

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Fakultet for miljøvitenskap og teknologi
Institutt for naturforvaltning

Masteroppgave 2014
30 stp

Teknologier for sesonglagring av termisk energi.

Mulige teknologier for sesonglagring av
spillvarme fra avfallsforbrenningsanlegg i Norge.

Christoffer Midthun

Forord

Denne oppgaven markerer slutten på mitt toårige masterstudium i fornybar energi ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet (NMBU), våren 2015. Oppgaven er på 30 studiepoeng.

Jeg vil først og fremst takke min veileder Monica Havkjold, førsteamanuensis ved NMBU, for god veiledning. Det har vært en fantastisk god hjelp å alltid ha Monica tilgjengelig for spørsmål og tips. Takk for motiverende møter og raske og gode svar på mail.

I forbindelse med spørsmål om fjernvarme må jeg takke Egil Evensen, seniorrådgiver i Statkraft for gode, konkrete og raske svar på henvendelser og for data til oppgaven.

Jeg vil også takke min forlovede, Anne Glimsdal Bakke for selskap og motivasjon under arbeidet og for korrekturlesing av oppgaven.

Det å skrive masteroppgave har vært en interessant opplevelse. Tiden denne våren har gått altfor raskt, men på samme tid altfor sakte. Arbeidet har vært gøy, men til tider stressende, krevende, men lærerikt, frustrerende og til slutt tilfredsstillende.

Ås, 14. mai 2015

Christoffer Midthun

Sammendrag

Formålet med denne oppgaven går ut på å vise hva som finnes av teknologier for sesonglagring av termisk energi og hvilke av disse teknologiene som egner seg til å lagre spillvarme fra avfallsforbrenningsanlegg i Norge. For å sette seg inn de ulike teknologiene er det i oppgaven benyttet litteraturstudium som metode. Det er også gjort noen enkle beregninger med utgangspunkt i et 75 GWh lager, for å vurdere egnetheten til de ulike teknologiene i forhold til lagringskapasitet, lagerstørrelse, lagringstap, kostnader og nåverdi.

Resultatene fra litteraturstudiet viser at det finnes mange ulike teknologier for sesonglagring av termisk energi. Den termiske energien kan lagres som tre ulike energiformer; følbare varme, latent varme og kjemisk energi, hver med ulike teknologier. De følbare teknologiene blir sett på som modne, mens teknologier basert på latent varme og kjemisk energi betraktes som umodne. Både latent varme og kjemisk energi har mye høyere lagringskapasitet og mindre lagringstap enn de følbare teknologiene, men på grunn av at disse teknologiene fortsatt er på forskningsstadiet er de ikke relevante for bruk i Norge enda.

Av de følbare teknologiene skiller ATES (Aquifer thermal energy storage) og BTES (Borehole thermal energy storage) seg ut som de mest interessante, men hvor bare BTES er relevant for bruk i Norge. ATES er den desidert rimeligste av varmelagringsteknologiene, og har en lagringskapasitet som er middels i forhold til de andre følbare teknologiene. Ingen av varmelagringsteknologiene ender opp med en positiv nåverdi, men ATES er den av teknologiene som har den minst negative nåverdien og krevde en økning i varmepris på 0,1 kr/kWh for å gå i null. ATES er avhengig av en spesifikk geologi, men på grunn av få egnede lokaliteter, er ikke teknologien relevant for store lagre i Norge.

BTES har den laveste lagringskapasiteten og krever derfor det største lagringsvolumet. Den norske geologien er derimot godt egnet for denne teknologien og det finnes god kompetanse på boring og varmepumper i Norge, noe som er relevant for BTES. Nåverdiberegningene viser at BTES trenger en varmepris på 1,44 kr/kWh for å gå i null ved endt levetid.

Abstract

The purpose of this study is to show the different technologies for seasonal storage of thermal energy and which of these technologies that are suitable to store waste heat from waste incinerators in Norway. To get familiarized with the various technologies, literature study is used as method. Simple calculations based on a 75 GWh storage is used to assess the suitability of the various technologies in relation to storage capacity, storage size, storage losses, costs and present value.

The results of the literature study shows that there are many different technologies for seasonal storage of thermal energy. The thermal energy can be stored as three different forms of energy; sensible heat, latent heat and chemical energy, each with different technologies. The sensible technologies are seen as mature, while technologies based on latent heat and chemical energy are considered immature. Both latent heat and chemical energy have much higher storage capacity and less storage losses than the sensible technologies, but because these technologies are still in on a research stage, they are not relevant for use in Norway yet.

The sensible technologies ATES (Aquifer thermal energy storage) and BTES (Bore hole thermal energy storage) stand out as the most interesting, but only BTES is relevant for use in Norway. ATES is by far the most affordable of heat storage technologies, and has a storage capacity that is in between the other sensible technologies. None of heat storage technologies end up with a positive net present value, but ATES is the technology that have the least negative present value and need an increase in revenues of 0.1 NOK / kWh to break even. ATES is dependent on a specific geology, but because of the few suitable sites, the technology is not relevant for large storages in Norway.

BTES have the lowest storage capacity and therefore requires the largest storage volume of the technologies. The Norwegian geology, however, is well suited for this technology and there is good expertise in drilling and heat pumps in Norway, which is relevant for investment in BTES. The present value calculations show that BTES need a heat price of 1.44 NOK / kWh to break even at the end of their lifetime.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	II
Abstract	III
Figur-og tabelloversikt	VI
Forkortelser	VII
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling og forskningsspørsmål	1
1.3 Avgrensning av oppgaven	2
2 Metode	3
2.1 Terminologi	3
2.2 Litteraturstudie	3
2.3 Beregninger	4
3 Teknologier	6
1.1 Følbar varme	7
1.1.1 Beskrivelse	7
1.1.2 Kunnskapsstatus.....	7
1.1.3 Teknologier basert på følbar varme	7
1.1.4 Bruksområder.....	17
1.2 Latent varme.....	17
1.2.1 Beskrivelse	18
1.2.2 Kunnskapsstatus.....	18
1.2.3 Teknologier basert på latent varme.....	19
1.2.4 Bruksområder.....	25
1.3 Kjemisk energi	25
1.3.1 Beskrivelse	25
1.3.2 Kunnskapsstatus.....	29
1.3.3 Teknologier basert på kjemisk energi.....	29
1.3.4 Bruksområder.....	32
4 Resultat	34
4.1 Teknologier.....	34

1.4	Status i Norge.....	39
1.4.1	Eksempler på anlegg i Norge	40
1.5	Lagringspotensialet for spillvarme fra avfallsforbrenningsanlegg.....	42
1.6	Beregninger	44
1.6.1	Størrelse på lager	44
1.6.2	Lagringstap.....	45
1.6.3	Kostnader	46
1.6.4	Nåverdi.....	49
5	Diskusjon	52
5.1	Litteraturstudie	52
5.2	Beregninger	54
6	Konklusjon	58
7	Videre arbeid.....	59
	Litteraturliste.....	60

Figur-og tabelloversikt

<i>Figur 1: Oversikt over teknologier, materialer og metoder for lagring av termisk energi. Basert på (Bales 2005; N'Tsoukpoe et al. 2009; Sharma et al. 2009; Zhou et al. 2012)</i>	6
<i>Figur 2: Operasjon av ATES ved syklisk og kontinuerlig regime (Nielsen 2003)</i>	9
<i>Figur 3: Oversikt over delene i et borehull (Anon. Ukjent årstall)</i>	11
<i>Figur 4: Utforming av u-rør og koaksiale rør (Gehlin 2002)</i>	12
<i>Figur 5: Viser hvordan TRT fungerer (Sanner et al. 2005)</i>	14
<i>Figur 6: Utforming av CTES (Nordell 2000)</i>	15
<i>Figur 7: Utforming av anlegg som benytter solfangere til å fange varme og PCM som lager (Öztürk 2005)</i> ...	21
<i>Figur 8: Ulike utforminger av snø-/islagre (Skogsberg & Nordell 2006)</i>	23
<i>Figur 9: Oversikt over snø-/islageret tilknyttet Sundsvall sykehus (Skogsberg & Nordell 2006)</i>	24
<i>Figur 10: Enkel forklaring på sorpsjon med åpent system (Pinel et al. 2011)</i>	27
<i>Figur 11: Utforming av et åpent system med hydrert salt som lagringsmaterial (Zondag et al. 2013)</i>	28
<i>Figur 12: Gass-gassreaksjon med metanol som lagringsmaterial (Yan et al. 2015)</i>	30
<i>Figur 13: Viser hvordan magnesiumsulfid lagres som magnesiumsulfat og vann (Zondag et al. 2009)</i>	31
<i>Figur 14: Viser hvordan termisk energi kan lagres ved at en væske konsentreres (Weber & Dorer 2008)</i>	32
<i>Figur 15: Oversikt over forskningstemaene ved de ulike konferansene (Nordell & Gehlin 2009)</i>	34
<i>Figur 16: Oversikt over utviklingsnivået til lagringsteknologier (IEA 2014a)</i>	35
<i>Figur 17: Energitetthet til ulike energiformer og materialer (N'Tsoukpoe et al. 2009)</i>	36
<i>Figur 18: Viser forholdet mellom fjernvarmeproduksjon og mengde avkjølt til luft</i>	42
<i>Figur 19: Mengde varme som bort fra de tre linjene til Heimdal varmesentral over tid</i>	43
<i>Figur 20: Lagringskapasiteten til de ulike lagringsteknologiene</i>	44
<i>Figur 21: Volumet til det 75 GWh store lageret for de ulike teknologiene</i>	45
<i>Figur 22: Lagringstapet til de ulike teknologiene for et lager på 75 GWh</i>	45
<i>Figur 23: Investeringskostnader for ulike følbare lagringsteknologier (Schmidt et al. 2003)</i>	46
<i>Figur 24: Investeringskostnader for lageret</i>	48
<i>Figur 25: Driftskostnader for lageret</i>	48
<i>Tabell 1: Oppsummering av de viktigste funnene fra litteraturstudiet for følbare varme</i>	37
<i>Tabell 2: Oppsummering av de viktigste funnene fra litteraturstudiet for latent varme</i>	38
<i>Tabell 3: Oppsummering av de viktigste funnene fra litteraturstudiet for kjemisk energi</i>	39
<i>Tabell 4: Kostnader for de ulike teknologiene</i>	47
<i>Tabell 5: Effekten av lagringstap på inntekt</i>	49
<i>Tabell 6: Nåverdiberegning for ATES</i>	49
<i>Tabell 7: Nåverdiberegning for BTES</i>	50
<i>Tabell 8: Nåverdiberegning for vanntank</i>	50
<i>Tabell 9: Nåverdiberegning for snø-/islager</i>	50
<i>Tabell 10: Nåverdiberegning for teknologier basert på latent varme</i>	51
<i>Tabell 11: Nåverdiberegning for teknologier basert på kjemisk energi</i>	51
<i>Tabell 12: Varmeprisen som gir en nåverdi = 0 for de ulike teknologiene</i>	51

Forkortelser

ATES	Aquifer thermal energy storage
BTES	Borehole thermal energy storage
CTES	Cavern thermal energy storage
GCHP	Ground-coupled heat Pump
GSHP	Ground-scourse heat pump
PCM	Phase change material
TRT	Thermal response test
UTES	Underground thermal energy storage

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Energi er en ressurs, og ressurser bør forvaltes på best mulig måte. For å kunne forvalte ressursene våre på best mulig måte trenger man ulike verktøy. Lager for termisk energi er et slikt verktøy. Dette verktøyet gjør oss i stand til å lagre energi over tid. I forbindelse med fornybar energi oppfatter de fleste lagring av termisk energi med lagring av energi fra solen. Produksjon av energi fra fornybare energikilder som sol og vind har den ulempen at produksjon og forbruk av energi ikke alltid samsvarer. Et lager hvor den energien som ikke blir utnyttet kan lagres til det er behov for den, vil derfor være gunstig. Lagring av solenergi har et stort potensial og er i dag et av de feltene det blir forsket mest på i forbindelse med lagring av termisk energi. Et felt som derimot ikke har fått like stor fokus, er lagring av termisk energi fra fjernvarmeanlegg.

Fjernvarme er en næring som er i stadig vekst. I løpet av ett år økte varmeforbruket med 10.6 %, fra 4,2 TWh i 2012 til 4,7 i 2013 (SSB 2014; Aanesen & Fedoryshyn 2014). En fordel med fjernvarme er at anleggene kan benytte en rekke ulike brensler. Den viktigste energikilden som benyttes i fjernvarmeanlegg er avfall, som i 2012 sto for 42 % av den totale fjernvarmeproduksjonen. Avfallet som skal forbrennes må på grunn av lukt- og lagringsproblemer forbrennes fortløpende (Hamnaberg & Selfors 2010). Ettersom avfallet produseres året rundt, er fjernvarmeanleggene nødt til forbrenne avfallet hele året. Et problem med dette er at forbruket av varme fra anlegget ikke er konstant året rundt. Etterspørselen etter varme er størst om vinteren og lavere om sommeren. Dette gjør at en del fjernvarmeanlegg om sommeren produserer mer varme enn det er etterspørsel etter. Denne varmen blir avkjølt til luft. Hvor mye varme som går til spille på denne måten avhenger av gjennomsnittstemperaturen det gjeldende året. I kalde år er varmebehovet større enn i varme år, og mengden varme som kjøles bort varierer deretter. Tapet av denne energien ville ikke vært nødvendig dersom energien istedenfor kunne lagres og benyttes når det er behov for den.

1.2 Problemstilling og forskningsspørsmål

I denne oppgaven skal jeg ta for meg lagringsteknologier for sesonglagring av termisk energi for komme fram til en mening om hvilke teknologier som er mest aktuelle i Norge. For å komme fram til dette skal jeg forklare hvordan de ulike teknologiene fungerer, hvor langt

teknologiene har kommet i utviklingen, hva som skjer på forskningsfronten, hvor teknologiene benyttes og gjøre noen enkle beregninger for å sammenligne teknologiene. Et lager for lagring av spillvarme fra fjernvarmeanlegg vil bli brukt som grunnlag for beregningene.

Problemstillingen for oppgaven er:

Hvilke teknologier er mest aktuelle for sesonglagring av spillvarme fra norske avfallsforbrenningsanlegg?

For å kunne svare på problemstillingen vil jeg jobbe ut i fra følgende forskningsspørsmål:

- Hvilke teknologier for varmelagring finnes, og hvor langt i utviklingen er de kommet?
- Hvilke av teknologiene kan fungere som lager for spillvarme fra forbrenningsanlegg?
- Vil bruk av lager for spillvarme være lønnsomt?

1.3 Avgrensning av oppgaven

Både korttidslagring og sesonglagring av termisk energi er interessante tema, men på grunn av begrenset mengde tid, velger jeg å fokusere på sesonglagring og ikke korttidslagring av varme i denne oppgaven. Grunnen til at jeg velger sesonglagring av varme er at dette feltet er kommet kortere i utviklingen og har flere teknologier på forskningsstadiet enn korttidslagring. Jeg synes ny teknologi er interessant og velger derfor å fokusere på sesonglagring.

Termisk energi kan lagres i et stort spekter av temperaturer og en mengde ulike teknologier. Det forskes blant annet mye på lagring av temperaturer med høye temperaturer. Denne oppgaven begrenser seg derimot til hovedsakelig å fokusere på teknologier som kan lagre termisk energi som samsvarer med temperaturen som blir avgitt fra fjernvarmeanlegg. I oppgaven presenteres også en teknologi for lagring av kulde, noe som kan være relevant for bruk i Norge.

Mye av teori og forskning innen varmelagring er meget teknisk, kjemisk eller geologisk krevende. Det finnes mange interessante temaer som kan forskes på innen disse feltene i forbindelse med varmelagringsteknologier. Denne oppgaven blir derimot avgrenset til å gå gjennom det grunnleggende innenfor teknologiene, for å gi et oversiktsbilde av hva som finnes av teknologier og hvordan disse fungerer.

2 Metode

2.1 Terminologi

Det meste av litteratur om varmelagringsteknologier kommer fra utlandet og er stort sett skrevet på engelsk med uttrykk og forkortelser som er godt etablert. Istedenfor å oversette terminologi fra engelsk til norsk kommer jeg til å bruke den engelske terminologien i dette arbeidet. Videre i teksten kommer jeg også hovedsakelig til å benytte meg av forkortelser for at teksten skal være lett å lese.

2.2 Litteraturstudie

For å svare på problemstilling og forskningsspørsmål har jeg gjennomført et litteraturstudie for å tilegne meg kunnskap om et felt jeg i utgangspunktet hadde begrenset kunnskap om før arbeidet med denne oppgaven. Valg av litteraturstudie som metode for oppgaven ble tatt på grunnlag av at oppgaven hadde et omfattende tema som jeg hadde lite kunnskap om. Ved å utføre et litteraturstudium ønsket jeg å finne status på forskningsfronten, ulike egenskaper til teknologiene og kostnader. Litteraturen som er studert er en blanding av forskning på spesifikke teknologier og materialer, gjennomganger av flere ulike teknologier, artikler om spesifikke anlegg og noen bøker. Under innsamling av data har det vært viktig å fokusere på at litteraturen er valid i forhold til problemstillingen for oppgaven og at litteraturen har reliabilitet. Følgende litteratur er blant de mest benyttede i oppgaven. Denne litteraturen benyttes på grunn av mye grunnleggende informasjon om teknologiene.

Underground Thermal Energy Storage (Lee 2013). Denne boken, skrevet av Kun Sang Lee, er en omfattende gjennomgang av UTES-teknologier. Den beskriver funksjon, forutsetninger, forskning, fysikk og status.

A review of available technologies for seasonal thermal energy storage (Xu et al. 2014). Artikkelen beskriver teknologier basert på følbar, latent og kjemisk varme. Den viser også til ny forskning og framtidsutsikter for teknologiene.

A review on phase energy storage: materials and applications (Farid et al. 2004). Denne artikkelen beskriver tidligere forskning på teknologier basert på latent varme, og ny forskning på utvikling av nye PCM (Phase Change Materials).

Review on thermal energy storage with phase change materials and applications (Sharma et al. 2009). Forskningsartikkelen tar for seg latent varme som teknologi og beskriver ulike PCM. Artikkelen beskriver også ulike bruksområder for latent varme.

A review on long-term sorption solar energy storage (N`Tsoukpoe et al. 2009). I denne forskningsartikkelen presenteres det som den gang var det nyeste innen forskning på kjemisk sorpsjon. Hovedfokuset i artikkelen er på ulike materialer og problemer man står ovenfor ved sesonglagring av solvarme.

A review of promising candidate reactions for chemical heat storage (Yan et al. 2015). Artikkelen viser til og beskriver forskning på mulige materialer for bruk i kjemiske reaksjoner. Ny forskning, ulike bruksområder, arbeidstemperaturer og framtidsutsikter blir beskrevet og analysert.

2.3 Beregninger

Etter litteraturstudiet har jeg benyttet den tilegnede informasjonen om teknologiene og utført beregninger for å kunne sammenligne teknologiene kvantitativt ved å regne ut nåverdi. Med nåverdi menes dagens verdi av en fremtidig sum (Boye & Koekebakker 2006). Dette er nyttig å vite for å kunne vurdere om et prosjekt vil være lønnsomt ved endt levetid. For å regne ut nåverdien til et prosjekt benyttes nåverdimetoden, som baserer seg på fremtidige diskonterte kontantstrømmer.

Nåverdi er benyttet som metode i oppgaven for å kunne sammenligne og vurdere lønnsomheten til de ulike teknologiene. Formel for nåverdimetoden ser slik ut:

$$NV = -\frac{CF_0}{(1+i)^0} + \frac{CF_1}{(1+i)^1} + \frac{CF_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+i)^n} = -CF_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t}$$

CF_t er kontantoverskudd eller innbetalingsoverskuddet i år t .

CF_0 er investeringsutgiften.

n er levetid

i er kalkulasjonsrenten

Utgangspunktet for beregningene er behovet for sesonglagring av 75 GWh termisk energi fra et avfallsforbrenningsanlegg. For å kunne beregne nåverdien til teknologene må kontantstrømmen først beregnes. Kontantstrømmen til et prosjekt vil si investeringsutgifter

minus driftskostnader pluss inntekter for hvert år gjennom levetiden til prosjektet. Det er derfor utført beregninger for investerings- og driftskostnader for lageret, og de mulige inntektene fra den lagrede energien. For å komme fram til investerings- og driftskostnader ble lagerkostnadene per kWh regnet ut på bakgrunn av tall fra ulike anlegg. De mulige inntektene ble beregnet med utgangspunkt i verdier supplert av Egil Evensen, seniorrådgiver i Statkraft. Ved lagring av den termiske energien er det et visst varmetap. Varmetapet er beregnet og trukket fra de mulige inntektene.

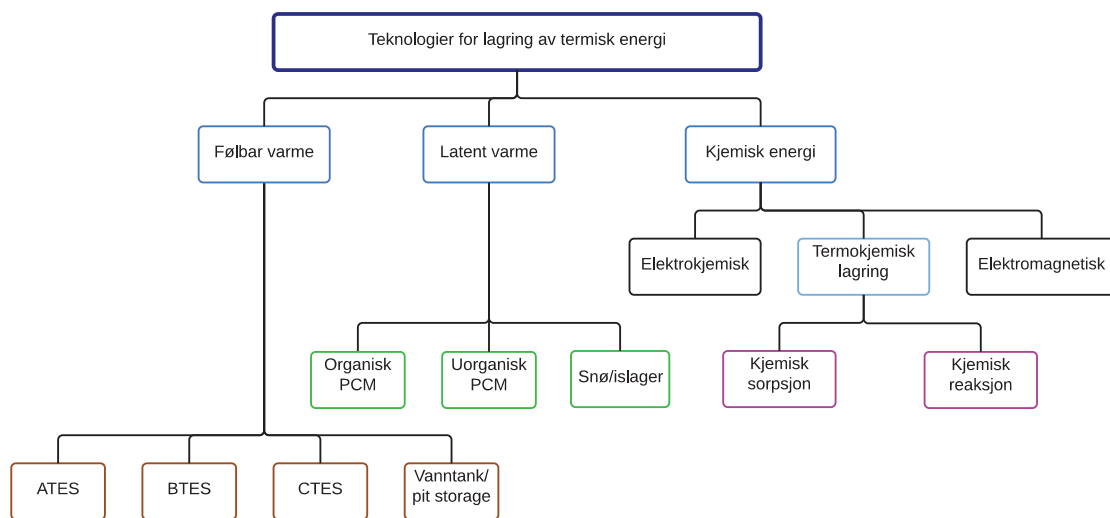
Etter at nåverdi var beregnet ble det gjort en ny beregning for å finne ut hva inntekten per kWh måtte vært for at nåverdien til prosjektet skulle bli null ved endt levetid. Dette ble gjort for å få vite hvor mye høyere inntekten per kWh måtte ha vært for at prosjektet skulle blitt lønnsomt. Denne beregningen er utført ved bruk av målsøkingsfunksjonen i excel.

Det er også interessant å sammenligne volumet som trengs for å lagre de 75 GWh termisk energi. Det er derfor gjort beregninger for å beregne størrelsen på lageret for de ulike teknologiene.

3 Teknologier

Det er mange faktorer som spiller inn og må kalkuleres ved utforming og bruk av ulike lagringsteknologier. Mange av faktorene er kompliserte og krever dypere forståelse av fysikk, kjemi og geologi for å forstås, men på grunn av rammene og målet med dette prosjektet, kommer jeg bare til å gjøre greie for det grunnleggende innenfor hver enkelt teknologi.

Varmelagring deles vanligvis inn i tre hovedkategorier, følbar, latent og kjemisk lagring. Innen hver kategori finnes det en rekke ulike teknologier for lagring av varme. Noen av teknologiene egner seg for lagring i timer til dager (korttidslagring), mens andre er best egnet til lagring over flere måneder (sesonglagring). I figur 1 ser man hvilke teknologier som finnes innen hver av de tre formene for energi. Teknologiene i figuren blir i oppgaven forklart på grunnleggende nivå. Hvor godt teknologiene er utviklet varierer stort, fra teknologier som er på forskningsstadiet til teknologier som har vært i kommersiell bruk i flere tiår.



Figur 1: Oversikt over teknologier, materialer og metoder for lagring av termisk energi. Basert på (Bales 2005; N'Tsoukpoe et al. 2009; Sharma et al. 2009; Zhou et al. 2012)

Termisk energi kan lagres med ulik temperatur og deles gjerne inn i lav, middels og høy temperatur. Lav temperatur vil si temperatur opp til og med 10 °C, middels temperatur mellom 10 og 250 °C og høy temperatur over 250 °C (IEA 2014a).

Det finnes mange ulike teknologier for å lagre termisk energi. Innen kategorien følbar varme finnes det en gruppe teknologier som på engelsk kalles Underground Thermal Energy Storage

(UTES). Lee (2013) definerer UTES som teknologier som benytter naturlige grunnforhold til å lagre termisk energi. Innen UTES blir følgende teknologier tatt med i oppgaven; Aquifer Thermal Energy Storage (ATES), Borehole Thermal Energy Storage (BTES) og Cavern Thermal Energy Storage (CTES). I tillegg til UTES-teknologiene finnes det også vann tank/pit storage i kategorien følbar varme, som helt eller delvis kan lagres i eller over bakken.

I kategoriene latent og kjemisk varme er det ikke så mange ulike former for teknologi, men mange ulike variasjoner innen teknologiene. Variasjoner i bruk av ulike kjemiske stoffer og forbindelser fører til store forskjeller i ytelse i disse kategoriene.

1.1 Følbar varme

I dette delkapittelet vil jeg først definere og beskrive begrepet følbar varme, i tillegg til å gjøre kort greie for hvilken forskning som er gjort på dette området. Deretter vil jeg beskrive ulike teknologier basert på følbar varme og til slutt bruksområder for slik varmelagring.

1.1.1 Beskrivelse

Følbar varme er den termiske energien som lagres ved å øke temperaturen i en væske eller et solid materiale. Varmemengden som lagres bestemmes av den spesifikke varmen til materialet og temperaturøkningen (Xu et al. 2014). Det er derfor ønskelig at lagringsmediet har så høy spesifikk varmekapasitet som mulig (Lee 2013). Teknologier som lagrer termisk energi som følbar varme er teknologisk enkle i forhold til teknologier som benytter latent varme eller kjemisk energi. Denne formen for termisk lagring er den enkleste og rimeligste, men også den som har det laveste energitettheten av de tre lagringsformene og den av lagringsformene som har det største tapet av termisk energi under lagring (Lee 2013).

1.1.2 Kunnskapsstatus

Bruk av UTES startet i Kina med lagring av kulde i ATES-systemer på 1960-tallet (Lee 2013). Forskning og utviklingen av teknologier startet ellers for alvor på 1970-tallet. De følbare teknologiene betraktes som modne og det finnes mye erfaring fra bruk og en rekke studier om slike teknologier. Interessen for de ulike teknologiene varierer til dels fra land til land. ATES-systemer er av særlig interesse for land som Sverige, Tyskland, Nederland og Canada. BTES-systemer er for eksempel mye forsket på og brukt i landene Sverige, Norge, Belgia, Tyskland og Sveits.

1.1.3 Teknologier basert på følbar varme

Aquifer thermal energy storage (ATES)

En akvifer er en naturlig geologisk formasjon i bakken, som har et høyt vanninnhold (Hofstad 2014). Tre former for energi kan lagres og utnyttes i en akvifer: kulde, varme og kombinert varme- og kulde (Lee 2013). For at man skal kunne benytte ATES er man avhengig av riktige geologiske forhold (Zizzo 2009). I boken "Thermal energy storage" fra 2013 nevner Lee (s.66-67) de viktigste forholdene man må ta i betraktning når man skal vurdere en lokalitet. De følgende punktene er særlig viktige:

- Vann er lagringsmediet i et slik system og det er derfor behov for grunnforhold som kan inneholde store mengder grunnvann. Man kan dele vannet i grunnen i to deler: over og under grunnvannsspeilet. Grunnvannsspeilet er nivået i bakken hvor vannets trykk er lik lufttrykket (Tollan 2012). Over grunnvannsspeilet finner man den umettede sonen (markvann) hvor sprekker og porer er delvis fylt med vann og resten luft. Under grunnvannsspeilet er den mettede sonen (grunnvann) hvor sprekker og porer er helt fylt med vann. Jo større mengde vann en akvifer kan lagre per enhet volum, desto mindre trenger det totale volumet til akviferen være for å kunne lagre en viss mengde energi. Porøse sedimentære bergarter er derfor godt egnet.
- Når man har behov for å ta ut energi eller har et overskudd av energi man vil tilføre akviferen, krever dette at man må kunne ta ut eller tilføre store mengder vann. Det betyr at grunnen må ha høy hydraulisk konduktivitet (ledningsevne). Den hydrauliske konduktiviteten er det mest avgjørende momentet ved et ATES-prosjekt og er et mål for grunnens evne til å transportere vann. Størrelsen og formen på porene i grunnen er avgjørende for den hydrauliske konduktiviteten.
- Den termiske konduktiviteten til grunnen er også viktig for å holde best mulig på energien i akviferen. Termisk konduktivitet er en verdi for et materiales evne til å lede varme. Konduktiviteten bestemmes av den mineralske sammensetningen og porøsiteten til materialet. Den termiske konduktiviteten i grunnen er vanligvis mellom 2 og 5 W/mK, mens for eksempel luft og kobber har en termisk konduktivitet på henholdsvis 0,024 og 401 W/mK.
- Vannet i grunnen er lagringsmediet. Dette blir varmet opp og kjølt ned, pumpet inn i akviferen og deretter pumpet ut igjen. Vannkjemien i grunnen er et problemområde og byr på flere ulike problemer (Lee 2013). De vanligste problemene som kan oppstå er fortetning av brønner og varmevekslere, på grunn ulike av mineralske avsetninger og korrodering av ulike deler i systemet.

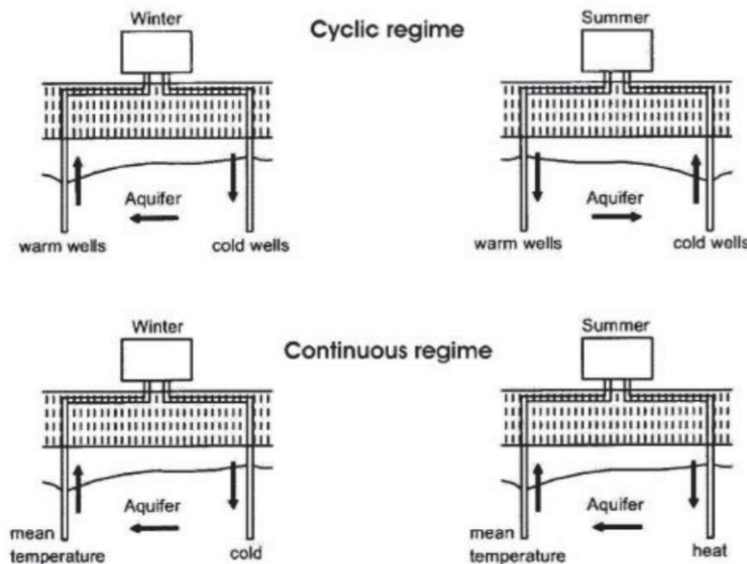
Hvilket ATES system som bør benyttes er avhengig av det termiske energibehovet man har.

Kulde blir hovedsakelig brukt til kjøling av bygg og utstyr, og kan lagres i alt fra timer til flere måneder. Temperaturen på vannet som bli lagret er i området 6-12 °C.

Varmelagring kan for ATES-systemer deles i to kategorier, lav til moderat temperatur og høy temperatur. Lav til moderat temperatur vil si 10-40 °C, og høy temperatur 40-150 °C.

Bruksområdet til slike ATES-systemer er stort og omfatter alt fra oppvarming av bygg, til å holde veier isfrie. Temperaturområdet i et ATES for sesonglagring av varme er generelt i området fra 10 °C opp til 80-90 °C, men det har blitt eksperimentert med temperaturer opp til 150 °C (Kabus et al. 2009; Lee 2013; Sanner & Knoblich 1999). Et system som kan lagre både varme og kulde benytter to eller flere brønner hvor én lagrer varme og den andre kulde. Et slikt system er ofte kombinert med varmepumpe og benyttes av større bygg og anlegg til oppvarming om vinteren og kjøling om sommeren.

En akvifer kan opereres på to ulike måter; i en syklus eller kontinuerlig, regime slik som figur 2 viser (Nielsen 2003).



Figur 2: Operasjon av ATES ved syklisk og kontinuerlig regime (Nielsen 2003)

Når en akvifer blir operert ved et kontinuerlig regime vil man ha faste brønner for innføring og uttak av termisk energi. Temperaturen på vannet som tas ut av akviferen vil da være lik temperaturen som er i grunnen ved det tidspunktet. Om vinteren føres det kaldt vann ned i

bakken og man tar ut vann med høyere temperatur enn utetemperaturen. Sommerstid er det motsatt. Da føres varmt vann inn i baken og man henter ut kaldere vann enn utetemperaturen. Temperaturen i bakken ned til en dybde på rundt 10 meter, vil variere med årstider og utetemperatur, men ved større dyp enn dette vil temperaturen i bakken være konstant gjennom året (Lee 2013). Temperaturen vil også bli 1-3 °C høyere for hver 100 meter ned i bakken man kommer. Kontinuerlig regime er et enkelt system og har bare behov for pumper ved én av brønnene, men systemet har bare mulighet for å hente ut termisk energi tilsvarende grunntemperaturen (Nielsen 2003).

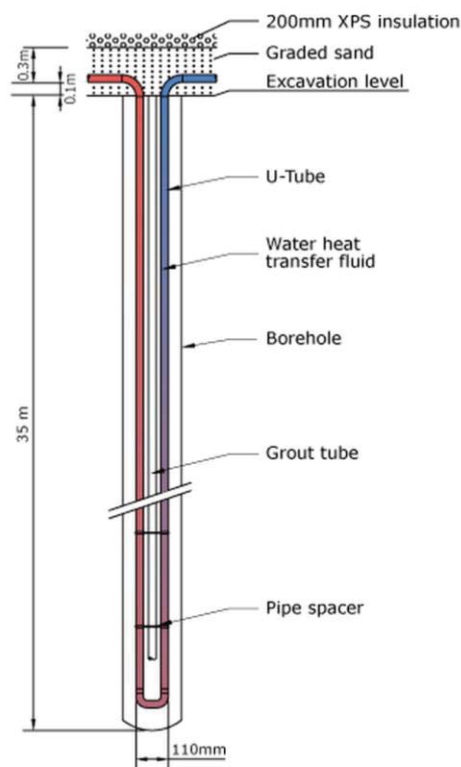
Et syklisk regime er et mer komplisert system, men man har muligheten til å lagre og hente ut vann med temperatur over og under grunntemperaturen. I et slikt system har man egne brønner for varme og kulde og kan føre inn og ta ut energi fra begge brønnene. Om vinteren vil man føre kulde ned i den kalde brønnen og hente ut varme fra den varme brønnen. Denne varmen ble tilført den varme brønnen gjennom sommeren hvor kulde ble hentet ut av den kalde brønnen.

At anlegg ble installert i Neubrandenburg i 2004 og er et eksempel på ATES-anlegg (Kabus et al. 2009). Det er boret 4 brønner til en dybde av 1200 m, hvor 100 m³ vann kan føres inn eller tas ut av hver av brønnene per time. De tre første årene av driften til anlegget blir presentert i artikkelen til Kabus et al. (2009), og forfatterne forteller at bortsett fra én ødelagt pumpe har ikke anlegget hatt noen større problemer. I 2005/2006-sesongen ble lageret tilført 14,300 MWh varme og 6500 MWh varme ble tatt ut. Anlegget hadde altså et tap på 54 %. Lagringstemperaturen i lageret holder 70-80 °C.

Borehole thermal energy storage (BTES)

I motsetning til ATES, som benytter seg av energien lagret i vann i grunnen, benytter BTES seg av energi som er lagret i bakken. For å hente ut eller tilføre energien, sirkuleres væske inn og ut av hull boret i bakken (Nielsen 2003). For et BTES-system er termisk konduktivitet og varmekapasitet de viktigste parameterne (Lee 2013). Varmekapasiteten til et materiale er forholdet mellom temperaturstigningen og den tilførte mengden varme, og måles i joule per kelvin (J/K) (Grøn 2009). Dette er et mål for hvor lett et materiale tar opp varmen som blir tilført.

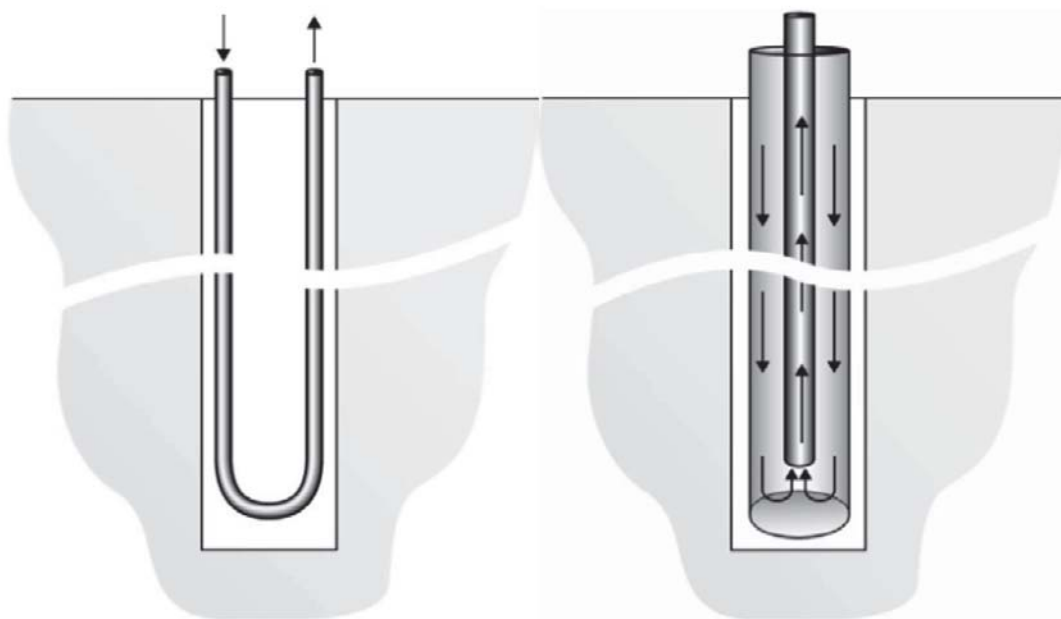
BTES-systemer er ofte kombinert med varmepumper. Slike pumpesystemer kalles da ground-coupled heat pump systems (GCHP) (Lee 2013). Dybden på hullene varierer stort, men er vanligvis 20-300 meter og har en diameter på 10-15 centimeter (Gao et al. 2009; Gehlin 2002; Lee 2013). Temperaturen i ulike BTES-anlegg kan komme opp til 90 °C, men lavere temperaturer er mer vanlig (Nordell et al. 2007). Væsken som sirkuleres er oftest vann, eventuelt vann tilsatt frostvæske og blir sirkulert enten i et åpent eller et lukket system, se figur 3.



Figur 3: Oversikt over delene i et borehull (Anon. Ukjent årstall)

I et åpent system føres væsken inn og ned til bunnen av hullet gjennom et rør. Ved bunnen er røret åpent og væsken kan flyte fritt i hullet. Ved toppen av hullet, men fortsatt under grunnvannsspeilet, fører et nytt rør væsken ut av hullet. I et lukket system føres væsken inn i horisontale eller vertikale rør fra overflaten, ned til bunnen og opp igjen til overflaten uten fri sirkulasjon i hullet (Lee 2013). Rørene fungerer som varmevekslere (Xu et al. 2014). De to vanligste utformingene på rørene i et lukket system er u-formede- og koaksiale rør slik figur 4 viser (Gehlin 2002). U-rør kan være enten enkle eller doble. Enkle u-rør med ett hull inn og ett hull ut av bakken er det vanligste, men doble rør med to hull i hver retning blir mer vanlig. I u-formede rør utveksles det energi mellom bakken og væsken på vei ned og opp fra bakken,

mens i koaksiale rør overføres energi én av veiene. Dette er fordi koaksial rør er utformet med rør inni hverandre, slik at det sentrale røret dermed er isolert. De kan enten være enkle, der et sentralt rør ligger inne i et større, eller det kan være et sentralt rør omkranset av flere andre. Et system der flere rør med mindre diameter omkranser et sentralt rør vil ha større overflate som er i kontakt med grunnen, og vil derfor ha høyere overføringskapasitet enn et system hvor bare ett rør er i kontakt med grunnen (Ljungqvist et al. 2013).



Figur 4: Utforming av u-rør og koaksiale rør (Gehlin 2002)

Antall hull som borres er avhengig av hvor stort lagringsbehov man har, grunnforholdene og hvor dype hull man borer. Når man borrar flere hull blir de boret i formasjon. De vanligste formasjonene er kvadratisk og sekskantet (Nielsen 2003). Kvadratisk formasjon er lettere å borre og lettere koble sammen, mens en sekskantet formasjon vil ha bedre overføringskapasitet og mindre varmetap til grunnen. Ved tilførsel av varme til borehullene blir varmen først ført ned i sentrum av borehullformasjonen for så å føres ut mot kantene av BTES-systemet (Grycz et al. 2014). Det motsatte skjer ved uttak av varme. Da hentes varmen fra de ytterste borehullene først og de sentrale sist. Dette fører til lavest varmetap i borehullene.

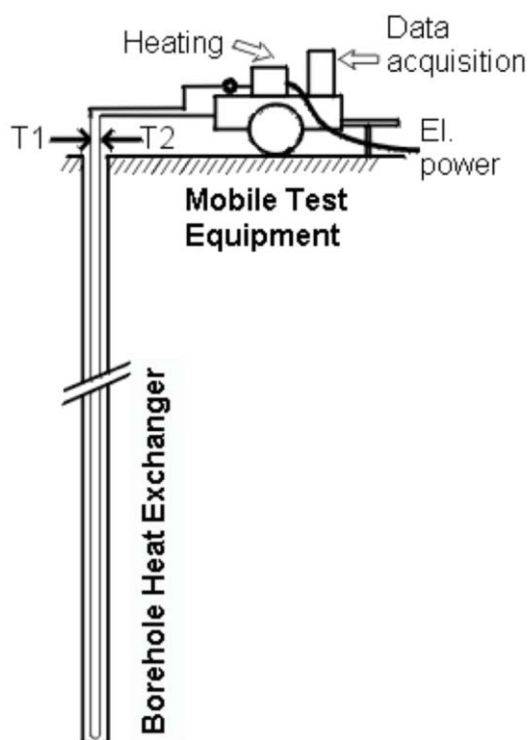
For effektiv termisk overføring til og fra grunnen fylles volumet rundt rørene i borehullet med fyllmasse som har godt termisk ledeevne (Lee 2013). I Norge og Sverige benyttes oftest

grunnvann som fyllmateriale, men det andre steder i verden blant annet benyttes betong og bentonitt (leirbergart) (Gehlin 2002).

Nielsen skriver i sin rapport fra 2003 (s.8) at man er avhengig av berggrunn med høy spesifikk varmekapasitet, medium til høy ledeevne og tilnærmet ingen grunnvannsflyt for at man skal få et vellykket BTES-prosjekt. En metode for å vurdere hvor godt en lokalitet egner seg til BTES kalles Thermal response test (TRT). Etter at målemetoden ble utviklet ble det en stor økning i interessen for BTES-anlegg (Nordell 2012).

Thermal response test (TRT) er en metode for å beregne den termiske ledeevnen til bakken og den termiske motstanden i et borehull slik figur 5 viser (Sanner et al. 2005). Testen utføres i et ”prøvehull” på nye lokaliteter for å bestemme om grunnforholdene er tilfredsstillende.

Metoden ble tatt i bruk i Sverige og USA i 1995, og har siden også blitt brukt i en rekke andre land (Gehlin 2002). Testen blir foretatt med mobilt testutstyr hvor en bestemt mengde termisk energi blir tilført borehullet og sirkulert via væsken. Verdier for termisk ledeevne og motstand kan deretter kalkuleres ut i fra hvordan temperaturen endres over tid. Det har også blitt utviklet flere ulike tester og metoder for å analysere andre parametere, blant annet effekter av grunnvann.



Figur 5: Viser hvordan TRT fungerer (Sanner et al. 2005)

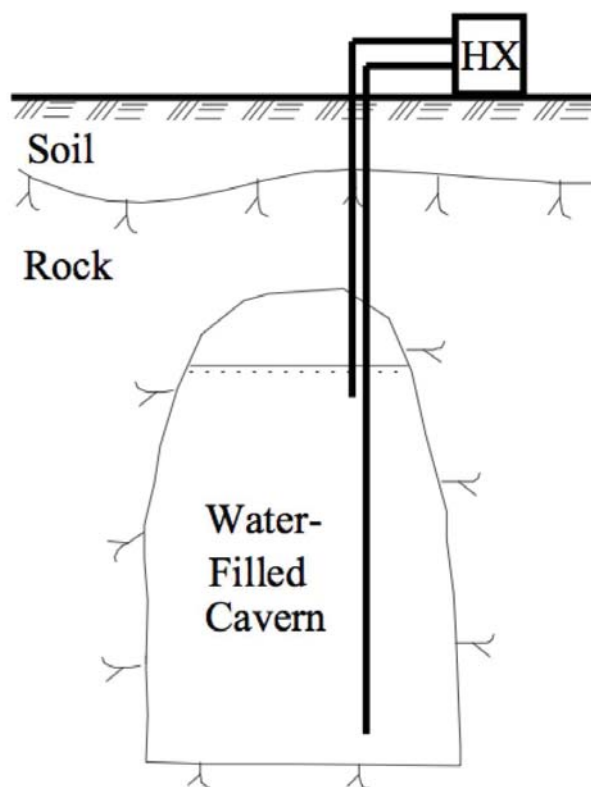
Sverige har stor erfaring med bruk av BTES, og i 2012 ble 15 % av oppvarmingsbehovet dekket av små anlegg for bolighus (Nordell 2012). I tillegg til utbredt erfaring med små BTES-anlegg er det også flere store BTES-anlegg i Sverige. Et eksempel er anlegget som forsyner Luleå University of Technology med varme. Dette er verdens første storskala anlegg for høye temperaturer og ble ferdigstilt i 1982 (Nordell 1994). Anlegget består av 120 borehull med en dybde på 50 meter og et totalt lagringsvolum på 120 000 m³. Den gjennomsnittlige lagringstemperaturen er på 52,5 °C og anlegget har et varmetap på 40%.

Et annet eksempel på lagring av høye temperaturer i BTES er et forskningsprosjekt i Paskov i Tsjekkia (Grycz et al. 2014). Prosjektet ble startet i februar 2012 og varte i ett år. Her ble overskuddsvarme fra et kombinert varme- og kraftanlegg lagret i 16 borehull på 60 meter for å studere hvordan berggrunnen reagerer på denne bruken. I borehullene ble det benyttet doble u-rør for å sirkulere det varme vannet. Temperaturen på vannet som ble ført inn i systemet var mellom 70-97 °C og den høyeste temperaturen som ble målt i lageret var 75 °C. De høyeste temperaturen ble målt ved en dybde på 15-30 meter. Før prosjektet startet var temperaturen i grunnen 12 °C. Totalt ble det i løpet av året lagret 550 MWh termisk energi i lageret. Når lageret nådde sin maksimale lagringstemperatur ble tilførselen av varme stoppet og

utviklingen i lageret ble målt i 189 dager. I det mest sentrerte borehullet hvor de høyeste temperaturene ble målt, sank gjennomsnittstemperaturen i borehullet til 40 °C, og den laveste temperaturen i borehullet ble målt til 35,8 °C ved 60 meters dybde. På bakgrunn av prosjektet konkluderte forskerne at det er et stor potensiale for lagring av varme med slike temperaturer fra industri, solenergi og kombinerte varme og kraftanlegg.

Cavern Thermal Energy Storage (CTES)

CTES bruker vann som lagringsmedium for termisk energi og benytter seg av store hulrom i bakken for å holde på det varme vannet, se figur 6 (Nordell 2000). Hulrommene kan være naturlige huler/grotter, gamle gruver og tunneller eller hulrom som graves/sprenges ut spesifikt for bruk som CTES-lager (Lee 2013).



Figur 6: Utforming av CTES (Nordell 2000)

Teknologien er enkel i bruk. Varmt vann som skal lagres blir pumpet inn i lageret ved vannoverflaten (Nordell 2000). Uttak av vann blir foretatt ved bunnen av lageret hvor temperaturen er lavere. For å holde best mulig på temperaturen er det viktig med en lagdelt

temperaturprofil i lageret. Varmt vann er lettere enn kaldt vann og det vil derfor dannes en lagdeling i lageret. Dersom vannet i lageret blandes, vil temperaturen synke i forhold til temperaturen i overflaten (Han et al. 2009).

Ved bruk av CTES kan man regne med at vannet som blir ført inn i lageret, har et varmetap på inntil 10% når det blir tatt ut igjen ved gode forhold (Lee 2013). For å minimere varmetapet er det viktig med så lite grunnvannsflyt som mulig. I de første par årene av et lagers bruk må man beregne store tap på grunn av at det varme vannet må varme opp grunnen som holder på vannet før man kan opprettholde et stabilt høyt temperaturnivå.

Sammenlignet med de andre UTES-teknologiene er bruken av CTES er liten. Dette er på grunn av at man er avhengig av å ha et egnet lager i relativ nærhet til forbruksområdet og naturlige lagre som er egnet finnes det få av. Konstruksjon av lager er meget kostbart og gjør at slike prosjekter ikke er lønnsomme. Bruk av eksisterende hulrom kan være lønnsomt, men slike finnes det få av. Den største fordelen med CTES er kapasiteten for uttak og innføring av varmt vann (Nordell et al. 2007). Så lenge det er varmt vann i lageret er ikke lageret den begrensende faktoren, men pumpekapasiteten til pumpene som benyttes.

Teknologien er lite brukt og eksemplene er få, men Nordell et al. (2007) forteller om det første anlegget for høye temperaturer. Anlegget ble bygget i Uppsala, Sverige i 1983. Lageret på 115000 m³ lagret 5500 MWh ble benyttet til både korttids-og langtidsslager for varme på 90 °C.

Vanntank/pit storage

I motsetning til ATES, BTES og naturlige CTES, der man benytter naturlige geologiske formasjoner, er vanntanker og pit storage menneskelagde strukturer som er laget for å holde på og lagre termisk energi (Novo et al. 2010). Vanntank og pit storage er to lagringsmetoder som har svært mye felles. Forskjellen er at pit storage er en grop i bakken som er belagt med et vanntett materiale, mens en vanntank er en helt, delvis eller ikke begravd tank. Pit storage må isoleres langs vegger og tak, og lagringsmaterialet i gropen er vanligvis en blanding av vann og grus. Fordi grus har lavere varmekapasitet enn vann, trenger man omtrent 50 % større lager enn et lager basert bare på vann. Vanntankene er laget av rustfritt stål eller forsterket betong, og isolert for å minimere varmetap (Xu et al. 2014). Varmt vann er lettere enn kaldt vann, og dette fører til en naturlig lagdeling i tanken. Det vil derfor være varmere vann i

toppen av tanken enn på bunnen, og derfor føres vannet ut fra toppen når det skal benyttes. Retur-vannet føres inn ved bunnen av tanken. Alternativt kan det benyttes varmevekslere for å hente ut eller føre inn varme (Novo et al. 2010).

Lagdelingen som dannes er viktig for å holde en høy temperatur i toppen av tanken og det forskes mye på metoder for å holde lagdelingen stabil. Det forskes blant annet på ulike utforminger av interne vegger i tankene for å opprettholde lagdelingen. Andre områder som det forskes på er isoleringen av tanker og groper (Xu et al. 2014). Det forskes både på isolerende egenskaper og materialer med særlig vanntette egenskaper til bruk i gulv, vegger og tak.

Duffie og Bechman (2013) skriver at en måte å redusere tapet på er å øke volumet. De skriver at "The volume of a storage unit increases (roughly) as the cube of the characteristic dimension, and its area for heat loss increases as the square, so increasing the size reduces the loss-to-capacity ratio" (s. 394). Altså så øker lagringsvolumet mer enn arealet hvor tapet kommer fra. Konstruksjonskostnadene må da også vurderes i forhold til tapet.

Et eksempel på anlegg som benytter vanntanker som sesonglager for varme, er et anlegg i Friedrichshafen i Tyskland (Bauer et al. 2010). Her benyttes solenergi til oppvarming av vann i en tank for bruk til oppvarming av 280 leiligheter. En vanntank på 12000 m³ av forsterket betong lagrer varme fra 2700 m² solfangere. Anlegget ble tatt i bruk i 1996 og har senere blitt utvidet. Varmetapet fra tanken er omtrent 40 %.

1.1.4 Bruksområder

Teknologier basert på følbare varme benyttes hovedsakelig til sesonglagring av varme og kulde med en temperatur fra 0 °C opp til 90 °C (Lee 2013; Nordell et al. 2007). Teknologiene benyttes i både små og store anlegg til oppvarming av bolig og varmtvann, enten ved bruk av varmen direkte fra lageret eller ved hjelp av varmevekslere og varmepumper. Andre bruksområder for følbare varme er oppvarming av drivhus og smelting av snø og is på veier. Vanntank/pit storage og CTES brukes også til korttidslager for å dekke effektopper.

1.2 Latent varme

I dette delkapittelet vil jeg først beskrive begrepet latent varme, i tillegg til å gjøre kort greie for hvilken forskning som er gjort på dette området. Deretter vil jeg beskrive ulike teknologier

og materialer som kan brukes til lagring av latent varme, og til slutt en gjennomgang av ulike bruksområder for slik varmelagring.

1.2.1 Beskrivelse

Latent varme er den termiske energien som tas opp eller blir frigitt når et PCM (Phase Change Material) endrer fase (Sharma et al. 2009). Fasene som et PCM kan gjennomgå er: solid-solid, solid-væske, solid-gass, væske-gass og motsatt. PCM kan klassifiseres som organiske materialer, uorganiske materialer eller eutektiske materialer. En eutektisk blanding er en lettsmeltelig blanding av to stoffer som i blandet form smelter ved lavere temperatur enn i de rene stoffene (Andersen & Fjellvåg 2009). Organiske materialer kan videre deles inn i parafiner og ikke-parafiner, uorganiske materialer i salhydrater og metaller og eutektiske materialer i organisk-organisk, uorganisk-uorganisk og uorganisk-organisk. De ulike kategoriene og undergruppene har varierende egenskaper, men uorganiske materialer har generelt nesten dobbelt så stor varmelagringskapasitet per enhet volum enn organiske materialer. Sammenlignet med teknologier for lagring av følbare varme har latent varme mye høyere lagringstetthet og absorberer og avgir varme ved tilnærmet konstant temperatur (Farid et al. 2004; Sharma et al. 2009). I følge Sharma et al (2009) lagrer PCM 5-14 ganger så mye varme per enhet volum enn materialer som lagrer følbare varme.

1.2.2 Kunnskapsstatus

Snø/islager var i fokus allerede tidlig på 1980-tallet, men har ikke vært et stort forskningsfelt (Nordell & Gehlin 2009). PCM derimot var et veldig lite forskningsfelt tidlig på 1980-tallet, men har hatt en stor økning i forskning siden. For lagring av latent varme er materialene som brukes i reaksjonene blant de viktigste elementene ved et slikt system (Xu et al. 2014). Det forskes mye på hvilke materialer som har de beste egenskapene og ulike kombinasjoner av materialer.

I systemer som lagrer termisk energi som latent varme må PCM gjennomgå mange sykluser med faseendringer. Dette setter store krav til PCM og beholderne hvor faseendringene foregår. I følge Farid et al. (2004) er de viktigste egenskapene til materialer som skal brukes til lagring av latent varme; høy latent varmekapasitet, høy termisk konduktivitet, praktisk temperatur ved faseendring i forhold til bruken, minst mulig underkjøling, ingen separasjon av materialet, kjemisk stabil, lav kostnad og materialet skal ikke være giftig eller

korroderende. Ingen PCM har utelukkende gode egenskaper, det forskes derfor mye på å finne metoder for å eliminere eller forbedre de dårlige egenskapene til materialene.

3.1.1 Teknologier basert på latent varme

Organiske materialer

Parafiner

Ren parafinvoks er et material som er for kostbart til å benyttes som lagringsmedium, men kommersielle parafinvokser er rimeligere materialer med moderate egenskaper for lagringstetthet (Farid et al. 2004). Ulike parafiner har smeltetemperatur fra -30 til 115 °C (Nordell 2000). Parafinvoks har egenskaper som gjør de godt egnet til lagring av termisk energi. Egenskaper som; materialet separeres ikke ved faseendring, er kjemisk stabile, er lite korroderende og har lite underkjøling.

Underkjøling er et fenomen hvor temperaturen i et PCM kjøles ned til under temperaturen hvor materialet egentlig skal endre fase, uten at faseendringen skjer (Farid et al. 2004; Lorentzen 2009). Dette er et problem for noen PCM, særlig hydrert salt.

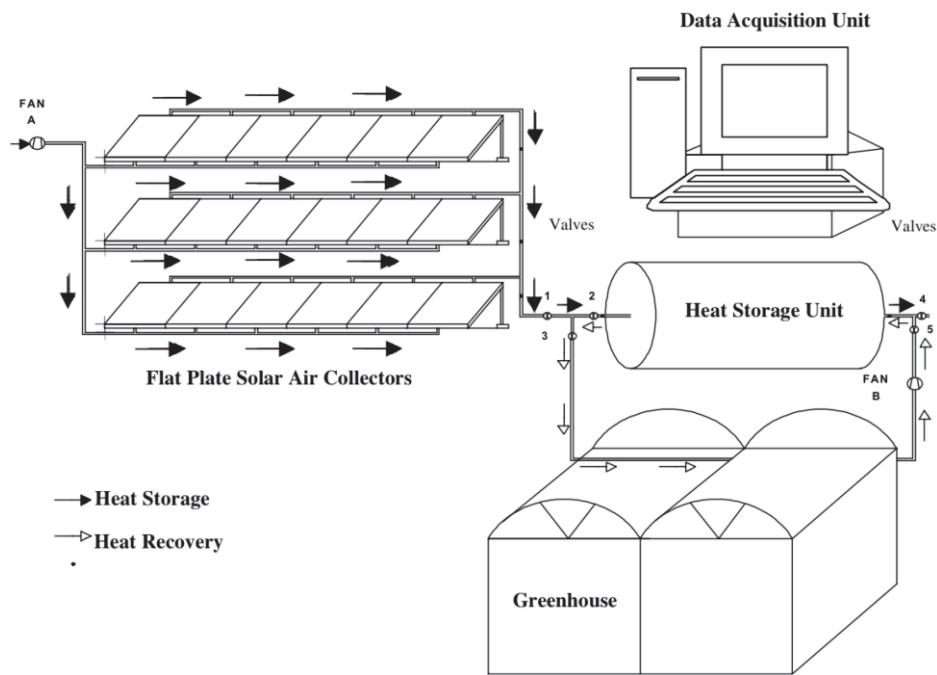
Beholderne hvor faseendringene foregår er viktige i slike systemer. De må takle syklusene med oppvarming og avkjøling av PCM uten å bli påvirket av lagringsmaterialene (Farid et al. 2004). Et problem med noen PCM er at de er korroderende mot ulike materialer, noe som vil påvirke levetiden til beholderne (Zalba et al. 2003). Hydrert salt er for eksempel korroderende mot metallbeholdere, mens parafiner kan ikke benyttes i plastbeholdere (Kenisarin & Mahkamov 2007; Sharma et al. 2009).

Det største problemet med parafinvoks er at materialet har dårlige termiske ledeevner (0,2 W/m °C), er brennbart, kan ikke brukes sammen med plastbeholdere og materialene har en stor volumendring ved faseendring (Sharma et al. 2009). Særlig den dårlige ledeevnen reduserer egnetheten til materialet som lagringsmedium, men det forskes på ulike måter for å øke ledeevnen, blant annet ved å tilføre ulike metaller med god konduktivitet (Farid et al. 2004).

På grunn av at de fleste PCM har dårlig termisk konduktivitet har de blitt utviklet flere metoder for å øke den ledeevnen (Kenisarin & Mahkamov 2007). Én av disse metodene går

ut på å innføre et materiale med gode termiske ledeevner utformet med finner inn i lagringsmaterialet. En annen måte for å øke ledeevnen er å innføre ulike matrix-strukturer av materialer med god ledeevne i PCM-et, eller motsatt, føre lagringsmaterialet inn i en matrix-struktur. Innkapsling er også en metode som øker ledeevner til materialet ved at PCM blir kapslet av et annet materiale (Zhou et al. 2012). I tillegg til å øke ledeevnen fører innkapsling til mindre uønsket påvirkning fra omgivelsene og bedre kontroll over volumet ved faseendring (Farid et al. 2004). Det er to hovedformer for innkapsling: makro- og mikroinnkapsling. Makroinnkapsling går ut på å innkapsle PCM i tuber, sfærer eller paneler, mens ved mikroinnkapsling blir PCM lukket inne i en tynn film som bevarer formen til PCM-et. PCM i mikroinnkapsling benyttes blant annet i bygningsmaterialer for lagring av termisk energi.

Et eksempel på bruk av PCM til sesonglagring av varme er oppvarming av bygg ved bruk av parafiner, slik Öztürk (2005) gjorde i sitt forskningsprosjekt, se figur 7. I prosjektet ble PCM benyttet til å lagre varme fra solfangere gjennom sommeren for å varme et drivhus på 180 m². 27 m² med solfangere benyttes til å fange varme som føres ved hjelp av luft til en 11,6 m³ stor ståltank hvor parafinet lagrer varmen i faseendringen fra solid til flytende. Om vinteren benyttes den lagrede varmen til oppvarming av drivhuset og parafinet endrer form tilbake til solid. Etter forskningsprosjektet konkluderte Öztürk at slike system kan fungere, men at teknologien trenger mer forskning og kostnadene må reduseres før slike systemer kan kommersialiseres.



Figur 7: Utforming av anlegg som benytter solfangere til å fange varme og PCM som lager (Öztürk 2005)

Ikke-parafiner

Ikke-parafiner er den gruppen av materialer som har det største utvalget av ulike PCM og har i tillegg stor variasjon i egenskaper (Sharma et al. 2009). Materialene i denne gruppen kan videre kategoriseres i fettsyrer og andre ikke-parafiner. Materialene har varierende egenskaper, men noen av dem er felles. Høyt energiopptak ved faseendring, lavt flammepunkt, brennbare, dårlig ledeevne, har ulik grad av giftighet, og de er ustabile ved høye temperaturer. Av ikke-parafinene er fettsyrer interessante på grunn av egenskaper som høyt energiopptak ved faseendring og ingen underkjøling. De ulike fettsyrene har smeltetemperaturer fra $-5 - 71\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Kenisarin & Mahkamov 2007). En kostnad på 2-2,5 ganger høyere enn kommersiell parafin er derimot en stor ulempe for fettsyrer (Sharma et al. 2009).

Uorganiske materialer

Hydrert salt

Hydrert salt er en blanding av uorganisk salt og vann som danner et solid materiale (Sharma et al. 2009). Når materialet smelter fra solid til flytende form, deles materialet inn i vann og salthydrat med lavere vanninnhold, eller vann og tørt salt dersom alt vannet fordampes. Hydrert salt har mange egenskaper som gjør dem interessante til lagring av termisk energi.

Høy lagringstetthet 105 kWh/m^3 , høy termisk ledeevne på $0,5 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$, lite volumendring ved smelting, lite korroderende og lave kostnader er alle gode lagringsegenskaper for PCM (Farid et al. 2004; Kenisarin & Mahkamov 2007; Sharma et al. 2009). Et av problemene med hydrert salt er at noe av materialet separeres ved smelting (Sharma et al. 2009). Dette skjer fordi vannet som frigis ved smelting ikke er tilstrekkelig til å løse opp det faste materialet. Det faste materialet har høyere tetthet enn vannet. Dermed vil det samles på bunnen, og det vil ikke lengre gå tilbake til å være hydrert salt. Etter hver syklus vil det dannes mer av dette faste materialet på bunnen og egenskapene til PCM-et forverres.

Metaller og eutektiske materialer

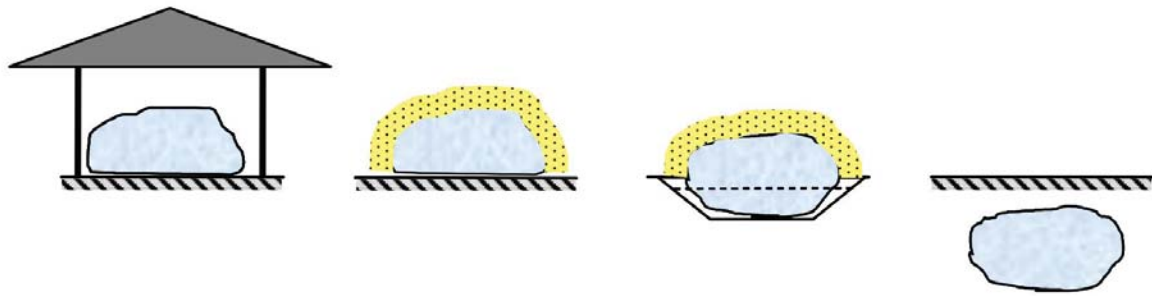
Metaller og eutektiske materialer er to grupper PCM som det foreløpig ikke er forsket mye på (Sharma et al. 2009). For metaller er det hovedsakelig på grunn av den høye vekten til metallene. Metaller har lavt energiopptak ved faseendring per vektenhet, men høyt energiopptak ved faseendring per volumenhet. I motsetning til de fleste andre PCM har metaller høy termisk ledeevne. Eutektiske materialer har positive egenskaper som lavt smeltepunkt og lite problemer med separasjon av materialene ved faseendring.

Snø-/islager

Snø-/islagring er en enkel metode hvor den termiske energien som lagres i faseendringen mellom vann og snø/is, blir brukt til kjølebehov (IEA 2014a). Luft, smeltevann, sjøvann, grunnvann eller annen veske blir sirkulert mellom snø-/islageret og hvor det trengs kjøling (Skogsberg & Nordell 2006). I noen anlegg blir ikke mediet som transporter kulden sirkulert, men ført ut av anlegget etter at kulden har blitt benyttet. Kulden kan benyttes direkte fra lageret, i kombinasjon med varmepumpe eller den kan brukes til å kjøle ned kjølemedium i et lukket system ved hjelp av varmevekslere som i figur 9.

Snø/is som blir lagret kan enten være naturlig snø som blir hentet inn fra nærområdet, for eksempel i byer, vann i lageret som fryser til is naturlig om vinteren, eller den kan produseres kunstig ved hjelp av snøkanoner (Skogsberg & Nordell 2006). For å produsere kunstig snø må de rette forholdene være til stede slik Skogsberg (2005) beskriver. Lufttemperatur, lufttrykk, luftfuktighet, vindhastighet, vindretning, vanntemperatur, vanntrykk og utstyr bestemmer produksjonskapasiteten for kunstig snø.

Som figur 8 viser, så kan lageret konstrueres på ulike måter. Lageret kan være innendørs, direkte på bakken, i en grop/forsenkning eller under bakken (Skogsberg & Nordell 2006).

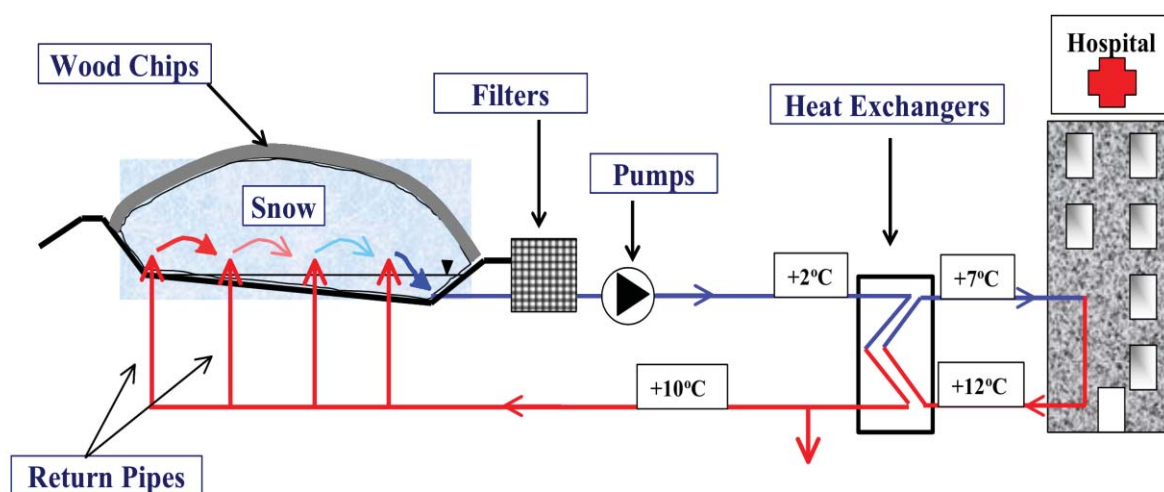


Figur 8: Ulike utforminger av snø-/islagre (Skogsberg & Nordell 2006)

Innendørs lagring kan enten være i et permanent bygg eller et bygg som monteres før hver sesong (Skogsberg 2005). Ved innendørs lagring trengs det ikke noe ekstra isolerende lag oppå snøen, fordi bygget er isolert. Lager under bakken trenger heller ikke noe ekstra isolasjon, fordi bakken fungerer som isolasjon. Når lageret konstrueres direkte på bakken eller i en grop, behøves det derimot et isolerende lag oppå snøen for å hindre uønsket smelting. Isolasjonsmateriale er enten løsmasse av ulike materialer som treflis, mineralpartikler, avfall fra landbruksinnhøstning eller store tepper av plast. Treflis er veldig godt egnet som isolasjonsmateriale på grunn av lav termisk konduktivitet og fordi treflis suger til seg smelte vann og dette fører til en avkjølende effekt når vannet igjen fordampes (Skogsberg 2005).

Så lenge det er snø/is i lageret er det pumper, varmevekslere og resten av utstyret som er de begrensende faktorene for hvor mye termisk energi som kan tas ut av lageret (Skogsberg & Nordell 2001). Omgivelsene til lageret bestemmer hvor fort snøen naturlig smelter. Det er tre momenter som fører til smelting av snø/is; varme fra luft, bakke og regn. I tillegg til den naturlige smeltingen bestemmes smelteraten til lageret av hvor mye energi som tas ut av lageret. Nordell og Sundin (1998, referert i Skogsberg, K. 2005, s. 11) utførte et teoretisk forsøk for å undersøke effekten av treflis som isolasjon. Forfatterne undersøkte hvor fort en 30 000 m³ snøhaug smeltet uten isolasjon, både med 10 centimeter tykt flislag og med 20 centimeter tykt flislag. Forfatterne kom fram til at 20 centimeter tykt flislag gav de beste isolerende egenskapene i testen og med denne isolasjonen førte varme tilført fra luft til 83 % av smeltingen. Varme fra bakken og regn førte til henholdsvis 13% og 4% smelting. Testen viste også at uten et isolerende lag smeltet lageret bort lenge for kjølesesongen var over.

Et eksempel på et anlegg som benytter seg av snølager er Sundsvall sykehus i Sverige, se figur 9. Sykehuset med et areal på 190 000 m² trenger 1000 MWh kjøling gjennom sommeren (Skogsberg & Nordell 2001). Snølageret ble ferdigstilt høsten 1999 og har et areal på 140 X 60 meter med et underlag av vanntett asfalt. Lageret kan totalt lagre 60 000 m³ snø. Gjennom den første vinteren ble 30 000 m³ snø lagret og i juni 2000 ble lageret tatt i bruk til å kjøle sykehuset. For å minimere uønsket smelting ble lageret dekket med et 20 centimeter tykt lag av flis. Smeltevannet fra lageret har en turtemperatur på ca 0 °C og en returtemperatur på 10 °C. Det blir først pumpet gjennom grove og fine filtre før det varmeveksles med kretsen fra sykehuset. Kjølevesken fra sykehuset blir kjølt ned fra 12 °C til 7 °C i varmeveksleren. For å hindre at det blir for mye smeltevann under lageret blir noe av smeltevannet ført bort fra systemet.



Figur 9: Oversikt over snø-/islageret tilknyttet Sundsvall sykehus (Skogsberg & Nordell 2006)

Investeringskostnadene for anlegget kom på 14,5 millioner SEK, men anlegget ble bygget som et forsknings- og demonstrasjonsanlegg i tillegg til kjøleanlegg for sykehuset (Skogsberg & Nordell 2006). Dette førte til noe høyere investeringskostnader. Den største driftskostnaden for anlegget er produksjon av snø. Anlegget har en estimert levetid på 40 år og en tilbakebetalingstid på 3 år.

1.2.3 Bruksområder

I litteraturstudiet i forbindelse med denne oppgaven ble det ikke funnet mye forskning på bruk av PCM som lager for sesonglagring av varme. Det finnes derimot mange andre forskningsområder for bruk av PCM. Bruksområdene for PCM er mange (Zalba et al. 2003). Et av områdene som det forskes mest på er å bruke det som lager for solenergi (Farid et al. 2004). Forskningen på PCM som lager for solenergi er hovedsakelig på bruk som korttidslager for bruk av varme med høy temperatur. Yang og Garimella (2010) og Wu, Xu og He (2014) skriver i sine artikler hvordan solfangeranlegg kan kombinere to forskjellige PCM til å lagre solvarme om dagen for produksjon av elektrisitet på tider av døgnet uten sol. I et slikt system benyttes PCM-et smeltet salt som transportvæske for varmen fra solfangerne og føres gjennom en tank med et annet lagringsmateriale som tar opp og lagrer energien fra det smeltede saltet. Slike systemer benytter damp til å drive elektrisitetsproduserende turbiner og er derfor avhengig av høye temperaturer (Yang & Garimella 2010). Smeltet salt kan operere ved temperaturer på 450-500 °C og har vist seg som et godt egnet material til slik bruk.

Zhou et al. (2012) skriver i sitt studie om ulike måter PCM kan benyttes i ulike bygningsmaterialer for å jevne ut de store temperaturforskjellene fra dag og natt. PCM integreres da på ulike måter inn i byggematerialer som veggplater, gulv, tak og gipsplater. Andre forskningsområder for bruk av PCM er drift satellitter, oppvarming av drivhus og som kjølemiddel i elektronisk utstyr og under transport av mat og andre kjølevarer (Farid et al. 2004; Sharma et al. 2009; Zalba et al. 2003)

1.3 Kjemisk energi

I dette delkapittelet vil jeg først definere og beskrive begrepet kjemisk energi. Deretter vil jeg beskrive ulike teknologier og materialer for lagring av kjemisk energi og til slutt bruksområder for slik varmelagring.

1.3.1 Beskrivelse

N`Tsoukpoe et al. (2009) deler kjemisk lagring inn i tre hoveddeler; elektrokjemisk, elektromagnetisk og termokjemisk. Termokjemisk deles inn i sorpsjon og kjemisk reaksjon. Denne oppgaven omhandler lagring av termisk energi og vil derfor ta for seg gruppen med termokjemisk lagring.

Lagring av kjemisk energi baserer seg på endo- og eksotermiske prosesser ved absorpsjon eller adsorpsjon (Bales 2005; N`Tsoukpoe et al. 2009). Endo-og eksotermiske prosesser er prosesser hvor energi enten blir tatt opp (endotermisk) eller avgitt (eksotermisk) fra eller til omgivelsene. Absorpsjon og adsorpsjon er kjemiske reaksjoner mellom faste materialer, flytende væsker og gasser. Absorpsjon er en reaksjon hvor en væske eller gass blir tatt opp av et annet stoff. Adsorpsjon er en reaksjon hvor en væske eller gass fester seg til overflaten til annet stoff, mens desorpsjon er det motsatte, altså at en væske eller gass løser seg fra et stoff (Yan et al. 2015).

Kjemisk energi er den termiske energien som blir absorbert eller frigitt ved å splitte opp eller sette sammen et material ved kjemiske forbindelser (Sharma et al. 2009). Ved lagring av termisk energi i en kjemisk reaksjon blir en endotermisk reaksjon utført for å dele et stoff i flere deler ved tilførsel av varme (Bales 2005; Pinel et al. 2011). For å benytte seg av den lagrede energien settes de splittede delene sammen igjen ved en eksotermisk reaksjon.

En kjemisk reaksjon kan forklares ved følgende ligning (Duffie & Bechman 2013):

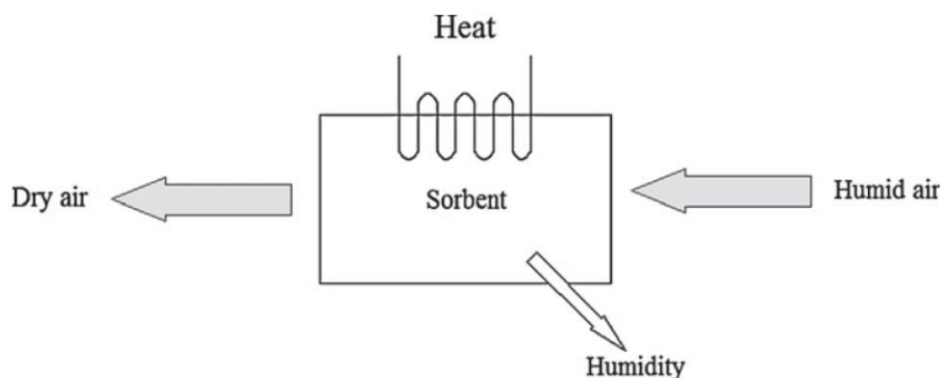


Material A og B som skal reagere med hverandre kalles for et arbeidspar (N`Tsoukpoe et al. 2009). A er sorpsjonsmaterialet (absorbator) og B er arbeidsvæsken (absorbent). AB er materialet hvor absorbent er adsorbert eller absorbert av absorbator. Når AB blir utsatt for varme skjer det en endotermisk reaksjon hvor A og B blir splittet og lagrer termisk energi som kjemisk potensiell energi (Yan et al. 2015). A og B kan deretter lagres hver for seg uten nevneverdig tap av varme. AB dannes ved en eksotermisk reaksjon hvor A og B får reagere med hverandre.

Termokjemisk sorpsjon kan videre deles inn i undergruppene absorpsjon og adsorpsjon. Termokjemisk sorpsjon består av en væske og et material som kan ta opp væske (Bales 2005). Væsken er oftest vann og kalles absorbent, mens materiale som tar opp væsken kalles absorbator. Absorbator har en sterk affinitet til vann, noe som betyr at absorbent og absorbator reagerer lett med hverandre. Absorbenten er enten et porøst materiale eller en salt-hydratløsning. Når varme blir tilført en absorbator, slippes det ut vanndamp (Pinel et al.

2011). Dette er en endotermisk reaksjon og når vanndamp blir absorbert eller adsorbert av absorbenten skjer det en eksotermisk reaksjon. Kjemisk energi har sammenlignet med følbare varme 5-20 ganger så stor energitetthet (IEA 2014b).

Lagring av termisk energi ved sorpsjon kan foregå i enten et åpent eller lukket system (Bales 2005). Åpne systemer er basert på adsorpsjon og benytter vann som absorbent. Systemet opererer ved atmosfærisk trykk og slipper den fordampede væsken fra systemet ut til omgivelsene. Vann er den eneste absorbenten som benyttes i slike system, ettersom vanndampen som slippes ut til omgivelsene ikke er giftig eller skadelig for miljøet. Det finnes flere ulike systemer som benytter åpne systemer. En form for kjemisk sorpsjon med åpne systemer er å integrere systemet i ventilasjonssystemet i bygninger (Pinel et al. 2011). Fuktigheten i luften i ventilasjonssystemet blir absorbert av absorbenten og varm, tørr luft sirkuleres videre i bygget. Når absorbenten tørker ved tilførsel av varme, fordamper vannet og fuktigheten føres ut av systemet slik figur 10 viser.



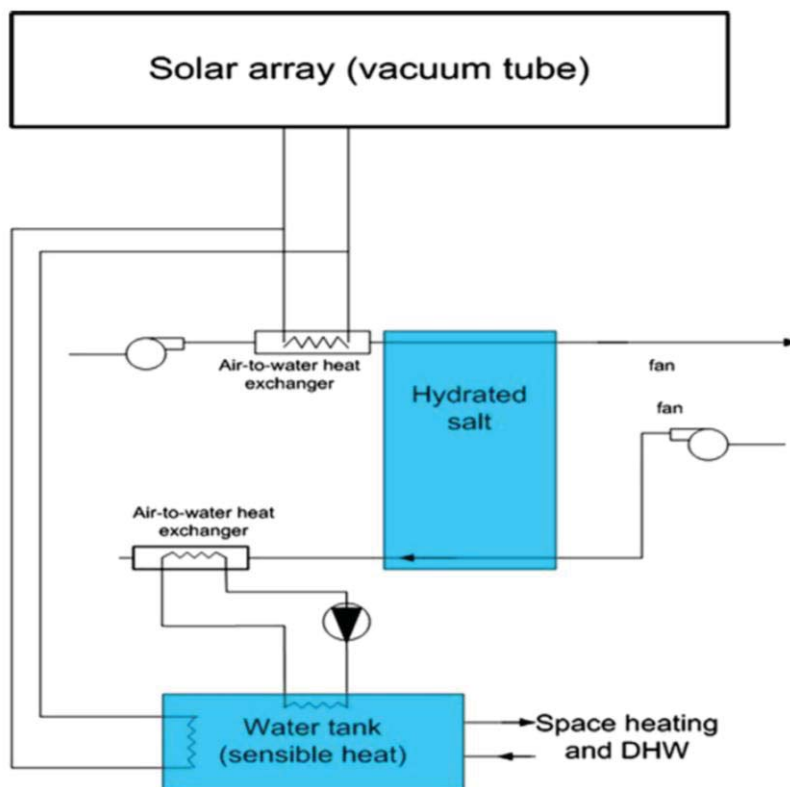
Figur 10: Enkel forklaring på sorpsjon med åpent system (Pinel et al. 2011)

Et annet lignende system vises i figur 11. Systemet fungerer på lik måte som i figur 10, men systemet kan benyttes til både oppvarming av bygg og oppvarming av vann (Zondag et al. 2013). I dette systemet benyttes solfangerer med vakuumrør til å fange varme i sommermånedene. Varmen fra solfangerne blir sirkulert gjennom det hydrerte saltet ved hjelp av en vifte. Denne varmen fordamper vannet som er bundet til saltet og det tørkede saltet kan lagres til vinteren. Da blir kald og fuktig luft ført inn fra omgivelsene til det tørkede saltet. Fuktigheten blir tatt opp og varme frigitt. Varmen benyttes så til oppvarming av vann og bygg. Temperaturen som solfangerne må levere for å kunne benytte, må være mellom 50 og

150 °C, avhengig av hvilken absorbent som benyttes (Zondag et al. 2013). Fire lovende hydrerte salter, som det forskes på som mulige arbeidspare i et slikt system, er:

- $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$
- $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

I artikkelen beskrives testing av de nevnte materialene for bruk i et slikt system. Ved bruk av $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ hvor absorbenten har 50 % porøsitet, gir dette en lagringstetthet på 278 kWh/m³. Materialet kan tørkes ved en temperatur på 130 °C og temperaturen som kan benyttes når materialet igjen blir tilsatt vann, er tilstrekkelig til oppvarming av varmtvann til 60 °C.



Figur 11: Utforming av et åpent system med hydrert salt som lagringsmaterial (Zondag et al. 2013)

Lukkede systemer er enten basert på adsorpsjon eller absorpsjon, hvor væsken sirkuleres i lukkede kretser. I motsetning til åpne systemer som slipper vanndamp direkte ut til

omgivelsene, benytter lukkede systemer varmevekslere til å hente ut entalpi fra den fordampede væsken og slipper bare entalpien ut i omgivelsene.

1.3.2 Kunnskapsstatus

I likhet med latent varme, startet forskningen på lagring av kjemisk energi for alvor på slutten av 1980- og starten av 1990-tallet (Nordell & Gehlin 2009). Teknologier basert på kjemisk energi er fortsatt på forsknings- og utviklingsstadiet, men det finnes noen demonstrasjonsanlegg (IEA 2014a).

1.3.3 Teknologier basert på kjemisk energi

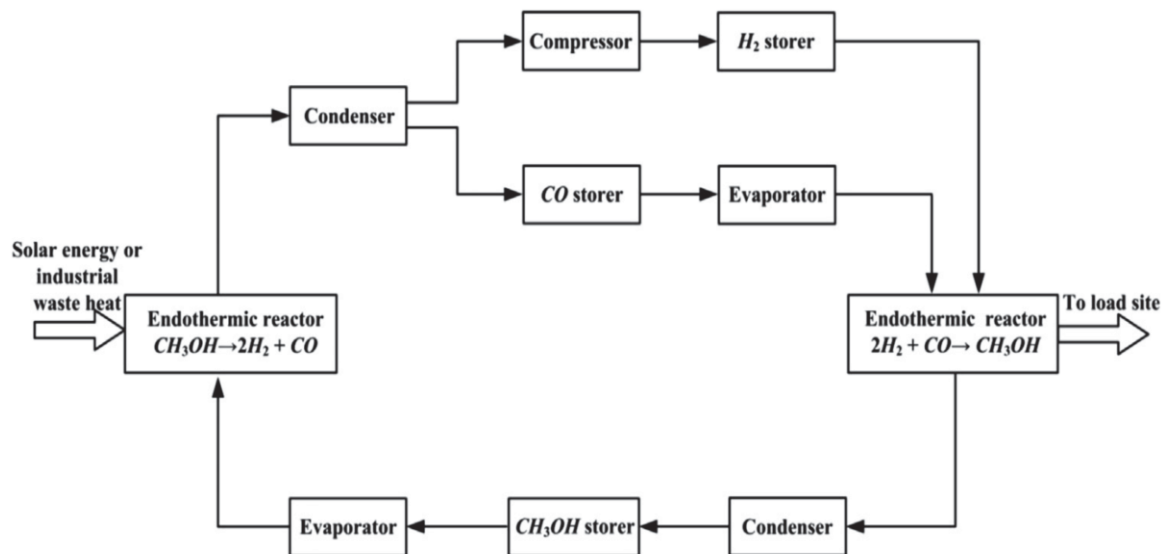
Kjemisk reaksjon

Kjemiske reaksjoner er enten en gass-gass reaksjon, væske-gass reaksjon eller en solid-gass reaksjon (Yan et al. 2015). Materialer til bruk i kjemiske reaksjoner har høye operasjonstemperaturer som normalt er over 300 °C, men som også kan operere ved temperaturer over 2000 °C (Xu et al. 2014; Yan et al. 2015). Dette gjør at kjemiske reaksjoner er godt egnet til lagring av termisk energi med høy temperatur, men er ofte mindre egnet til å lagre lavverdig energi som sol-og avfallsenergi.

