enova. *Vannbåren varme*. u.d. [Funnet 5. mai 2019]; [Internett]. Available from: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/varmepumper/vannbaren-varme/>.
34. Hafslund. *Priser på nettleie - privat*. u.d. [Funnet 5. mai 2019]; [Internett]. Available from: <https://www.hafslundnett.no/artikler/nett-og-nettleie/priser-privat/29yQ5Cc4xaKg0wWSKyQOOCM>.
35. SSB, S.s. *Kraftpris, nettleie og avgifter for husholdninger, etter statistikkvariabel og kvartal*. 2019 [Funnet 05. mai 2019]; [Internett]. Available from: <https://www.ssb.no/statbank/list/elkraftpris/>.
36. energidirektorat, N.v.o. *Nasjonal varedeklarasjon 2017*. 2018 [Funnet 9. mai 2019]; [Internett]. Available from: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten-for-energi-rme-marked-og-monopol/varedeklarasjon/nasjonal-varedeklarasjon-2017/>.
37. SSB, S.s. *Gjennomsnittlig energiforbruk per husholdning, etter hustype 1995 - 2012*. 2014 [Funnet 19. februar 2019]; [Internett]. Available from: <https://www.ssb.no/statbank/table/10573>.
38. Tømmerbakke, H.B., *Sesonglagring av solenergi i temisk borehullslager med koaksiale borehullsvarmevexlere*, in *Fakultet for teknologi og realfag*. 2017, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. p. 125.
39. energidirektorat, N.v.o., *Analyse av energibruk i yrkesbygg*. 2016.
40. Scandinavian Biofuel Company. *Microwave Assisted Pyrolysis*. u.d. [Funnet 15. februar 2019]; [Internett]. Available from: <https://www.sbiofuel.com/pyrolysis.html>.
41. boligfix.no. *Hva koster det å bygge hus?* 2019 [Funnet 17. mai 2019]; [Internett]. Available from: <https://boligfix.no/pris/bygge-hus-1528724344186x387759089469909700>.
42. nyhuskatalog.no. *Hva koster det å bygge hus?* 2017 [Funnet 17. mai 2019]; [Internett]. Available from: <https://nyhuskatalog.no/hva-koster-det-a-bygge-hus/>.
43. Heyerdahl, P.H., *Pyrolyse og energigjenvinning av råtnest som sluttbehandling*. 2019.
44. yr.no. *Været som var*. 2019 [Funnet 6. mai 2019]; [Internett]. Available from: [https://www.yr.no/sted/Norge/Oslo/Oslo/Oslo_\(Blindern\)_m%C3%A5lestasjon/detaljert_statistikk.html](https://www.yr.no/sted/Norge/Oslo/Oslo/Oslo_(Blindern)_m%C3%A5lestasjon/detaljert_statistikk.html).



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway