



# **Termisk energilagring som uppvärmningsmetod i byggnader: en metaanalys av forskningen**

Anders Westerlund

Examensarbete  
Distribuerade energisystem  
2018

EXAMENSARBETE	
Arcada	
Utbildningsprogram:	Distribuerade energisystem
Identifikationsnummer:	
Författare:	Anders Westerlund
Arbetets namn:	Termisk energilagring som uppvärmningsmetod i byggnader: en metaanalys av forskningen
Handledare (Arcada):	Kim Skön
Uppdragsgivare:	Kim Skön
<p>Sammandrag:</p> <p>Detta examensarbete är en metaanalys på forskning kring termisk energilagring och hur denna teknologi kan implementeras i boendelösningar. Några forskningsexperiment där termisk energilagring utnyttjas kommer behandlas. I arbetet går även igenom vad termisk energilagring är och hur det fungerar. Termisk energilagring är en värmelagringsmetod, som kan utnyttjas för att lagra värme under längre tidsperioder tills behov att använda värmen uppstår. Termiska energilagringssystem kan integreras med solfångarsystem, jordvärmesystem eller andra förnybara energikällor. Termisk energilagring delas in i tre kategorier: sensibel, latent och termokemisk värmelagring. Sensibel värmelagring använder sensibel värme som lagringsmetod och utnyttjas effektivt i kraftverk eftersom denna typ av värmelagring ger optimal verkningsgrad i höga temperaturer, men lämpar sig därför dåligt för boendelösningar. Latent och termokemisk värmelagring använder latent värme respektive kemisk värme som lagringsmetod och anses ha en stor framtidspotential, men forskningen kring deras tillämpning i boendelösningar är bristfällig i dagens läge. På basen av slutsatser från modern forskning kring termisk energilagring kan det konstateras, att det finns stora behov för fortsatt forskning. I dag är de största hindren för kommersialiseringen av termisk energilagring att man inte ännu vet vilka ämnen som är optimala i latent och termokemiska system och att de bäst fungerande lösningarna är för dyra.</p>	
Nyckelord:	Termisk energilagring, värmelagring
Sidantal:	29
Språk:	Svenska
Datum för godkännande:	

DEGREE THESIS	
Arcada	
Degree Programme:	Distributed Energy Systems
Identification number:	
Author:	Anders Westerlund
Title:	Thermal energy storage as a heating method in buildings: a meta-analysis of existing research
Supervisor (Arcada):	Kim Skön
Commissioned:	Kim Skön
<p>Abstract:</p> <p>This work is a meta-analysis of research regarding thermal energy storage and how thich technology can be implemented in housing solutions. Some research experiments involving the implementation of thermal energy storage in housing solutions will be reviewed. Questions regarding what thermal energy storage is and how it works will be discussed in this paper. Thermal energy storage is a heat storage method, which can be used to store heat for extended periods of time, until a need to use the stored heat arises. Thermal energy storage systems can be integrated with solar collectors, ground heat systems or other renewable energy sources. Thermal energy storage can be divided in three categories: sensible, latent and thermochemical heat storage. Sensible heat storage uses sensible heat as its storage method and is effectively utilized in power plants, because this type of heat storage reaches optimal efficiency levels in high temperatures, but is poorly implemented in housing solutions. Latent and thermochemical heat storage use latent and thermochemical heat as their respective storage methods and are regarded as having a great deal of future potential, although research related to their implementation in housing solutions is limited as of today. Based on conclusions from modern research regarding thermal energy storage, it seems apparent that there exists a great need for continued research in the field. The current, biggest obstructions for the commercialization of thermal energy storage, are that there is no certainty regarding what materials to use in latent and thermochemical systems and the best solutions are too expensive.</p>	
Keywords:	Thermal energy storage, heat storage
Number of pages:	29
Language:	Swedish

Date of acceptance:	
OPINNÄYTE	
Arcada	
Koulutusohjelma:	Hajautetut Energijärjestelmät
Tunnistenumero:	
Tekijä:	Anders Westerlund
Työn nimi:	Lämpöenergiavarastointi lämmitysmenetelmänä taloissa: meta-analyysi tutkimusaineistosta
Työn ohjaaja (Arcada):	Kim Skön
Toimeksiantaja:	Kim Skön
<p>Tiivistelmä:</p> <p>Tämä työ on meta-analyysi tutkimusaineistosta liittyen lämpöenergiavarastointiin ja sen soveltamiseen asuinratkaisuihin. Muutama koetutkimus lämpöenergiavarastoinnin soveltamisesta asuinratkaisuihin tullaan käsittelemään. Kysymyksiä siitä mitä lämpöenergiavarastointi on ja miten se toimii käytännössä ja teoriassa nostetaan esiin tässä paperissa. Lämpöenergiavarastointi on lämpövarastointimenetelmä jolla voidaan varastoida lämpöä pitkällä aikavälillä, kunnes lämmön käyttämiselle tulee tarvetta. Lämpöenergiavarastointijärjestelmä voidaan integroida aurinkolämpökeräimien, maalämmön tai jonkin muun uusiutuvan energilähteen kanssa. Lämpöenergiavarastointi voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: tuntuva, latentti ja kemiallinen lämpövarastointi. Tuntuvan lämmön varastointia käytetään tehokkaasti voimalaitoksissa, koska tämän tyyppinen lämpöenergiavarastointi saavuttaa optimaalisen suorituskyvyn korkeissa lämpötiloissa, mutta soveltuu tämän takia heikommin asuinratkaisuihin. Latentin ja kemiallisen lämmön varastoinnilla nähdään suurta tulevaisuudenpotentiaalia talojen lämmityksessä, vaikka nykypäivän tutkimusaineisto on puutteellinen. Uusien tutkimustulosten valossa vaikuttaa selvältä, että lisätutkimuksille on suurta tarvetta ja kysyntää. Lämpöenergiavarastoinnin kaupallistamista estää epävarmuus siitä, että mitkä aineet soveltuvat parhaiten latentteihin ja kemiallisiin lämpöenergiavarastointijärjestelmiin sekä jo toiminnallisten ratkaisujen kalleus.</p>	
Avainsanat:	Lämpöenergiavarastointi, lämmön varastointi
Sivumäärä:	29

Kieli:	Ruotsi
Hyväksymispäivämäärä:	

## INNEHÅLL / CONTENTS

<b>1</b>	<b>DEFINITIONER</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>INLEDNING</b> .....	<b>9</b>
2.1	Bakgrund .....	9
2.2	Syfte .....	10
2.3	Definitioner .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>3</b>	<b>FORSKNINGSMETOD</b> .....	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>ENERGILAGRINGSMETODER</b> .....	<b>10</b>
4.1	Sensibel värmelagring .....	11
4.1.1	<i>Sensibla värmelagringsämnen</i> .....	12
4.2	Termokemisk lagring .....	14
4.2.1	<i>Termokemiska värmelagringsämnen</i> .....	14
4.3	Latent värmelagring .....	16
4.3.1	<i>Latenta värmelagringsämnen</i> .....	17
<b>5</b>	<b>FALLSTUDIER</b> .....	<b>18</b>
5.1	VARTIOSAARI, FINLAND .....	19
5.1.1	<i>Slutsatser</i> .....	20
5.2	NORDAMERIKA.....	21
5.2.1	<i>Slutsatser</i> .....	22
5.3	140 KVM EGNAHEMSHUS MED 30 KWH/KBM VÄRMEBEHOV .....	23
5.3.1	<i>TES-systemets uppbyggnad</i> .....	24
5.3.2	<i>Slutsatser</i> .....	27
<b>6</b>	<b>SLUTSATSER OM TERMISK ENERGIFÖRVARING SOM METOD FÖR UPPVÄRMNING AV BYGGNADER</b> .....	<b>28</b>
	<b>Källor / References</b> .....	<b>30</b>

## **FÖRORD**

Jag vill tacka Arcada och speciellt lektor Kim Skön för det stöd som jag fått i samband med detta slutarbete. Kim Skön hjälpte mig forma idén för detta slutarbete och har överlag varit väldigt hjälpsam och flexibel genom hela slutarbetsprocessen.

Helsingfors, 12.12.2018

Anders Westerlund

# 1 DEFINITIONER

TES = Thermal Energy Storage (sv. Termisk energilagring)

Specifik värmekapacitet = Anger hur mycket energi som ska tillföras 1 kg av en substans för att höja dess temperatur med en grad Celsius (eller Kelvin).

Viskositet = Hur trögflytande en vätska är

Operationstemperatur = Den temperatur under vilken ett system är operativt

Reversibel = omvändbar

Absorptionsprocess = Den kemiska processen då ett ämne absorberar (eller löser sig med) ett annat ämne och skapar ett nytt ämne

Adsorptionsprocess = Den kemiska processen då ett ämne, som är i gas- eller vätskeform fastnar på ytan av ett fast material eller vätska

Värmekonduktivitet = Värmeledningsförmåga

Energisjälvständighet = Graden till vilken ett uppvärmningssystem är självförsörjande. Ett uppvärmningssystem med mindre än 100 % energisjälvständighet hamnar ta värme från andra källor och kan inte med andra ord stå ensam för det totala uppvärmningsbehovet i ett givet fall

Nollenergihus = Ett hus som är byggt så energieffektivt att den har ett maximalt, årligt medeluppvärmningsbehov på 47 kWh per kvadratmeter.

SunZED = Står för “Sun Zero Energy District”. Används för boendekområden där alla hus är nollenergihus med hjälp av utnyttjandet av solenergi.

## 2 INLEDNING

Gröna och förnybara energilösningar har en allt större betydelse för den globala världen. Förutom att fossila bränslen finns i begränsade mängder har man börjat inse de ekologiska och därifrån uppstående ekonomiska och humanitära katastrofer, som användningen av fossila bränslen leder till. Samtidigt ökar det globala energibehovet, vilket leder till den onekliga slutsatsen, att vår användning av fossila bränslen måste kompenseras med alternativa energikällor. (Li & Zheng, 2016)

Enligt Lizana et al. (2017a) orsakar byggnader 60-70 % av världens uppvärmnings- och nedkylningsbehov vilket gör det lätt att se hur denna sektors skulle ha nytta av förnybara uppvärmningslösningar. En potentiell, förnybar lösning är termisk energilagring. Med termisk energilagring är det möjligt att lagra värme under längre tidsperioder och använda värmen vid ett senare skede då den behövs. Värmen överförs till lagringsenheten under varma tidsperioder då det finns ett överskott på värme.

Förutom att termisk energilagring kan utnyttja förnybara energikällor är denna uppvärmningsmetod inte kopplad till elnätet, vilket Li och Zheng (2016) ser som en annan fördel eftersom många periodiskt förekommande förnybara energikällor skapar lätt störningar i elnätverket. Trots fördelarna med att ha termisk energilagring, finns det ännu många osvarade frågor kring teknologin. Forskningen kring termisk lagring är ännu i ett tidigt stadium och man vet inte ännu med säkerhet i vilken form termisk energilagring kommer utnyttjas i boendelösningar framtiden. Det som dock är säkert, är att det finns stort kommersiellt intresse för denna typ av lagringsteknologi. (Lizana et al. 2017b)

### 2.1 Bakgrund

Kortfattat är termisk energilagring ett sätt att lagra värme under längre tidsperioder. Termiska energilagringssystem delas in i sensibla, latent och termokemiska system som lagrar energi med hjälp av olika fysikaliska och kemiska egenskaper hos ämnen. Termiska lagringsenheter är normalt en integrerad del av ett solfångar- eller jordvärmesystem. Värmen kan i princip produceras med vilken energikälla som helst, men det vore

olönsamt att använda fossila bränslen eftersom de kan lagras i sin oförbrända form tills den stund då uppvärmningsbehovet uppstår. Grundtanken med termisk energilagring är att lagra värme från varma årstider som sedan används under kalla säsonger. (Lizana et al. 2017a)

## **2.2 Syfte**

Syftet med detta slutarbete är att analysera den senaste forskningen av TES-system och hur denna teknologi kan implementeras i boendelösningar. Slutarbetet undersöker även ifall det är teoretiskt möjligt och ekonomiskt realistiskt enligt modern forskning, att använda TES-system för att ansvara helt och hållet för ett boendes årliga uppvärmningsbehov. Med uppvärmningsbehov avses både uppvärmning av boendetrymmen samt de varmvattenbehov som existerar i normala hushåll.

## **3 FORSKNINGSMETOD**

Detta slutarbete grundar sig på en meta-analys av den mest prominenta forskningen om implementeringen av TES-system som en förnybar energilösning till boenden och boendedistrikt. Slutarbetets fokus är huvudsakligen på uppvärmning av byggnader, medan nedkylning behandlas endast inom kontexten av hur spillvärme från nedkylning kan återanvändas för uppvärmning. Inför slutarbetet har ett dussintal vetenskapliga artiklar analyserats och endast de relevanta källorna med tanke på TES-system i boendeapplikationer valts.

## **4 ENERGILAGRINGSMETODER**

Termisk energiförvaring kan förverkligas på flera sätt. Beroende på vilka material, aggregationstillstånd på använda material, temperaturer osv. man använder, varierar även energiförvaringsmetoden. Den optimala energiförvaringsmetoden och använda material, bestäms av många faktorer. De avgörande faktorerna brukar vara, att de använda

materialerna motsvarar de termofysiska krav som miljön och uppvärmningsobjektet sätter. Det finns även stora kostnadsskillnader i de material som lämpar sig för termisk energiförvaring, varför den ekonomiska aspekten även påverkar slutliga val. Slutliga materialval bestäms av vilken energiförvaringsmetod man väljer. Generellt sett finns det tre grundläggande metoder att förverkliga termisk energiförvaring med – latent, sensibel och termokemisk värmelagring.

#### 4.1 Sensibel värmelagring

Sensibel värmelagring kan anses vara den mest traditionella energilagringssättet. Sensibel värmelagring förekommer naturligt överallt i universum och handlar kortfattat om att värme lagras i ett material, som inte ändrar aggregationstillstånd. När det kommer till TES-teknologi används sensibel värmelagring främst för kraftverk i dagens läge. (Li & Zheng, 2016) Materialdensitet och volym spelar en stor roll i implementeringen av ett sensibelt värmelagringssystem. (Alva, Lin, Fang, 2017) (Lizana et al. 2017b)

Den grundläggande formeln för sensibel värmelagring ser ut så här:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Från formeln kan man se, att den totala energimängden,  $Q$ , som lagras i ett material bestäms av produkten av materialets massa,  $m$ , specifika värmekapacitet,  $C_p$  och temperaturförändringen i materialet,  $\Delta T$ . Specifik värmekapacitet varierar beroende på vilket material och aggregationstillstånd det är frågan om.

Sensibel värmelagring har både fördelar och nackdelar. De material som används i sensibel värmelagring är med vissa undantag billiga och har bra termisk stabilitet i höga operationstemperaturer. Största nackdelen är att de använda materialen är relativt instabila vid värmeöverföringsfasen, vilket leder till att värmeledningsförmågan försämras desto mera temperaturen i materialet sjunker. Detta till trots anses sensibel värmelagring vara överlag den lämpligaste värmelagringssättet för TES-system i

dagens läge, men endast då systemet opererar i höga temperaturer. (Alva, Lin, Fang, 2017) (Lizana et al. 2017b)

#### **4.1.1 Sensibla värmelagringsämnen**

Eftersom sensibel värmelagring är termodynamiskt sett en väldigt simpel process att åstadkomma, är det föga överraskande, att de ämnen som kan användas i ett sensibelt värmelagringssystem är otaliga. Vanligaste värmelagringsämnen är vatten, termiska oljor, flytande salter, flytande metaller, diverse jordmaterial och betong. (Alva, Lin, Fang, 2017)

Vatten är praktiskt att använda i termiska energiförvaringssystem, eftersom vatten lämpar sig både för värmelagring och värmeöverföring. Vatten är billigt, inte giftigt, lätt att få tag på och har relativt hög specifik värmekapacitet. Vatten kan utnyttjas i termiska energiförvaringssystem i alla dess aggregationstillstånd varför det är också flexibelt att använda. Vatten i fast form (is) är effektivt för nedkylning, medan vatten i flytande form lämpar sig bra för uppvärmning av t.ex. hushåll. Ånga används främst i kraftverk då det är frågan om att lagra större energimängder tillfälligt. Vatten är dock inte problemfritt eftersom det är korrosivt och vattenånga har höga tryckvärden, vilket kräver specialiserade lagringsenheter. (Alva, Lin, Fang, 2017) (Lizana et al. 2017b)

Termiska oljor används främst i kraftverk och finns i både organiska och icke-organiska varianter. Termiska oljor hålls i vätsketillstånd i mycket högre temperaturer än vatten (till och med 250 °C i normalt, atmosfärsikt tryck) och kan användas i allt mellan 12 och 400 °C. Termiska oljor har även mycket lägre ångtryck än vatten. Nackdelarna med termiska oljor är att de är dyrare än vatten och degraderar bl.a. som en följd av oxidering med tiden. Detta betyder att oljan måste bytas med regelbundna intervall. Termiska oljor har även sämre värmeöverförings- och lagringsegenskaper än vatten. (Alva, Lin, Fang, 2017) (Lizana et al. 2017b)

Flytande salter används i dagens läge främst i kraftverk. Orsaken till detta är att flytande salter kan utnyttjas stabilt i mycket höga temperaturer (över 400 Celsius) med operativa temperaturer ända upp till 565 Celsius. Flytande salter har även en väldigt hög

värmekapacitet och försumbart ångtryck. Utöver detta är flytande salter billiga och generellt inte giftiga, men kräver operationstemperaturer på över 200 Celsius för att hållas i flytande form. Nackdelarna med flytande salter är att de har hög viskositet, vilket gör dem trögflytande och ger dem därmed mediokra värmeöverföringsegenskaper. Flytande salter är även korrosiva. Flytande salter anses ändå ha mycket framtidspotential i boendeapplikationer. (Alva, Lin, Fang, 2017) (Lizana et al. 2017b)

Vissa flytande metaller lämpar sig för termiska energilagringssystem med höga temperaturer. Flytande metaller har en extremt hög kokpunkt och försumbart ångtryck, vilket tillåter stora  $\Delta T$ -värden. Flytande metaller har ypperliga värmelednings- och lagringsegenskaper, men är dyra, korrosiva och i vissa fall brandfarliga. (Alva, Lin, Fang, 2017) (Lizana et al. 2017b)

En del jordmaterial, såsom sten, sand och grus lämpar sig bra för värmelagring av många orsaker. De är billiga, lätta att få tag på, icke-brandfarliga, innehåller inga giftiga komponenter och kan utnyttjas t.ex. i hus för både värmelagring- och överföring. Jordmaterial kan utnyttjas effektivt genom att packa dem i lagringsenheter genom vilka vätskor kan cirkuleras. Ett sådant cirkuleringsystem är billigt att bygga eftersom det inte kräver separata värmeöverföringselement, utan vätskan kan vara i direkt kontakt med jordmaterialet och på det sättet överföra värme. Förutom att ett jordmaterialbaserat värmelagringssystem kan kombineras med vätskor såsom vatten eller diverse termiska oljor, är det även möjligt i vanliga hem att använda luft istället för vätskor i husuppvärmning. (Alva, Lin, Fang, 2017) (Lizana et al. 2017b)

Betong har liknande egenskaper som jordmaterial. Det är billigt, lätt att installera, har bra mekaniska egenskaper och är varken giftigt eller brandfarligt. Betongblock kräver ingen skild lagringsenhet vilket ytterligare sänker på byggnadskostnaderna. Betong har dock mediokra värmeöverförings- och lagringsegenskaper. (Alva, Lin, Fang, 2017) (Lizana et al. 2017b)

## 4.2 Termokemisk lagring

Termokemisk värmelagring utnyttjar kemiska reaktioner, som är reversibla. Kemiska reaktioner kan producera stora mängder värme och ifall reaktionen kan utföras många gånger kan den utnyttjas för uppvärmning och värmelagring. I kemiska TES-system utnyttjas ämnen, som genom en absorptions- eller adsorptionsprocess kan frigöra stora mängder energi. (Alva, Lin, Fang, 2017) (Lizana et al. 2017b)

Kemiska TES-system är tillsvidare i ett experimentellt stadium, eftersom de har ännu många olösta problem. Trots att kemiska TES-system har i teorin det högsta energidensitetspotentialen, är det vanligt att de kemikalier som anses vara lämpliga, degraderar relativt fort. Detta försämrar verkningsgraden på hela processen. Andra problem är höga materialkostnader, samt dåliga värmeöverförings- och massöverföringsegenskaper hos materialen. Detta till trots anses det, att termokemisk värmelagring kan i framtiden bli mer lämplig för TES-system än traditionell sensibel värmelagring. (Alva, Lin, Fang, 2017) (Lizana et al. 2017b)

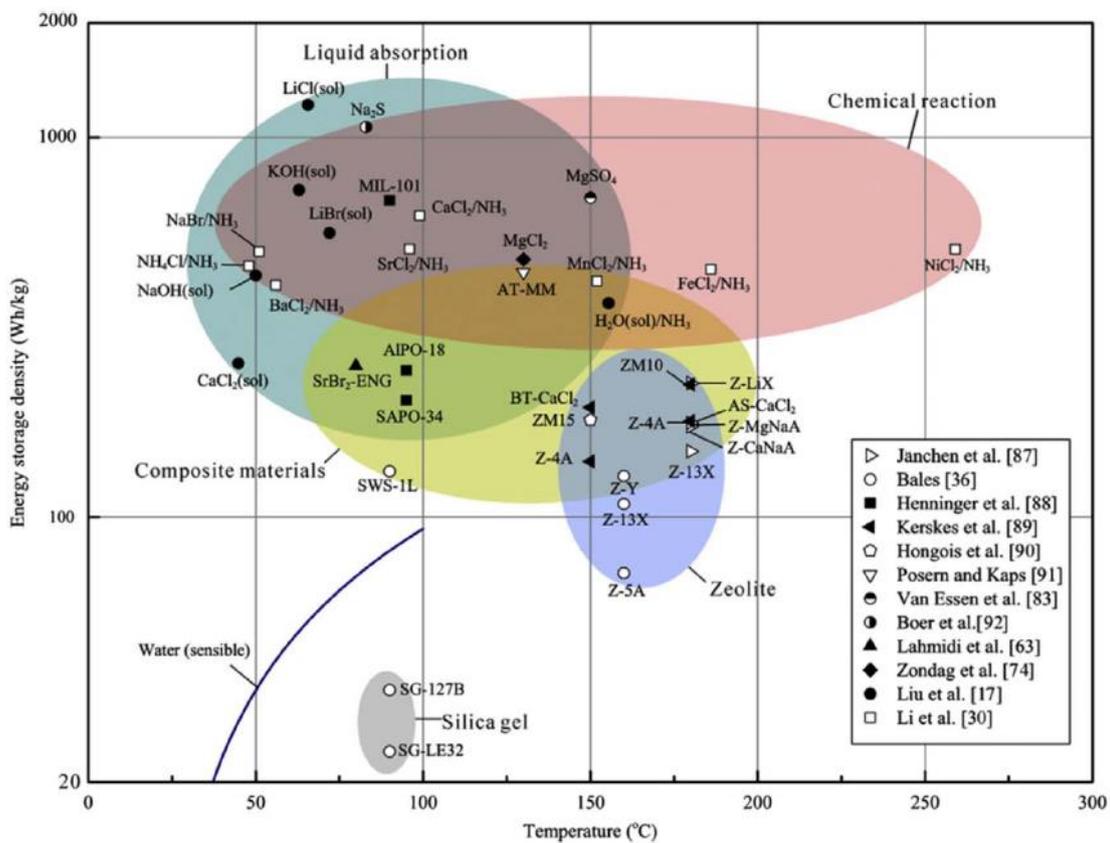
### 4.2.1 Termokemiska värmelagringsämnen