Et eksempel på materiale som derimot opererer ved temperaturer som samsvarer med sol- og avfallsenergi, er metanol, CH₃OH/H₂/CO (Yan et al. 2015). Materialet opererer ved en temperatur på 147 °C. Reaksjonen er en gass-gass reaksjon og blir sett på som en potensiell kandidat på grunn av at det er et rimelig og rent materiale som er lett tilgjengelig. Ligningen for reaksjonen er som følger:



Figur 12 viser hvordan et slik system kan se ut.



Figur 12: Gass-gassreaksjon med metanol som lagringsmaterial (Yan et al. 2015)

Kjemisk sorpsjon

Kjemisk sorpsjon omfatter prosessene absorpsjon og adsorpsjon. I en absorpsjonsprosess dannes det et nytt materiale når et material absorberer et annet (Xu et al. 2014). Det dannes derimot ikke et nytt material i en adsorpsjonsprosess. I en adsorpsjons prosess blir ikke et materiale tatt opp av et annet, men et materiale fester seg til overflaten til et annet.

I følge Yan et al (2015) er de vanligste hovedgruppene av materialer til bruk i sorpsjonssystemer ammoniakk-salt, hydrert salt, metallhydrider og konsentrering-uttynning av væsker. Innen hver av gruppene finnes en rekke materialer og kombinasjoner av disse.

Ammoniakk-salt er en solid-gass reaksjon hvor desorpsjon og adsorpsjon blir brukt til å lagre og utnytte termisk energi (Yan et al. 2015). Eksempler på arbeidspår i denne gruppen er ammoniakk-kalsiumklorid og ammoniakk-koboltklorid. Ammoniakk-salt har generelt gode egenskaper, men har en stor ulempe ved at ammoniakk er en giftig og brennbar gass (Zondag et al. 2013).

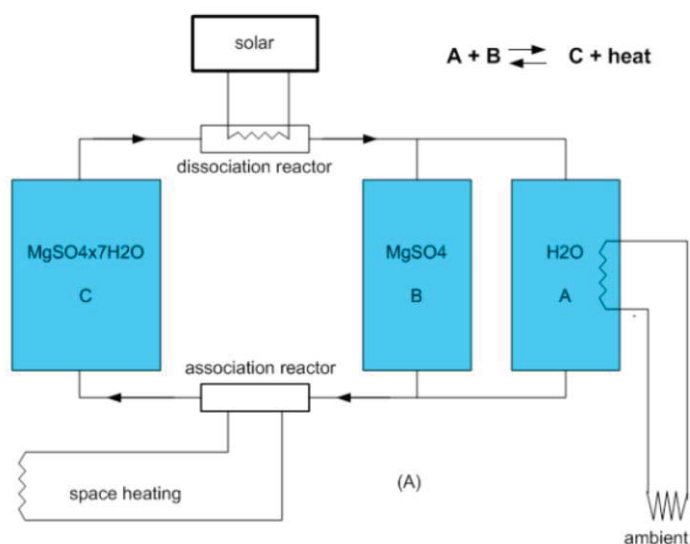
Hydrert salt er en solid-væske reaksjon hvor vann benyttes som absorbent og ulike salter som absorbator (Yan et al. 2015). I motsetning til de fleste kjemiske lagringssystemer har hydrert salt tilnærmet lik temperatur ved den endo-og eksotermiske reaksjonen.

Et hydrert salt som har stort potensiale for lagring av varme, er $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Hongois et al. 2011). Magnesiumsulfat (MgSO_4) og vanndamp (H_2O) er et arbeidspar med positive egenskaper som høy energilagringstetthet (778 kWh/m^3), lagringstemperatur som samsvarer med temperaturer fra solfangere (122°C (Pinel et al. 2011)), ikke er giftige og er lett tilgjengelige materialer. Materialet er derimot kostbart, noe som minimerer egnetheten til materialet som lager (N`Tsoukpoe et al. 2009).

Den kjemiske reaksjonen ser slik ut:



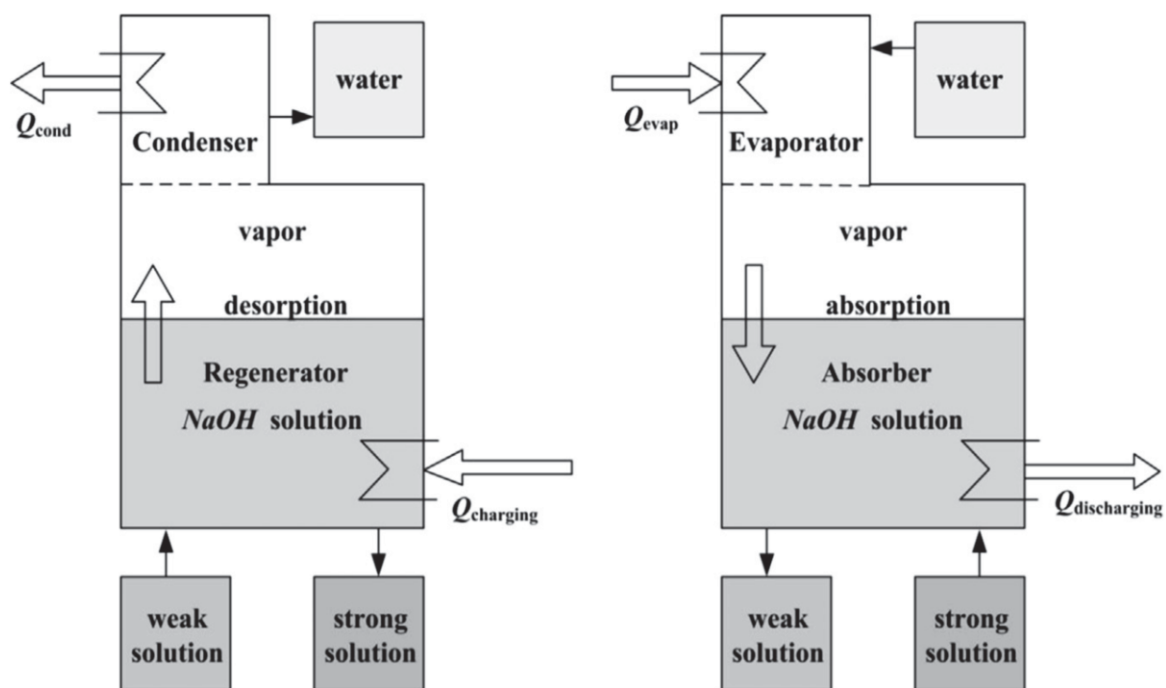
Når varme med tilstrekkelig temperatur blir tilført magnesiumsulfid fordampes vannet i forbindelsen og energi lagres i det dehydrerte magnesiumsulfidet. Materialet kan så oppbevares tilnærmet uten tap av energi, til det skal benyttes, slik figur 13 viser. Da tilføres vanndamp til magnesiumsulfidet og energi blir frigitt. Et problem med bruk av dehydrert magnesiumsulfid er at dette er et tørt pulver, og når det tilføres vanndamp i en beholder med magnesiumsulfid, vil det dannes en hinne på overflaten av magnesiumsulfidet hvor reaksjonen med vannet skjer (Hongois et al. 2011). Denne hinnen hindrer videre reaksjon av materialene. For å unngå dette problemet benyttes det zeolite i pelletsform. Dette er et porøst material med stor overflate som blir impregnert med en magnesiumsulfidløsning for å gi vanndamp større overflate å reagere med.



Figur 13: Viser hvordan magnesiumsulfid lagres som magnesiumsulfat og vann (Zondag et al. 2009)

Metallhydrid er en solid-gass reaksjon hvor hydrogen blir desorbert fra ulike metaller eller legeringer (Yan et al. 2015). Det finnes mange ulike metaller og legeringer med stor variasjon i egenskaper. Dette gjør at metallhydrider kan benyttes ved mange ulike temperaturer avhengig av materialvalg.

Konsentrering-uttynning er en væske-væske reaksjon hvor varme blir brukt til å fordampe én av væskene i en løsning med to ulike væsker og dermed konsentrere løsningen (Yan et al. 2015). Figur 14 viser hvordan et slikt system fungerer. Konsentrasjonen av løsningen er en endotermisk reaksjon og uttynningen som skjer ved tilbakeføring av den fordampede væsken er eksotermisk. Natriumhydroksid og vann er en løsning som Weber og Dorer (2008) har analysert. Løsningen krever en temperatur på 150 °C for å fordampe vannet. I analysen kom forfatterne fram til at for levering av varmtvann ved 65-70 °C, krever et slikt system et lagringsvolum som er tre ganger mindre enn ved bruk av varmtvannstank som lager.



Figur 14: Viser hvordan termisk energi kan lagres ved at en væske konsentreres (Weber & Dorer 2008)

1.3.4 Bruksområder

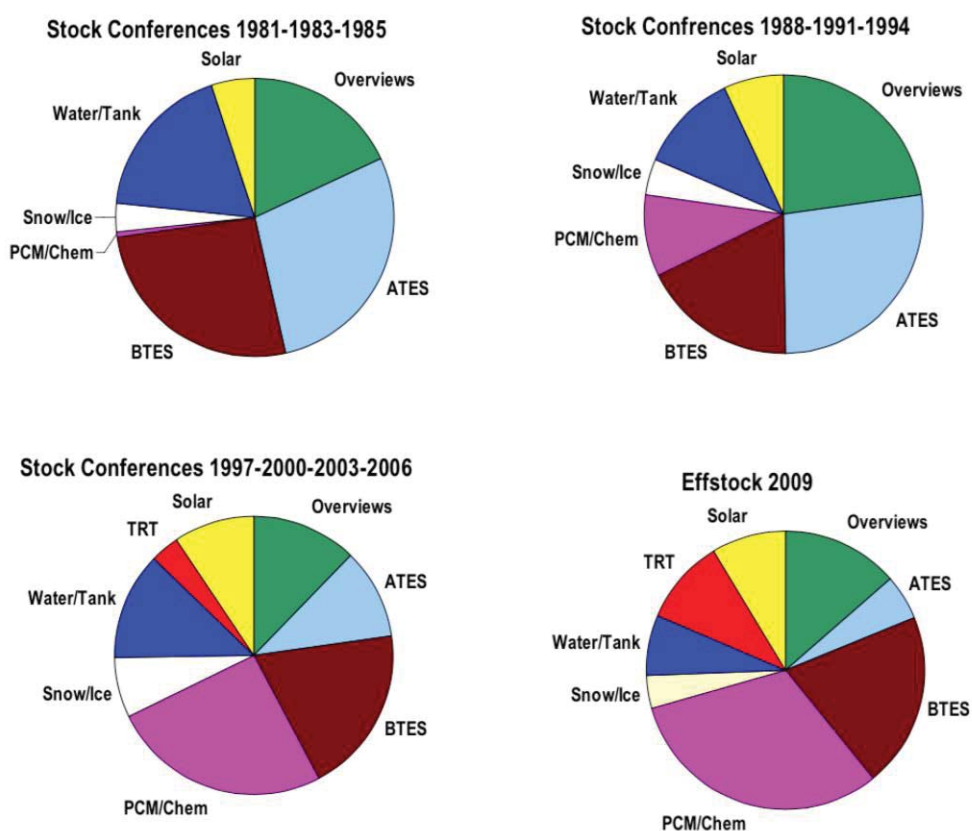
Lagring av termisk energi ved kjemisk reaksjon eller sorpsjon har bruksområder som kjøling ved lave temperaturer og oppvarming ved middels og høye lagringstemperaturer (IEA 2014a).

I likhet med latent varme vil varme med høye lagringstemperaturen kunne benyttes til å drive turbiner for elektrisitetsproduksjon. Fordi materialene ikke har noe tap av varme under lagring, er kjemisk energi særlig godt egnet til sesonglagring av varme, men vil også kunne benyttes til blant annet utjevning av effekttopper i energisystemet.

4 Resultat

4.1 Teknologier

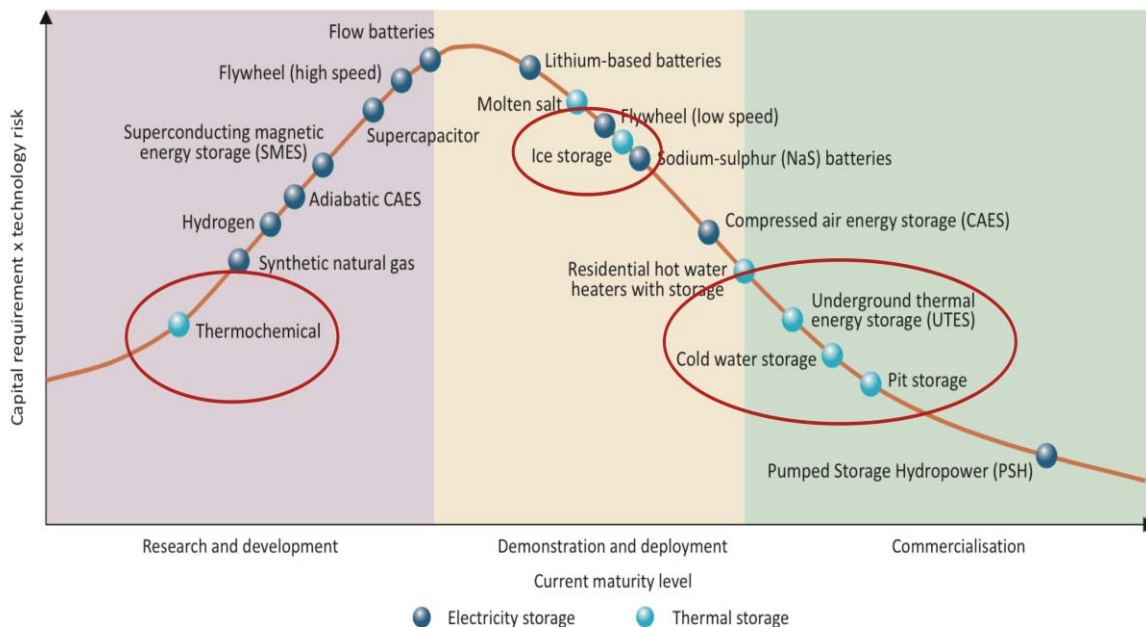
Stock konferansene er en konferanse som arrangeres av IEA (International Energy Agency) hvor den nyeste forskning og utvikling av varmelagringsteknologier blir presentert (Nordell & Gehlin 2009). Konferansene har hatt god oppslutning fra landene som har hatt mest fokus på forskning og utvikling på varmelagring (land som Sverige, Tyskland, USA og Nederland). Figur 15 viser en oversikt over hva forskningsartiklene i de 11 første konferansene handlet om.



Figur 15: Oversikt over forskningstemaene ved de ulike konferansene (Nordell & Gehlin 2009)

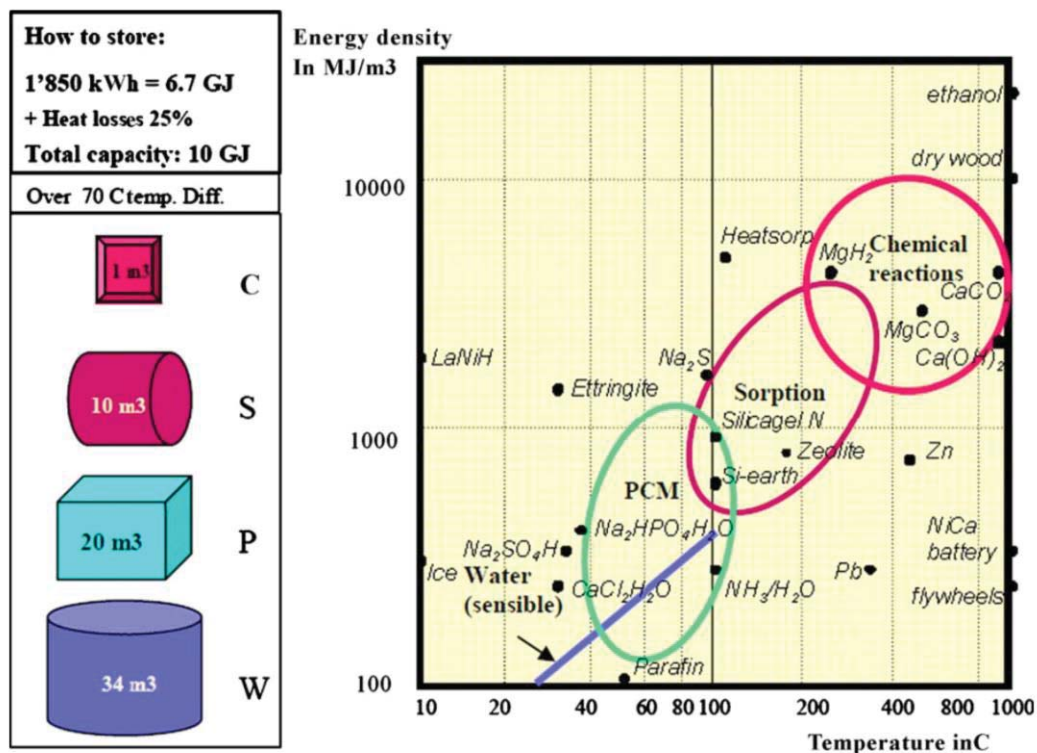
De første 6 konferansene var det størst fokus på teknologier for følbare varme, mens latent og kjemisk varme har hatt mest fokus de siste årene. Sammenlikner man oversikten i figur 15 med oversikten over utviklingsnivået til teknologiene i figur 16, så vil man se en tydelig sammenheng mellom når satsingen startet og utviklingsnivået i dag. UTES-teknologier var de største forskningstemaene under de første Stock-konferansene og er de teknologiene som er

kommet lengst i utviklingen. Bortsett fra islager så viser ikke figuren teknologier basert på latent varme, men disse teknologiene vil kunne plasseres et sted på linjen mellom kjemisk og islager.



Figur 16: Oversikt over utviklingsnivået til lagringsteknologier (IEA 2014a)

Figur 17 viser varmelagringspotensialet til de ulike teknologiene. Figuren viser tydelig at kjemisk energi ved kjemisk reaksjon og sorpsjon er den teknologien som kan lagre mest termisk energi per areal og opererer ved de høyeste temperaturene. Potensialet til teknologiene ut i fra hvor mye varme som kan lagres per kubikkmeter er altså motsatt av hvor langt de er kommet i utviklingen. Følbar varme er den av hovedkategoriene som har kommet lengst i utviklingen, men som har minst varmelagringspotensiale. Latent varme har kommet lengre i utviklingen enn kjemisk varme, men har mindre potensial. Kjemisk varme har det største potensialet og er et felt som det forskes mye på, men foreløpig er det bare på forskningsstadiet.



Figur 17: Energitetthet til ulike energiformer og materialer (N'Tsoukpoe et al. 2009)

I tabell 1, 2 og 3 vises en oppsummering og oversikt over de viktigste egenskapene og bruksområdene til de ulike teknologiene fordelt etter energiform. Tabellene viser store deler av resultatet av litteraturstudiet.

Tabell 1: Oppsummering av de viktigste funnene fra litteraturstudiet for følbar varme

Følbar varme				
Teknologi	Fordeler	Ulemper	Bruksområde	Kilde
ATES	Moden teknologi som er rimelig å konstruere og har høyere lagringskapasitet enn BTES	Er avhengig av egnede grunnforhold, problematikk i forhold til grunnvann, vannkjemi og fortetning av brønner	Oppvarming og kjøling av boliger, industri og jordbruk, oppvarming av vann, smelting av snø- og is på vei. Temperatur: maks 90 °C	(Lee 2013; Nordell et al. 2007)
BTES	Moden teknologi. Grunnforhold er mindre kritisk enn for ATES, kan installeres ved de fleste lokaliteter, lite vedlikehold	Høye borekostnader, trenger større volum enn ATES, CTES og vanntank på grunn av at grunnen har lavere varmekapasitet enn vann. Krever geologiske undersøkelser	Store anlegg benyttes til sesonglagring av spillvarme fra industri eller solvarme. Temperatur: maks 80-90 °C	(Eggen & Vangsnes 2005; Lee 2013; Nordell et al. 2007)
CTES	Moden teknologi. Høy inn-og uttakskapasitet	Få nåværende egnede lokaliteter (fjellhaller/gruver), høye konstruksjonskostnader	Korttids-og sesonglagring av overskuddsvarme. Utjevning av effekttopper. Temperatur: maks 90 °C	(Lee 2013; Nordell et al. 2007)
Vanntank/pit	Moden teknologi. Høy inn-og uttakskapasitet, krever ikke geologiske undersøkelser	Høye kostnader for vanntanker, pit storage med vann og grus som lagringsmedium krever 50 % større lager enn vanntank	Korttidslagring. Sesonglagring for mindre anlegg, men også potensial for større anlegg. Temperatur: maks 90 °C	(Novo et al. 2010; Schmidt et al. 2003)

Tabell 2: Oppsummering av de viktigste funnene fra litteraturstudiet for latent varme

Latent varme				
Teknologi/ Material	Fordeler	Ulemper	Bruksområde	Kilde
Organisk PCM	Varierende for ulike materialer: Kjemisk stabile, ikke korroderende, lite eller ingen underkjøling, høy latent varme i forhold til vekt	Umoden teknologi. Varierende for ulike materialer: Lav termisk konduktivitet, stort endring i volum ved endring av fase, brennbar, lavt flammepunkt, parafiner er ikke kompatibel med plastbeholdere	Korttids- og sesonglager for oppvarming og kjøling i temperaturområdet -30 til 115 °C, bygningsmaterialer	(Farid et al. 2004), (Nordell 2000), (Kenisarin & Mahkamov 2007), (Sharma et al. 2009)
Uorganisk PCM	Varierende for ulike materialer: Omtrent dobbelt så høy lagringskapasitet enn organisk PCM, høy termisk ledeevne, ikke brennbar, lav kostnad i forhold til organisk PCM	Umoden teknologi. Varierende for ulike materialer: Korroderende, utsatt for underkjøling, separering ved faseendring,	Korttids- og sesonglager for lagring av sol- og avfallsvarme, lager for høye temperaturer til bruk i dampturbiner	(Farid et al. 2004), (Kenisarin & Mahkamov 2007), (Sharma et al. 2009)
Snø-/islager	Nesten moden teknologi. Fleksibelt i forhold til lagringslokalitet, snø/is kan være naturlig eller produseres kunstig	Begrenset til kjøleformål	Sesonglagring av kulde for kjøling	(Skogsberg & Nordell 2006), (Skogsberg 2005)

Tabell 3: Oppsummering av de viktigste funnene fra litteraturstudiet for kjemisk energi

Kjemisk energi				
Teknologi/ Material	Fordeler	Ulemper	Bruksområde	Kilde
Kjemisk reaksjon	Varierende for ulike materialer: Høy lagringstetthet, lite eller ingen tap ved lagring,	Umoden teknologi. Varierende for ulike materialer: Begrensede muligheter til lagring av varme i temperaturområdet for sol-og avfallsenergi	Lager for temperaturer over 300 °C. Sesonglagring av varme med temperaturer ned til 147 °C	(Yan et al. 2015), (Xu et al. 2014)
Kjemisk sorpsjon	Varierende for ulike materialer: Høy lagringstetthet, lite lagringstap,	Umoden teknologi. Varierende for ulike materialer: Noen materialer er brennbare og giftige, andre korroderende	Sesonglagring av varme med temperaturer som samsvarer med varme fra solfangere og avfallsvarme. Bruk i ventilasjons-systemer	(Hongois et al. 2011), (Pinel et al. 2011), (Zondag et al. 2013)

1.4 Status i Norge

To UTES-teknologier er i bruk i Norge, ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) og BTES (Borehole Thermal Energy Storage) (Midttømme et al. 2008). Det finnes rundt 10 ATES-anlegg i Norge, deriblant Norges største UTES-anlegg, Gardermoen flyplass (Midttømme et al. 2009). Det første ATES-anlegget i Norge kom i Selfjord i 1987 og der har det siden blitt boret flere brønner (Dyrud 2008). ATES er avhengig av at det er en akvifer, altså porøse vannfylte grunnforhold, lokalisert hvor man ønsker systemet. Antall egnede akviferer er begrenset og dette begrenser igjen antall mulige lokaliteter som er egnet for ATES-systemer. Den norske geologien har relativt god ledeevne og dette gjør den godt egnet for BTES-systemer (Midttømme et al. 2015). Norge har omtrent 90 BTES-anlegg og noen av dem er

blant de største BTES-systemene i Europa (Midttømme et al. 2009). I tillegg er Norge også blant de landene i verden som har den største økningen i bruk av geotermisk energi med rundt 26000 GSHP-installasjoner (Ground-Source Heat Pump) (Midttømme et al. 2010).

Etter litteraturstudiet har jeg ikke funnet noen eksempler på bruk av CTES, vanntank/pit storage, latent varme eller kjemisk energi for sesonglagring av termisk energi i Norge.

1.4.1 Eksempler på anlegg i Norge

Gardermoen (ATES)

Det mest kjente ATES-systemet i Norge er Oslo lufthavn som ble åpnet i 1998 (Eggen & Vangsnes 2005). Flyplassen er lokalisert på Norges eneste store akvifer (Ganerød et al. 2014). De andre akviferene i Norge er til sammenligning små. Grunnvannet i akviferen benyttes til å varme og kjøle flyplassens 180 000 m² gulvareal. ATES-systemet består av 18 brønner, 9 for varmt vann og 9 for kaldt vann, med 150 meters avstand mellom varme og kalde brønner (Midttømme et al. 2008). For å utnytte den termisk energien er det installert 8 MW med varmpumpe. Grunnvannsspeilet ligger i området på 13-14 meters dybde (Eggen & Vangsnes 2005). Brønnene er 45 meter dype og akviferen er i dybden fra 45 meter opp til 20 meter under bakkenivå. Anlegget har en kjølekapasitet på 6 MW og en varmekapasitet på 7,5 MW. Anlegget produserer 8 GWh kjøling og 11 GWh varme per år. I sommermånedene når det er behov for kjøling benyttes det vann fra de kalde brønnene til å kjøle flyplassen før vannet føres inn i de varme brønnene. Det varme vannet som pumpes ned i de varme brønnene i løpet av sommeren benyttes til oppvarming om vinteren før vannet returneres til de kalde brønnene. Temperaturen fra de kalde brønnene som benyttes til kjøling om sommeren er 4,5 °C. Vannet som føres tilbake til den varme siden har da en temperatur på 30 °C. Om vinteren benyttes vann med en temperatur på 4,5 °C fra den varme siden til oppvarming, mens vannet har en temperatur på 4,1 °C når det føres inn i de kalde brønnene.

Under drift av anlegget har det vært problemer med at brønnene har tettes seg. Problemene har hovedsakelig vært knyttet til innføring av vann i brønnene, ikke uttak av vann (Eggen & Vangsnes 2005). På grunn av problemene var tre av brønnene på både varm og kald side ut av drift i løpet av 2004. For å minimere problemene blir derfor brønnene og varmevekslerne rensset annethvert år.

De totale investeringskostnadene for akvifer og varmepumper/kjølesystem kom på 20 MNOK (Eggen & Vangsnes 2005). Årlige drifts-og vedlikeholdskostnader for anlegget var på 2 % de totale investeringskostnadene og tilsvarer 400 000 NOK. I følge samme kilde var tilbakebetalingstiden for anlegget bare 2 år.

CIENS-bygget (ATES)

Et annet bygg som benytter seg av ATES er CIENS-bygget (Oslo Center for Interdisciplinary Environmental and Social Research) i Oslo (Stene et al. 2008). I utgangspunktet skulle det bygges et BTES-system, men på grunn av de store mengdene av grunnvann i grunnen ble det rimeligere å bore færre brønner enn planlagt og benytte brønnene og grunnvannet som et ATES-system (Midttømme et al. 2008). Ni brønner ble boret og ved hjelp av en GSHP dekker de 65 % av varmebehovet og 90 % av kjølebehovet til det 13 500 m² store bygget med et årlig energibehov på 1,6 GWh (Stene et al. 2008).

Akershus sykehus (BTES)

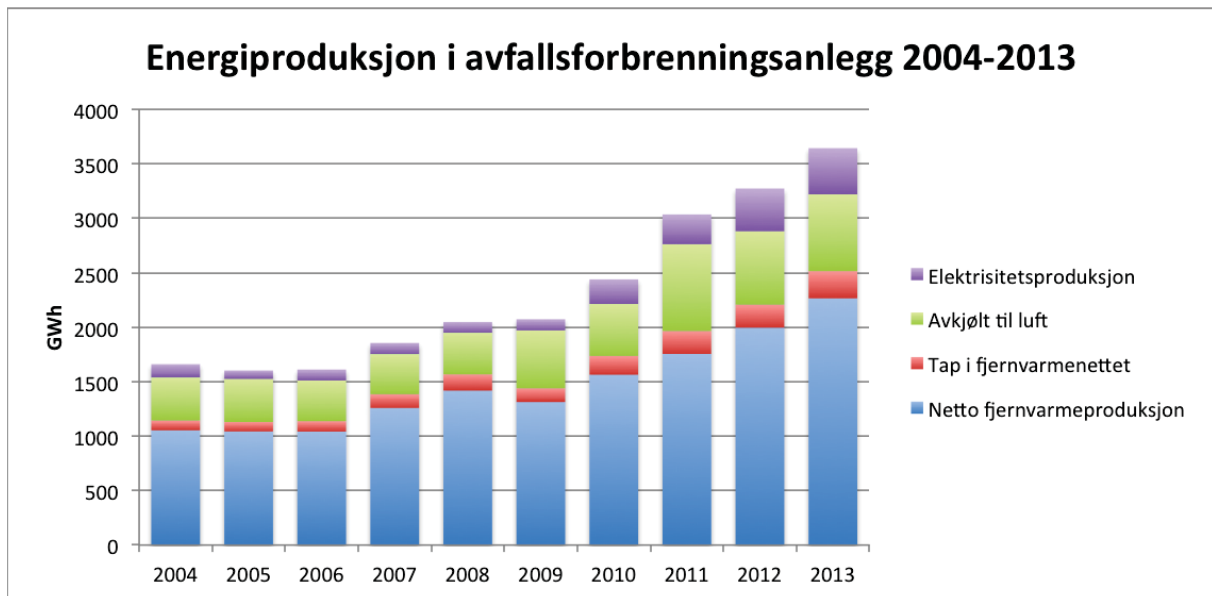
Universitetssykehuset i Akershus, også kalt Ahus ble ferdigstilt mai 2007 og varmes og kjøles av et av de største BTES-systemene i Europa (Midttømme et al. 2010). Det er totalt boret 228 borehull til en dybde på 200 meter og den installerte kapasiteten på varmepumpene i systemet er på 8 MW. Anlegget ble designet for å levere minst 40 % av sykehusets årlige varme og kjølebehov på henholdsvis 26 og 8 GWh. Sykehuset har et gulvareal på 137000 m² og benytter varmepumper i kombinasjon med et kjøleanlegg basert på ammoniakk for oppvarming og kjøling (Stene et al. 2008). Borehullene er lokalisert 300 meter unna sykehuset . Hullene skulle egentlig bores nærmere sykehuset, men på grunn av geologien ble hullene boret lengre unna (Midttømme et al. 2010). De totale kostnadene for systemet kom på 19,5 millioner USD eller 114 MNOK. Det er også planlagt en utvidelse av anlegget hvor det totale antallet borehull blir på 350.

Falstadsenteret (BTES)

Falstadsenteret er et museum på 2850 m² som benytter ni borehull i samarbeid med en varmepumpe på 130 kW til varme og kjølebehov (Midttømme et al. 2008). Borehullene er boret til en dybde av 180 meter. Investeringskostnadene i anlegget kom på 1,5 MNOK og har en forventet levetid på 20 år. Anlegget har en spesifikk varmekostnad på 0,64 NOK/kWh og en tilbakebetalingstid på 12 år.

1.5 Lagringspotensialet for spillvarme fra avfallsforbrenningsanlegg

På bakgrunn av tall fra fjernvarmestatistikken fra Statistisk sentralbyrå (2014) er figur 18 som viser produksjon fra fjernvarme i avfallsforbrenningsanlegg, og ulike tap knyttet til dette. Ut i fra figuren ser man at store mengder varme kjøles bort til luft.

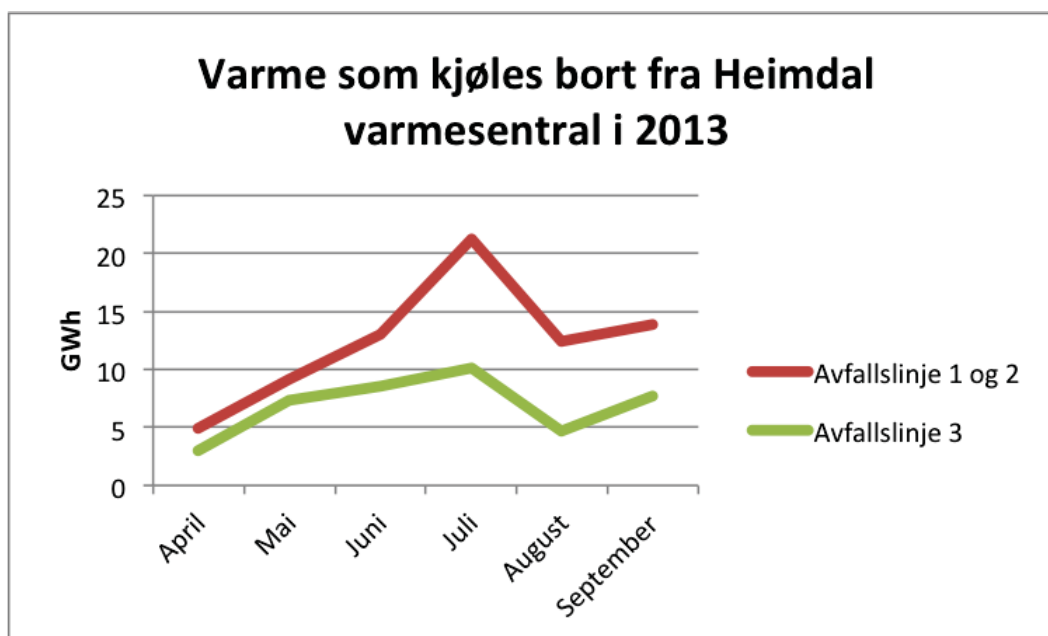


Figur 18: Viser forholdet mellom fjernvarmeproduksjon og mengde avkjølt til luft

Temperaturen på varmen som blir avkjølt til luft vil variere for ulike anlegg. For Heimdal varmesentral for eksempel, er temperaturen ulik for de ulike avfallslinjene i anlegget (Evensen 2015). Anlegget har tre avfallslinjer hvor linje én og to er lik. Temperaturen på varmen som kjøles bort for linje én og to er 150 °C og 180 °C for linje tre.

Én metode for å minimere mengden varme som blir avkjølt til luft er å benytte varmen til å drive turbiner for elektrisitetsproduksjon. Elektrisitetsproduksjonen var relativt stabil fram til 2009, se figur 18, for så å øke kraftig i de følgende årene. Den store økningen i elektrisitetsproduksjon kan i følge Aanesen og Fedoryshyn (2014) forklares med innføringen av deponiforbudet i 2009 som skapte et større kapasitetsbehov. Klima- og forurensningsdirektoratet (Statens forurensningstilsyn i 2009) stilte da krav til høyere energiutnyttelse ved forbrenning av avfall. I områder hvor det ikke var tilstrekkelig varmebehov, som for eksempel i Bergen, ble det installert turbiner for å tilfredsstille kravet til energiutnyttelse.

En annen metode for å minimere varmetapet er å lagre varmen. Det er om sommeren når behovet for varme og elektrisitet er minst at varmen blir avkjølt til luft. Dette ser man tydelig ut i fra verdier fra Heimdal varmesentral, se figur 19 som er supplert av Egil Evensen, seniorrådgiver i Statkraft, hvor de største mengdene varme kjøles bort i de varmeste månedene. Et lager hvor varmen kan lagres til vinteren vil sørge for at energien i avfallet som brennes om sommeren benyttes om vinteren og dermed reduserer forbruket av brensel og kostnader vinterstid. Ut i fra figuren skiller august seg ut med lavere mengder varme kjølt bort. Dette kan forklares med stopp i anlegget for vedlikehold som utføres om sommeren når etterspørselen etter varme er lavest.



Figur 19: Mengde varme som bort fra de tre linjene til Heimdal varmesentral over tid

Heimdal varmesentral har gjennomsnittlig ca 75 GWh varme hvert år som blir kjølt bort (Evensen 2015). I følge Evensen ville anlegget kunne tjene 25 øre/kWh ved bruk av den lagrede varmen om vinteren. Med et lager for 75 GWh ville verdien på den lagrede varmen være 18,75 millioner NOK/år, dersom man går ut i fra at det ikke er noe tap av energi i lagringsperioden.

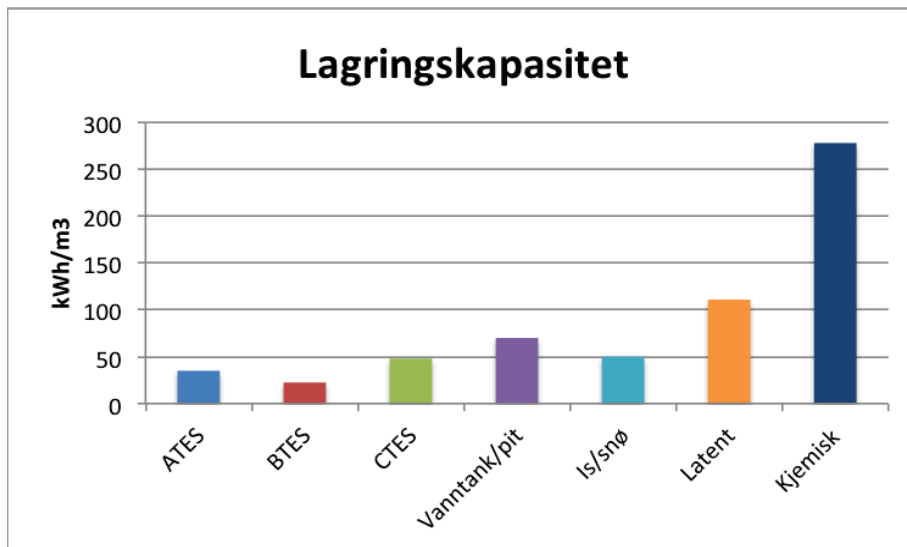
Dersom man benytter fjernvarmestatestikken sine verdier og beregner for det totale lagringspotensialet i Norge så ble det kjølt bort varme for 417,3 millioner NOK i 2013.

1.6 Beregninger

I dette kapitlet blir det lagt til grunn at man skal investere i et lager for 75 GWh spillvarme fra et avfallsforbrenningsanlegg. Videre antas det en inntekt på 0,25 kr/kWh for den lagrede varmen.

1.6.1 Størrelse på lager

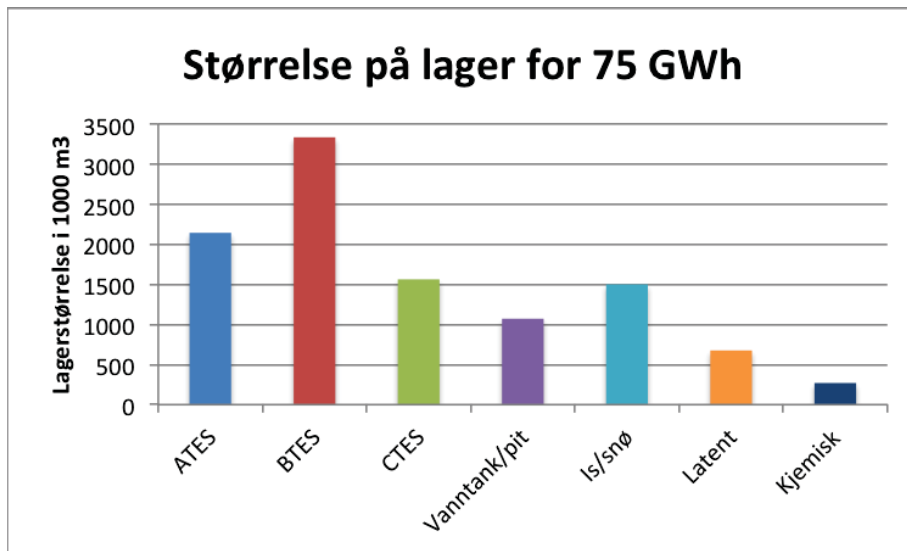
Størrelsen på lageret vil variere med valg av teknologi. Lagringskapasiteten, som vist i figur 20, er bestemmende for hvor stort lageret vil bli.



Figur 20: Lagringskapasiteten til de ulike lagringsteknologiene

Kjemisk energi er den av teknologiene som har den største lagringskapasiteten. I forhold til BTES som har den laveste kapasiteten har kjemisk energi 12 ganger så høy lagringskapasitet.

Ettersom størrelsen på lageret er bestemt av lagringskapasiteten til teknologiene ser figur 21 motsatt ut enn figur 20. BTES trenger derfor 12 ganger så stort volum som kjemisk energi for å lagre den samme mengde energi.

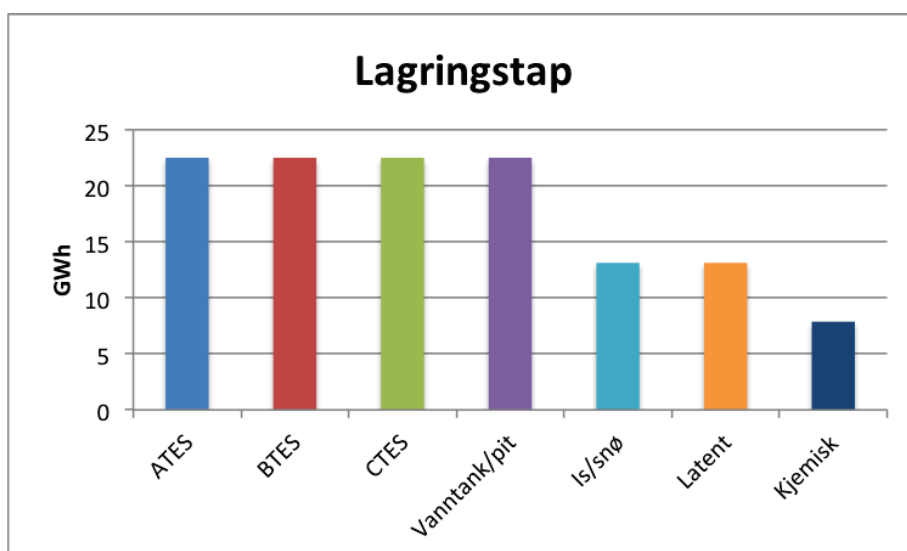


Figur 21: Volumet til det 75 GWh store lageret for de ulike teknologiene

Det er tydelig at det krever store volum for et lager av denne størrelsen. For BTES som krever det største volumet vil et lager for 75 GWh ha et volum på over 3 millioner m³.

1.6.2 Lagringstap

De ulike lagringsteknologiene har ulik effektivitet i forhold til varmetap ved lagring. Effektiviteten til teknologiene er hentet fra et dokument utarbeidet av IEA (International Energy Agency) (2014a). Dokumentet oppgir effektiviteten i intervall og gjennomsnittet av intervallet er benyttet i oppgaven. Teknologiene for følbare varme, latent varme og kjemisk energi har et varmetap på henholdsvis 30, 17,5 og 10,5 %. De totale lagringstapene for et lager på 75 GWh er vist i figur 22.

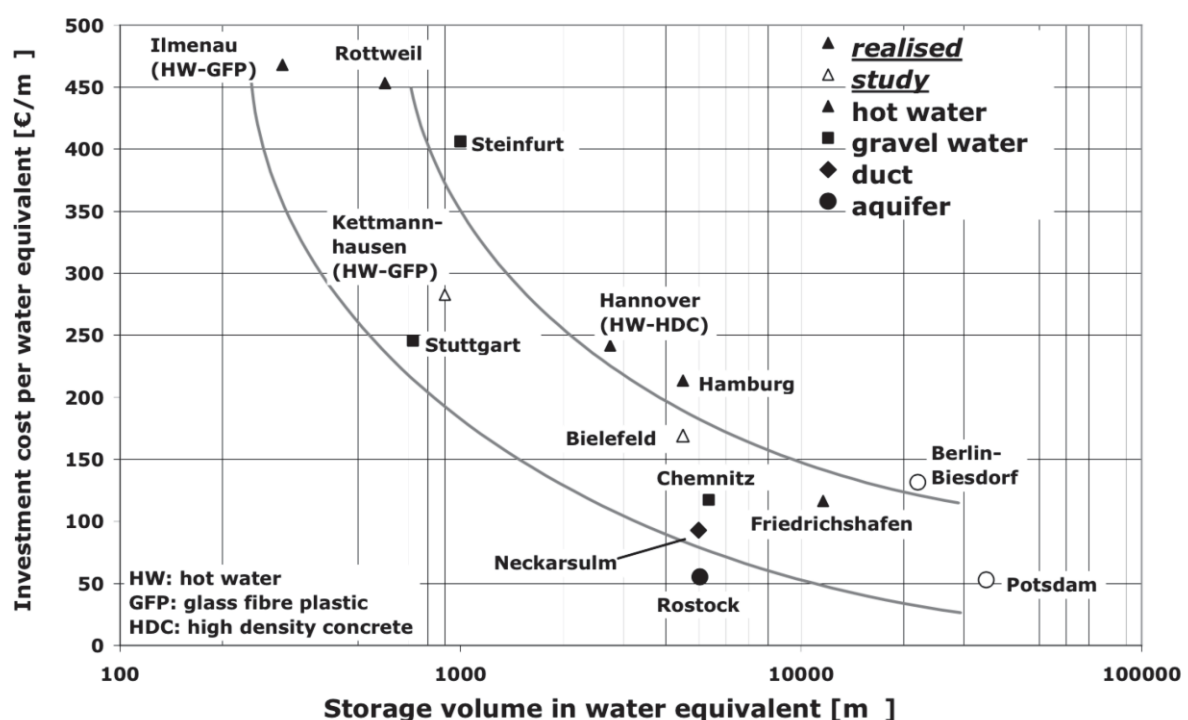


Figur 22: Lagringstapet til de ulike teknologiene for et lager på 75 GWh

1.6.3 Kostnader

Schmidt et al. (2003) skriver i artikkelen at det er vanskelig å sette en generell kostnad per kWh på grunn av store variasjoner i bruksområder, grunnforhold og systemet lageret kobles til. For teknologier basert på følbare varme er kostnadene i dette kapittelet derfor basert på investeringskostnadene til ulike anlegg funnet i artikkelen til Schmidt et al. (2003). Anleggene er bygget mellom 1996 og 2000. Investeringskostnadene for ATES og BTES er basert på de 20000 m³ store lagrene i henholdsvis Rostock og Neckarsulm, mens vanntank er basert på det 12000 m³ store anlegget i Friedrichshafen. På grunn få anlegg og dermed manglende kostnadstall for teknologien CTES, blir ikke denne teknologien tatt med i beregningene i dette kapittelet.

Anleggene som investeringskostnadene er hentet fra, er alle små anlegg i forhold til lageret på 75 GWh som beregningene i denne oppgaven tar utgangspunkt i. Det vil derfor knyttes usikkerhet til kostnadene når dimensjonen blir økt. Investeringskostnadene for teknologiene vil generelt synke med størrelsen på lageret slik figur 23 viser (Schmidt et al. 2003). På grunn av usikkerhet i forhold til hvor mye lavere investeringskostnadene eventuelt ville vært, blir kostnadene fra eksemplene benyttet.



Figur 23: Investeringskostnader for ulike følbare lagringsteknologier (Schmidt et al. 2003)

På grunn av at teknologier basert på latent varme og kjemisk energi fortsatt er på forsknings- og utviklingsstadiet blir beregningene i dette kapittelet gjort med utgangspunkt i generelle tall. De ulike teknologiene og materialene innen latent varme og kjemisk energi blir sett under ett med én kostnad for hver kategori. Det eneste unntaket er snø-/islager innen latent varme. Denne teknologien skiller seg ut med å være en teknologi som bare lagrer kulde. Kostnadstall for snø-/islager er basert på resultater fra anlegget til Sundsvall sykehus, som er beskrevet i teknologikapittelet i denne oppgaven.

For latent varme generelt er kostnadstall for kr/kWh hentet fra Mehling og Cabeza sin bok, Heat and cold storage with PCM (2008). I boken skriver forfatterne at selv ved en kostnad på 5 Euro/kWh, noe som innebærer bruk av et PCM med lav kostnad i tillegg til høy lagringskapasitet vil kostnad per kWh være høy til å være lønnsomt. 5 Euro/kWh vil likevel bli benyttet i beregningene som kostnad for teknologier basert på latent varme for å kunne sammenligne med de andre teknologiene. For kjemisk energi blir 10 Euro/ kWh benyttet som kostnadstall for lager. Tallet er et optimistisk estimat hentet fra et dokument utarbeidet av IRENA (The International Renewable Energy Agency) og IEA (2013).

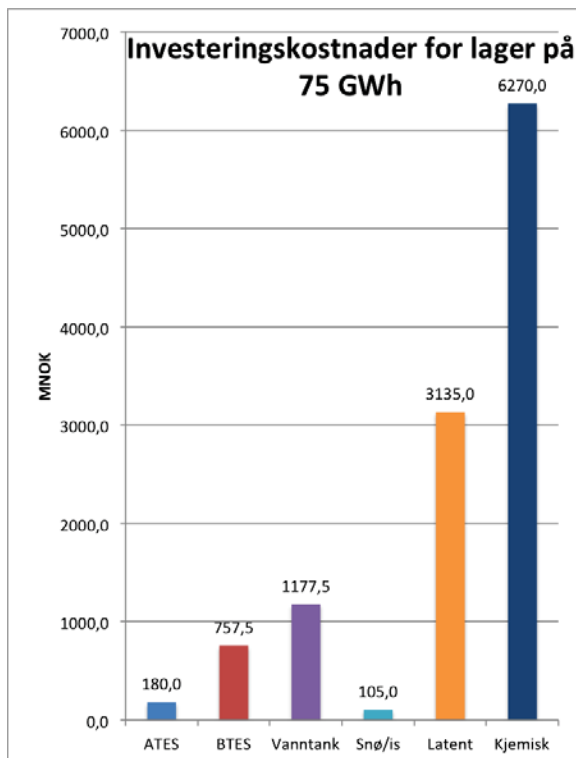
De årlige driftskostnadene for alle teknologiene er satt til 2 % av investeringskostnadene. Denne driftskostnaden kommer fra ATES-systemet på Gardermoen (Eggen & Vangsnes 2005).

Tabell 4: Kostnader for de ulike teknologiene

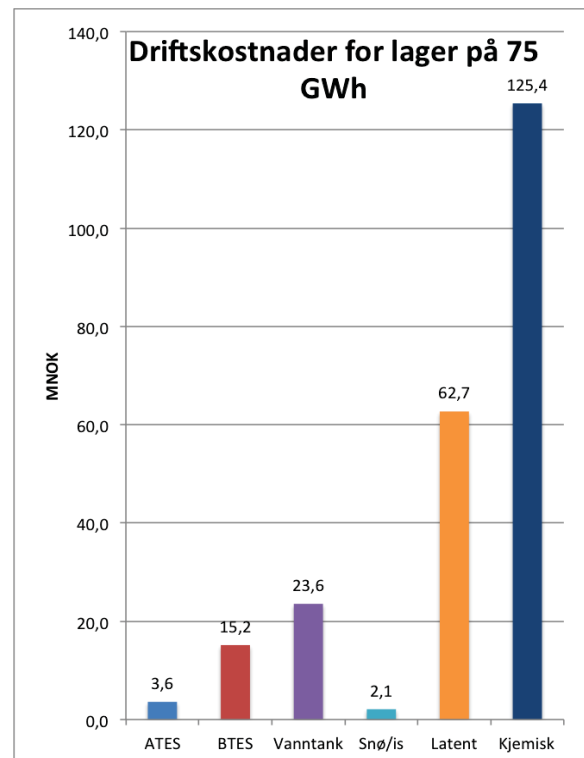
Teknologi	Lagerkostnad (kr/m³)	Lagringstetthet kWh/m³	Investerings- kostnad kr/kWh	Investerings- kostnad 75 GWh (MNOK)	Driftskostnad (MNOK/år)
ATES	83,6	35	2,4	180,0	3,6
BTES	227	22,5	10,1	757,5	15,2
Vanntank	1100,6	70	15,7	1177,5	23,6
Snø/is	71	50	1,4	105,0	2,1
Latent	4639,8	111	41,8	3135,0	62,7
Kjemisk	23240,8	278	83,6	6270,0	125,4

I tabell 4 vises kostnadene knyttet til de ulike teknologiene. Snø-/islager har de laveste investeringskostnadene, og dermed også de laveste driftskostnadene ettersom dette er en fast

prosent av investeringskostnaden. Selv om kjemisk energi har en vesentlig høyere lagerkostnad per m³ enn latent varme, så ender investeringskostnadene bare opp på det dobbelte. Dette skyldes den høye lagringstettheten til kjemisk energi. Et lager på 75 GWh er et stort lager og investeringskostnadene gjenspeiler dette. Særlig kjemisk energi som har en investeringskostnad på nesten 6,3 milliarder kr. Kostnadsforholdene illustreres også i figur 24 og 25.



Figur 24: Investeringskostnader for lageret



Figur 25: Driftskostnader for lageret

Som figur 24 og 25 viser, er det en stor forskjell i kostnadene for de ulike teknologiene. Det er en stor differanse mellom snø-/islager og latent, selv om begge baserer seg på latent varme. Dette kan skyldes av den teknologisk enkle løsningen for snø-/islager og det at de andre teknologiene basert på latent fortsatt ikke er modne.

Tabell 5: Effekten av lagringstap på inntekt

Teknologi	Effektivitet (%)	Varme i lager etter tap (GWh)	Inntekt (kr/kWh)	Inntekt etter tap
ATES	70	52,5	0,25	kr 13 125 000
BTES	70	52,5	0,25	kr 13 125 000
Vanntank	70	52,5	0,25	kr 13 125 000
Snø/is	82,5	61,875	0,25	kr 15 468 750
Latent	82,5	61,875	0,25	kr 15 468 750
Kjemisk	89,5	67,125	0,25	kr 16 781 250

I tabell 5 vises virkningen av effektiviteten til teknologiene på den mulige inntekten fra lageret. Den 19,5 % høyere effektiviteten til kjemisk energi fører til et lagringstap på 3,6 millioner kr mindre enn for de følbare teknologiene

1.6.4 Nåverdi

For å beregne lønnsomheten til lagringsteknologiene over levetiden er netto nåverdi beregnet for hver av teknologiene. Ved beregning av netto nåverdi er det benyttet en kalkulasjonsrente på 6 %. Kalkulasjonsrenten på 6 % er den samme som NVE og Finansdepartementet benytter for å beregne samfunnsøkonomisk nytte for fjernvarmeprosjekter (Selfors et al. 2011).

Nåverdiberegningene vises i tabell 6 til og med 11. Levetiden til alle teknologiene er satt til 20 år bortsett fra for snø-/islager, se tabell 9, som ifølge Skogsberg og Nordell (2001) har en levetid på 40 år.

Tabell 6: Nåverdiberegning for ATES

ATES	år	0	1	2	3	20	SUM
Investering (MNOK)		-180,0					-180,0
Driftskostnader (MNOK)			-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-75,6
Inntekter (MNOK)			13,1	13,1	13,1	13,1	275,6
Kontantstrøm (MNOK)		-180,0	9,5	9,5	9,5	9,5	20,0
Netto nåverdi (MNOK)		-180,0	9,0	8,5	8,0	3,0	-61,2

ATES har en positiv kontantstrøm, men etter at kontantstrømmen er diskontert ender teknologiene opp med en negativ nåverdi, som betyr at investeringen ikke er lønnsom.

Tabell 7: Nåverdiberegning for BTES

BTES	år	0	1	2	3	20	SUM
Investering (MNOK)		-757,5					-757,5
Driftskostnader (MNOK)			-15,2	-15,2	-15,2	-15,2	-319,2
Inntekter (MNOK)			13,1	13,1	13,1	13,1	275,6
Kontantstrøm (MNOK)		-757,5	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-801,1
Netto nåverdi (MNOK)		-757,5	-2,0	-1,8	-1,7	-0,6	-783,4

I motsetning til ATES har ikke BTES er positiv kontantstrøm, og ender da også opp med en negativ nåverdi.

Tabell 8: Nåverdiberegning for vanntank

Vanntank	år	0	1	2	3	20	SUM
Investering (MNOK)		-1177,5					-1177,5
Driftskostnader (MNOK)			-23,6	-23,6	-23,6	-23,6	-23,6
Inntekter (MNOK)			13,1	13,1	13,1	13,1	275,6
Kontantstrøm (MNOK)		-1177,5	-10,5	-10,5	-10,5	-10,5	-1397,5
Netto nåverdi (MNOK)		-1177,5	-9,9	-9,3	-8,8	-3,3	-1308,1

Vanntank er den mest kostbare av de følbare teknologiene som er med i beregningen. Denne teknologien er derfor heller ikke lønnsom.

Tabell 9: Nåverdiberegning for snø-/islager

Snø-/islager	år	0	1	2	3	40	SUM
Investering (MNOK)		-105,0					-105,0
Driftskostnader (MNOK)			-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-86,1
Inntekter (MNOK)			15,5	15,5	15,5	15,5	634,2
Kontantstrøm (MNOK)		-105,0	13,4	13,4	13,4	13,4	443,1
Netto nåverdi (MNOK)		-105,0	12,6	11,9	11,2	1,3	109,5

Som den eneste av teknologiene ender snø-/islager opp med en nåverdi som er positiv, og som er på 109,5 millioner kr, gitt en levetid på 40 år. Dersom levetiden til denne teknologiene også var 20 år, ville teknologien likevel hatt en positiv nåverdi.

Tabell 10: Nåverdiberegning for teknologier basert på latent varme

Latent	år	0	1	2	3	20	SUM
Investering (MNOK)		-3135,0					-3135,0
Driftskostnader (MNOK)			-62,7	-62,7	-62,7	-62,7	-23,6
Inntekter (MNOK)			15,5	15,5	15,5	15,5	324,8
Kontantstrøm (MNOK)		-3135,0	-49,6	-49,6	-49,6	-47,2	-4126,9
Netto nåverdi (MNOK)		-3135,0	-46,8	-44,1	-41,6	-14,7	-3724,0

Latent varme har meget høye kostnader og får derfor en negativ nåverdi.

Tabell 11: Nåverdiberegning for teknologier basert på kjemisk energi

Kjemisk	år	0	1	2	3	20	SUM
Investering (MNOK)		-6270,0					-6270,0
Driftskostnader (MNOK)			-125,4	-125,4	-125,4	-125,4	-23,6
Inntekter (MNOK)			13,1	13,1	13,1	16,8	352,4
Kontantstrøm (MNOK)		-6270,0	-112,3	-112,3	-112,3	-108,6	-8551,0
Netto nåverdi (MNOK)		-6270,0	-105,9	-99,9	-94,3	-33,9	-7624,5

Som den teknologien med de høyeste kostnadene, har kjemisk energi også den mest negative nåverdien. Dette vises også i tabell 12 hvor inntektene per kWh for at nåverdien skal bli null er beregnet.

Tabell 12: Varmeprisen som gir en nåverdi = 0 for de ulike teknologiene

Teknologi	Nåverdi ved varmepris, 0,25 kr/kWh	Varmepris som gir nåverdi = 0 (kr/kWh)
ATES	-61,2	0,3435
BTES	-783,4	1,4466
Vanntank	-1308,1	2,2482
Snø-/islager	109,5	0,1397
Latent	-3724	5,0765
Kjemisk	-7624,5	9,3588

Tabellen viser den faktiske prisen avfallsforbrenningsanlegget må ha per kWh for de ulike teknologiene for å ende opp med en nåverdi på kr 0 ved endt levetid.

5 Diskusjon

5.1 Litteraturstudie

Ut i fra litteraturstudiet ble det raskt konstatert at følbar varme, men unntak fra snø-/islager, er den av de tre energiformene som i dag er tilstrekkelig moden til å benyttes som sesonglager for termisk energi. Den store ulempen med følbar varme er den lave lagringskapasiteten i forhold til de andre energiformene. En ulempe i forhold til å lagre spillvarme fra avfallsforbrenningsanlegg er lagringstemperaturene som lagrene kan lagre. Teknologiene basert på følbar varme kan lagre temperaturer opp til 90 °C uten noen form for trykksetting av systemene. Dette er langt under temperaturen på spillvarmen, og dette vil føre til en lavere effektivitet for disse teknologiene. Det finnes allerede mange anlegg som med suksess benytter teknologier for følbar varme til varmelagring, også i Norge. Av anleggene i Norge er det flest BTES-anlegg, men også noen ATES-anlegg. Det finnes derimot ingen CTES-anlegg eller vanntank/pit storage for sesonglagring av termisk energi i Norge.

ATES-anlegget ved Gardermoen hadde en tilbakebetalingstid på bare 2 år til tross for problemer med tette brønner. De rimelige konstruksjonskostnadene gjør ATES til en attraktiv teknologi. Ulempene med teknologien er det begrensede antallet med egnede lokaliteter og problematikken med fortetning av brønnene. Anlegget ved Gardermoen benytter den eneste store akviferen i Norge. Dette hindrer en stor utbredelse av teknologiene i Norge.

På grunnlag av litteraturstudiet kan særlig to årsaker trekkes fram som forklaring på at BTES-anlegg er den mest utbredte av teknologiene i Norge. Den norske geologien har høy lagringskapasitet. Dette gjør dermed BTES-anlegg godt egnet i Norge sammenlignet med andre steder. I tillegg til den egnede geologien er det god kompetanse på varmepumper i Norge. Norge har hatt en stor økning i bruk av varmepumper av ulike varianter. I tillegg har Norge mye erfaring med boring. Kompetansen fra disse områdene vil være nyttig ved installasjon og drift av varmepumper i BTES-systemer.

Latent varme har høyere lagringskapasitet enn følbar varme, men er fortsatt på forskningsstadiet. Den høye lagringskapasiteten er en egenskap som gjør slike teknologier til et populært forskningsområde. Forskingen har ledet til funn av en rekke ulike bruksområder for ”fase-forandrende materialer”. Ett av de mest omtalte bruksområdene for PCM er som varmelager i bygningsmaterialer. Dette stemmer godt overens med et utsagn fra Zalba et al.

(2003 s. 271), hvor forfatterne oppgir at dette bruksområdet var et av de første bruksområdene som det ble startet forskning på. I forhold til sesonglagring av varme er det største forskningsområdet for latent varme bruk av PCM som lager for solenergi. Forskning på lager for solenergi er et stort forskningsfelt på verdensbasis, men er ikke et like stort felt i Norge. Temperaturene som kan lagres fra solenergi kan sammenlignes med temperaturene fra spillvarme. Dette gjør at teknologiene vil ha en høyere effektivitet i forhold til teknologiene basert på følbare varme. I motsetning til ATES og BTES er ikke teknologier basert på latent varme avhengig av geologiske undersøkelser ettersom de ikke benytter grunnen til å lagre energien. Dette stiller derimot krav til beholderne hvor faseendringene skjer og energien lagres. Teknisk sett er latent varme interessant i forhold til å lagre spillvarme, og utviklingen til ulike teknologier for sesonglagring av termisk energi vil være verdt å følge med på.

Snø-/islager kan ikke benyttes til å lagre spillvarme fra et avfallsforbrenningsanlegg, og på den måten utnytte energien som ellers ville gått til spille, men teknologien kan utnytte den termiske energien i snø og is. Dette er også termisk energi som ellers ikke ville blitt utnyttet. I Norge har vi vintre med lave temperaturer og snø, mens det sommerstid brukes energi på kjøling. Bruken av fjernkjøling har i gjennomsnitt økt med over 30 % hver år fra 2001 til 2012, hvor leveransen var 133 GWh (Aanesen & Fedoryshyn 2014). Det vil være fordelaktig å lagre til snø om vinteren for bruk til kjøling om sommeren når denne kilden til termisk energi er tilgjengelig. Et studie hvor mulighetene for å benytte denne teknologien som lager for bruk til fjernkjøling i Norge vil være et interessant og relevant tema.

I forhold til latent varme og særlig følbare varme, har kjemisk energi høy lagringstetthet. Dette er, sammen med lavt lagringstap, kjemisk energi sin mest attraktive egenskap. Dessverre er teknologiene på et tidlig forsknings- og utviklingsstadium. Det lave lagringstapet til kjemisk energi er gunstig for et sesonglager. Den lagrede energien kan da oppbevares over lang tid fram til energien trengs. Dette er ikke tilfellet for de andre teknologene hvor lagringstapet gjør at den lagrede energien må benyttes mellom årstidene hvor lageret ”lades” med varme for å unngå for store lagringstap. I likhet med latent varme kan kjemisk energi lagre temperaturene fra spillvarme fra avfallsforbrenningsanlegg og er ikke avhengig av geologiske forhold. Kjemisk energi kan også lagre langt høyere temperaturer enn dette, noe som kan benyttes til elektrisetsproduksjon. Før kjemisk lagring kan brukes til lager kreves det mye forskning på reaksjonsmaterialer og utvikling av beholdere hvor reaksjonene skjer.

Det pågår mye forskning på teknologier og materialer for sesonglagring av termisk energi og det er dermed en stor mengde forskningsartikler på feltet. Litteraturen som er benyttet i oppgaven er bare et utvalg av den totale mengden litteratur. Det er derfor en mulighet for at relevant informasjon fra andre kilder ikke har kommet med i litteraturgrunnlaget. Ved utvalg av litteratur ble det lagt vekt på å danne et bredt grunnlag for oppgaven. Grunnleggende informasjon om teknologiene, eksempler på anlegg, hva som skjer på forskningsfronten og framtidsutsikter var hovedfokuset ved innsamling av informasjon. Det ble også lagt vekt på litteraturens validitet i forhold til problemstilling og forskningsspørsmål for oppgaven.

5.2 Beregninger

Resultatene viser at teknologiene basert på følbare varme trenger de største volumene for å lagre 75 GWh. Latent varme behøver noe mindre volum enn de følbare, og kjemisk energi behøver minst volum. Dette er ikke overraskende og stemmer overens med samtlige kilder i litteraturstudiet. Sharma et al. (2009) viser til at PCM lagrer 5-14 ganger mer varme per enhet volum enn følbare varme. I følge beregningene mine trenger BTES 4,9 ganger så stort volum som latent varme for å lagre samme mengde energi. BTES har den laveste lagringskapasiteten av de følbare teknologiene og de andre teknologiene vil derfor ha en lavere differanse i volum sammenlignet med latent varme. I forhold til kjemisk energi så har i følge rapporten fra IEA (2014b) følbare varme 5-20 ganger lavere lagringskapasitet. Ut i fra resultatene mine, trenger BTES 12,3 ganger så stort volum for å lagre den samme mengden energi.

Tapet av termisk energi ved lagring bestemmes av effektiviteten til teknologiene. Tapet for de følbare teknologiene er i beregningene like, og er på 30 %. Dette er endel høyere enn for teknologiene basert på latent varme som har 17,5 % tap. De kjemiske teknologiene har de laveste tapene og er i beregningene på 10,5 %.

Ut i fra kostnadsberegningene er det tydelig at kjemisk energi har de klart høyeste lagerkostnadene per volum. I forhold til snø-/islager, som har de laveste lagerkostnadene per volum, har kjemisk energi 327 ganger så høye kostnader per volum. Etter at lagringstettheten til teknologiene er tatt med i beregningene, så vil kjemisk energi på grunn av høy lagringstetthet ha redusert forholdet til 60 ganger så høye investeringskostnader per kWh. I forhold til latent varme har kjemisk energi dobbelt så høy investeringskostnad. Ettersom

driftskostnadene er 2 % av investeringskostnadene er størrelsesforholdene mellom de ulike teknologiene lik til investeringskostnadene.

Resultatene fra nåverdiberegningene viser at snø-/islager er den eneste av teknologiene som har en positiv nåverdi. Sett bort i fra denne teknologien som ikke har varmelagringspotensiale er ATES den eneste av teknologiene som har en positiv kontantstrøm. Alle de andre teknologiene har høyere driftskostnader enn inntekter fra lageret.

Størrelsen på lagrene i volum er dikterende for hvor stor plass som må settes av til lageret ved anlegget. Teknologier som BTES med lav lagringskapasitet og dermed stort lagervolum krever et stort areal på tomten. Ved etablering av anlegg vil det være en stor fordel at lageret har minst mulig volum for å minimere arealet til tomten som må kjøpes. Teknologier innen følbare varme og særlig kjemisk energi har en fordel på dette området. Innen følbare varme har teknologiene CTES og vanntank/pit storage er fordel over ATES og BTES. Disse teknologiene benytter vann som har en høy lagringskapasitet som lagringsmedium, i motsetning til berggrunn eller en kombinasjon av vann og berggrunn slik ATES og BTES gjør.

CTES blir ikke tatt med i beregningene på grunn av manglende informasjon om kostnader for teknologien. Som beskrevet i teknologikapittelet er CTES en teknologi som er lite benyttet på grunn av kostbar konstruksjon av lager og få naturlige egnede lokaliteter hvor konstruksjon av lageret ikke er nødvendig. Den høye kapasiteten for innføring og uttak av vann gjør CTES til en mulig teknologi dersom det finnes naturlige lokaliteter i nærhet til fjernvarmeanlegget. En kartlegging av eventuelle lokaliteter i Norge ville derfor vært interessant for å kunne vurdere om CTES er en mulig teknologi i Norge.

I forhold til lagringstapene så kan det knyttes noe usikkerhet til at det er benyttet gjennomsnittet av generelle tall. Det vil være noe variasjoner i effektiviteten til de følbare teknologiene, men på grunn av manglende funn av verdier for de ulike teknologiene i litteraturstudiet ble det altså benyttet lik effektivitet for alle de følbare teknologiene. Det samme kan sies om latent varme, men særlig kjemisk energi hvor det forventes at noen av teknologiene kan lagre den termiske energien tilnærmet uten tap ved romtemperatur. Effektiviteten på 89,5 % som er benyttet som effektivitet vil da være vesentlig høyere, noe som vil føre til svært lite tap i lagringsperioden.

Det kan diskuteres hvor valide kostnadene som er benyttet i oppgaven er, både for følbar varme, latent varme og kjemisk energi. Investeringskostnadene for teknologiene basert på følbar varme er basert på kostnader til anlegg funnet i litteraturen. Anleggene er små i størrelse i forhold til anlegget i denne oppgaven og de er heller ikke av nyeste dato. Hvordan kostnadene for komponenter og bygging av anlegg har endret seg er ikke undersøkt i denne oppgaven, men det kan basert på figur 23 i kapittel 4 tyde på at teknologiene vil ha en lavere investeringskostnad enn det som er forutsatt, ettersom anlegget er vesentlig større enn de anleggene som tallene baserer seg på. Disse skalafordelene som gjør de større anleggene rimeligere per volum enn de små, kan knyttes til ulike årsaker, som blant annet at arealet av overflateareal pr volumenhet (og derved stålmengde) reduseres ved økende volum, og at borekostnader per hull reduseres ved boring av mange hull.

Usikkerhet rundt investeringskostnadene for latent varme og kjemisk energi er usikkerheten rundt investeringskostnadene stor. Ettersom teknologiene fortsatt er på forsknings-og utviklingsstadiet er det å sette en investeringskostnad for teknologiene en vanskelig oppgave. Kostnadene er basert på generelle, men ut i fra litteraturen optimistiske tall. Hvor valide disse tallene er, er vanskelig å vite.

Driftskostnadene som er benyttet i oppgaven er et annet usikkerhetsmoment.

Eksempelanleggene som ble benyttet til investeringskostnader for følbar varme inneholdt ikke informasjon om driftskostnadene. Driftskostnaden ble satt til 2 % av investeringskostnaden på grunnlag av ATES anlegg. På grunn av en del problemer knyttet til fortetning av brønner for ATES-systemer har slike systemer høye driftskostnader og er ut i fra litteraturstudiet høyere enn for de andre følbare teknologiene.

Ut i fra beregningene er det ingen av teknologiene, sett bort i fra snø-/islager, som er lønnsomme ved de forutsetningene som er satt i oppgaven. ATES er den eneste at teknologiene med varmelagringspotensiale som er i nærheten av å ha en nåverdi lik null. Beregningene viser at en inntekt på 0,34 kr/kWh for den lagrede varmen vil gjøre teknologien lønnsom. Ettersom investeringskostnaden muligens er satt for høyt og nåverdien til ATES ikke er mye negativ, skal det ikke store kostnadsreduksjonene til for at ATES ville være lønnsomt. Som beskrevet før finnes det dessverre ikke noen store akviferer i Norge bortsett

fra den ved Gardermoen. Det ville likevel vært interessant med et studie hvor kostnadene for et ATES system ble kalkulert på grunnlag av reelle tall fra en entreprenør.

6 Konklusjon

Av de tre energiformene termisk energi kan lagres som, følbar varme, latent varme og kjemisk energi, er det på bakgrunn av litteraturstudiet bare teknologier basert på følbar varme som er tilstrekkelig moden til å kunne benyttes som sesonglager for varme. ATES (Aquifer thermal energy storage) og BTES (Borehole thermal energy storage) er de eneste benyttede teknologiene for sesonglagring i Norge, hvor BTES står for den desidert største andelen. Den norske geologien er godt egnet for BTES, men dette er den av teknologiene som har den laveste lagringskapasiteten, noe som betyr at det kreves store volum ved lagring. Ut i fra beregningene krever BTES en varmepris på 1,44 kr/kWh for å gå i null ved endt levetid. ATES har de laveste investeringskostnadene, men på grunn av få egnede lokaliteter vil ikke denne teknologien være aktuell for store lagre i Norge. CTES (Cavern thermal energy storage) og vanntank/pit storage har høyere lagringskapasitet enn ATES og BTES, men på grunn av høye investeringskostnader vil ikke teknologiene være relevant for bruk i Norge ved slike lagerstørrelser. Dersom det finnes naturlige huler eller gruver som kan benyttes som lager for CTES kan dette være en mulig teknologi.

Teknologier basert på latent varme og kjemisk energi er per i dag på forsknings- og utviklingsstadiet, men har stort potensiale som sesonglager for termisk energi. Beregningene viser at kjemisk energi, som har den høyeste lagringskapasiteten per volum, har 12 ganger så stor lagringskapasitet som BTES, men krever en varmepris på over 9 kr/kWh for å få en nåverdi på null for et lager på 75 GWh.

Den av teknologiene som skiller seg mest ut i oppgavene er snø-/islager, som bare kan benyttes til å lagre kulde for kjøling. Dette er den eneste av teknologiene som i beregningene for det 75 GWh store lageret ender opp med en positiv nåvedi, men teknologien kan ikke benyttes som lager for spillvarme fra avfallsforbrenning. Teknologien er derimot interessant som lager for fjernkjøling.

Dersom jeg hadde hatt mer tid med denne oppgaven ville jeg fokusert mer på hva de reelle kostnadene for de følbare teknologiene er, ikke basert meg på kostnadstall fra andre anlegg. Dette ville gitt mer anvendelige kostnader for videre forskning.

7 Videre arbeid

Denne oppgaven gir en oversikt over de ulike teknologiene for sesonglagring av termisk energi. Med bakgrunn i oppgaven finnes det flere ulike områder for videre forskning. Ettersom det finnes endel BTES-anlegg i Norge og den norske geologien er godt egnet for denne teknologien, ville det vært naturlig å utført et detaljert studie, hovedsakelig på kostnader.

En av de mest interessante teknologiene i denne oppgaven er snø-/islager for lagring av kulde. Dette er den rimeligste av teknologiene, i tillegg til at den er tilstrekkelig moden. Et detaljert studie av denne teknologien med fokus på kostnader og muligheter for integrering med fjernkjøleanlegg ville være interessant ettersom fjernkjøling er en voksende næring.

Etter hvert for teknologier basert på latent varme og kjemisk energi vil det være naturlig å se på mulighetene for å ta i bruk disse, dersom kostnadene reduseres.

Litteraturliste

- Andersen, P. & Fjellvåg, H. (2009). Eutektisk blanding. *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/eutektisk_blanding (lest 15.03.2015).
- Anon. (Ukjent årstall). *Sideview of single Borehole Thermal Energy Storage (BTES) tube*. Tilgjengelig fra: <http://www.dlsc.ca/borehole.htm> (lest 25. februar).
- Bales, C. (2005). Thermal Properties of Materials for Thermo-chemical Storage of Solar Heat *A Report of IEA Solar Heating and Cooling programme - Task 32*.
- Bauer, D., Marx, R., Nußbicker-Lux, J., Ochs, F., Heidemann, W. & Müller-Steinhagen, H. (2010). German central solar heating plants with seasonal heat storage. *Solar Energy*, 84 (9): 612-623.
- Boye, K. & Koekebakker, S. (2006). *Finansielle emner*. 14 utg.: Cappelen Damm.
- Duffie, J. A. & Bechman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Fourth Edition utg.: John Wiley & Sons (lest 16.02.2015).
- Dyrud, I. F. (2008). *Kartlegging av grunnvarmepotensialet i Seljord - Hydrologisk kartlegging av et infiltrasjonsmagasin. Transient 3D modellering*. Master thesis: Høgskulen i Telemark, Avdeling for allmennvitenskaplige fag. 111 s.
- Eggen, G. & Vangsnes, G. (2005). *Heat pump for district cooling and heating at Oslo airport, Gardermoen*. IEA Heat Pump Conference, Las Vegas, Nevada, s. 7.
- Evensen, E. (2015). *Informasjon om spillvarme*. Personlig meddelelse (14.04.2015).
- Farid, M. M., Khudhair, M. A., Razack, K. A. S. & Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45 (9-10): 1597-1615.
- Ganerød, G. V., Seiter, A., Jæger, Ø. & Engdal, M. (2014). *Grunnvann i Norge*. Tilgjengelig fra: http://www.grunnvann.no/grunnvann_i_norge.php (lest 04.04.2015).
- Gao, Q., Li, M., Yu, M., Spittle, J. D. & Yan, Y. Y. (2009). Review of development from GSHP to UTES in China and other countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (6-7): 1383-1394.
- Gehlin, S. (2002). *Thermal Response Test - Method Development and Evaluation*. Doctoral thesis: Luleå University of Technology, Department of Environmental Engineering. 191 s.
- Grycz, D., Hemza, P. & Rozehnal, Z. k. (2014). Charging of the experimental high temperature BTES via CHP unit - early results. *Energy Procedia*, 46: 355-360.

- Grøn, Ø. (2009). Varmekapasitet. *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/varmekapasitet> (lest 24.04.2015).
- Hamnaberg, H. & Selfors, A. (2010). Klimagassutslipp fra fjernvarme: Tiltak og virkemidler - Et innspill til Klimakur 2020. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Han, M. Y., Wang, Z. R. & Dai, J. Y. (2009). Thermal stratification within the water tank. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (5): 1014-1026.
- Hofstad, K. (2014). Akvifer. *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/akvifer> (lest 15.08.2014).
- Hongois, S., Kuznik, F., Stevens, P. & Roux, J.-J. (2011). Development and characterisation of a new MgSO₄ - zeolite composite for long-term thermal energy storage. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95 (7): 1831-1837.
- IEA. (2014a). *Technology Roadmap. Energy storage*.
- IEA. (2014b). *Energy storage Technology Roadmap. Technology Annex. 19 March 2014*.
- IEA-ETSAP. & IRENA. (2013). Thermal Energy Storage - Technology Brief E17 - January 2013. Tilgjengelig fra: <https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP Tech Brief E17 Thermal Energy Storage.pdf> (lest 28.04.2015).
- Kabus, F., Wolfgramm, M., Seibt, A., Richlak, U. & Beuster, H. (2009). *Aquifer thermal energy storage in Neubrandenburg - monitoring throughout three years of regular operation*. Effstock conference 2009, Stockholm, Sweden.
- Kenisarin, M. & Mahkamov, K. (2007). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (9): 1913-1965.
- Lee, K. S. (2013). *Underground Thermal Energy Storage*: Springer (lest 18.01.2015).
- Ljungqvist, J., Vogel, T. & Nielsen, L. (2013). A new innovative Ground Heat Exchanger for heating, cooling and energy storage. *REHVA HVAC European Journal*: 47-49.
- Lorentzen, G. (2009). Underkjøling. *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/underkj%C3%B8ling> (lest 09.04.2015).
- Mehling, H. & Cabeza, F. L. (2008). *Heat and cold storage with PCM*. An up to date introduction into basics and application. Tilgjengelig fra: http://books.google.no/books/about/Heat_and_cold_storage_with_PCM.html?id=N8LGwUNYWX8C&redir_esc=y (lest 30.04.2015).
- Midttømme, K., Banks, D., Ramstad, R. K., Sæther, O. M. & Skarphagen, H. (2008). Ground-Source Heat Pumps and Underground Thermal Energy Storage - Energy for the future. *Geology for Society, Geological Survey of Norway Special Publication*, 11: 93-98.

- Midttømme, K., Hauge, A., Grini, R. S., Stene, J. & Skarphagen, H. (2009). Underground thermal energy storage (UTES) with heat pumps in Norway. Proceedings of Effstock 2009, Stockholm, Sweden, June 15-17, 2009.
- Midttømme, K., Berre, I., Hauge, A., Musæus, T. E. & Kristjansson, B. R. (2010). *Geothermal Energy - Country Update for Norway*. World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia. 5 s.
- Midttømme, K., Ramstad, R. K. & Müller, J. (2015). *Geothermal Energy - Country Update for Norway*. World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia. 7 s.
- N`Tsoukpoe, K. E., Liu, H., Pierrés, L. N. & Luo, L. (2009). A review on long-term sorption solar energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (9): 2385-2396.
- Nielsen, K. (2003). Thermal Energy Storage. A State-of-the-Art: NTNU, Trondheim.
- Nordell, B. (1994). *Borehole heat store desig optimization*. Doctoral thesis. Luleå, Sweden: Luleå University of Technology, Division of water resources engineering. 218 s.
- Nordell, B. & Sundin, E. (1998). *Snöupplag för säsonglagring av kyla (Snow Deposit for Seasonal Storage of Cold)*, Division of Water Resources Enigneering, Luleå University of Technology, Sweden. April 1998 (Sitert etter Skogsberg, K. 2005).
- Nordell, B. (2000). Large-scale Thermal Energy Storage: Division of Water Resources Engineering. Luleå University of Technology.
- Nordell, B., Grein, M. & Kharseh, M. (2007, 21-24 May). *Large-scale Utilisation of Renewable Energy Requires Energy Storage*. International Conferense for Renewable Energy Storage (ICRESD), Algeria.
- Nordell, B. & Gehlin, S. (2009). *30 years of thermal energy storage - A review of the IEA ECES Stock Conferences*. IEA.
- Nordell, B. (2012). *Underground Thermal Energy Storage (UTES)*. Innostock 2012. The 12th International Conference on Energy Storage, Lleida, Spain.
- Novo, A. V., Bayon, J. R., Castro-Fresno, D. & Rodriguez-Hernandez, J. (2010). Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel–water pits. *Applied Energy*, 87 (2): 390-397.
- Pinel, P., Cruickshank, C. A., Beausoleil-Morrison, I. & Wills, A. (2011). A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (7): 3341-3359.
- Sanner, B. & Knoblich, K. (1999). Advantages and problem of high temperature underground thermal energy storage. *Bulletin d´Hydrogéologie*, 17: 341-348.

- Sanner, B., Hellström, G., Spitler, J. & Gehlin, S. (2005). Thermal Response Test - Current Status and World-Wide Application. *Proceedings World Geothermal Congress April 24–29, 2005 Antalya, Turkey*.
- Schmidt, T., Mangold, D. & Müller-Steinhagen, H. (2003). Central solar heating plants with seasonal storage in Germany. *Elsevier. Solar Energy*, 76 (1-3): 165-174.
- Selfors, A., Ramm, B., Rognerud, I., Thorsen, K. & Bølling, J. K. (2011). *Veileder i utforming av konsesjonssøknad for fjernvarmeanlegg*. Bølling, J. K. (red.). Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R. & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (2): 318-345.
- Skogsberg, K. & Nordell, B. (2001). The Sundsvall hospital snow storage. *Elsevier. Cold Regions Science and Technology*, 32 (1): 63-70.
- Skogsberg, K. (2005). *Seasonal Snow Storage for Space and Process Cooling*. Doctoral thesis: Luleå University of Technology, Sweden, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Skogsberg, K. & Nordell, B. (2006). *Snow cooling in Sweden*. International Conference on Thermal Energy Storage, New Jersey, s. 7: Richard Stockton College of New Jersey.
- SSB. (2014). *Fjernvarmestatistikk*: Statistisk sentralbyrå. Tilgjengelig fra: <http://www.ssb.no/energi-og-industri/statistikker/fjernvarme> (lest 10.03.2015).
- Stene, J., Midttømme, K., Skarphagen, H. & Borgens, B. G. (2008). *Design and operation of ground-source heat pump systems for heating and cooling of non-residential building*. 9th International Energy Agency Heat Pump Conference 2008: SINTEF.
- Tollan, A. (2012). *Grunnvann*. Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/grunnvann>.
- Weber, R. & Dorer, V. (2008). Long-term heat storage with NaHO. *Vacuum*, 82 (7): 708-716.
- Wu, M., Xu, C. & He, Y.-L. (2014). Dynamic thermal performance analysis of a molten-salt packed-bed thermal energy storage system using PCM capsules. *Applied Energy*, 121: 184-195.
- Xu, J., Wang, R. Z. & Li, Y. (2014). A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. *Solar Energy*, 103: 610-638.
- Yan, T., Wang, R. Z., Li, T. X., Wang, L. W. & Fred, T. I. (2015). A review of promising candidate reactions for chemical heat storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43: 13-31.

- Yang, Z. & Garimella, S. V. (2010). Thermal analysis of solar thermal energy storage in molten-salt thermocline. *Solar Energy*, 84 (6): 974-985.
- Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, F. L. & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23 (3): 251-283.
- Zhou, D., Zhou, C. Y. & Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92: 593-605.
- Zizzo, R. (2009). *Designing an Optimal Urban Community Mix for an Aquifer Thermal Energy Storage System*. Master thesis: University of Toronto, Canada.
- Zondag, H., Kikkert, B., Smeding, S., Boer, d. R. & Bakker, M. (2013). Prototype thermochemical heat storage with open reactor system. *Applied Energy*, 109: 360-365.
- Zondag, H. A., Kalbasenka, A., Essen, M. v., Bleijendaal, L., Schuitema, R., Helden, W. v. & Krosse, L. (2009). First studies in reactor concepts for Thermochemical Storage. Tilgjengelig fra: <ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/report/2009/m09008.pdf> (lest 07.04.2015).
- Öztürk, H. H. (2005). Experimental evaluation of energy and exergy efficiency of a seasonal latent heat storage system for greenhouse heating. *Energy Conversion and Management*, 46 (9-10): 1523-1542.
- Aanesen, T. & Fedoryshyn, N. (2014). Fjernvarme og fjernkjøling i Norge. Utvikling i sentral størrelser: Statistisk Sentralbyrå.



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no