Eftersom termokemisk värmelagring är ännu i ett experimentellt stadium, är man osäker om vad för ämnen som skulle fungera bäst i ett termokemiskt TES-system. (Lizana et al. 2017b) Köll et al. (2017) har utfört ett termokemiskt värmelagringsexperiment (behandlas i större utsträckning i kapitel 4.3) med vatten och zeolit, som gav lovande resultat, men utöver detta verkar det inte på basis av utförd meta-analys inför detta slutarbete, finnas andra experiment med termokemisk värmelagring, som skulle ha nått lika bra resultat. Förutom olika kombinationer av vatten, luft och zeolit, har man även undersökt olika typer av flytande salter, kompositer, sulfater, klorider och metalloxider. (Lizana et al. 2017b)

Zeoliter och kiseldioxider har testats i många olika experiment, men endast zeolit verkar ha mycket framtidspotential inom TES-system. Kiseldioxider har märkbart sämre absorptionsegenskaper, vilket gör dem ineffektiva på tanke på värmelagring. Zeoliter har i motsats hög vattenabsorptionsförmåga, vilket ger dem hög energidensitet och gör dem

därför lämpliga för värmelagring. Zeoliter hör till en speciell grupp av mineraler, som är porösa och har en lerig konsistens. Porösheten gör, att zeoliter kan absorbera effektivt t.ex. vatten. (Lizana et al. 2017b)

Förutom zeolit, verkar flytande salter även ha framtidspotential i TES-system, men ytterligare forskning krävs. Forskning kring sulfater, klorider och metalloxider för TES-system har gett dåliga resultat och anses inte lämpa sig i alla fall för TES-system i boendeapplikationer. (Lizana et al. 2017b)



**Figur 1.** Energidensitet på vanliga ämnen i termokemiska TES-system. Den röda och turkosa sfären indikerar energidensiteten för ämnen när de reagerar kemiskt. Den turkosa sfären är specifikt för ämnen som används i adsorptionssystem. (Lizana et al. 2017a)

### 4.3 Latent värmelagring

När ett ämne ändrar aggregationstillstånd, frigörs eller binds energi i form av värme. Denna energimängd varierar från ämne till ämne och beror till stor del på ämnets ursprungliga aggregationstillstånd och det aggregationstillstånd som ämnet ändrar till. Denna typ av energi kallas latent värme. (Alva, Lin, Fang, 2017) (Lizana et al. 2017b) Formeln för latent energi är följande:

$$Q = mL$$

$Q$  står för den totala mängden energi som frigörs när ett ämne ändrar aggregationstillstånd,  $m$  för ämnets massa och  $L$  för ämnets specifika latent värme.

Vanligast i TES-system är att utnyttja latent värme, som uppstår då ett ämne ändras från flytande till fast form. Det är även möjligt, att samla latent värme utan att ändra på ett ämnes aggregationstillstånd. Ämnen, som avger latent värme utan att ändra aggregationstillstånd, är alltid i fast form. I dessa fall handlar det om att ämnet frigör latent värme då det ändrar sig t.ex. från en kristallin struktur till en annan. Exempel på sådana ämnen är olika paraffiner, vissa metaller och salhydrater. Fördelen med att samla latent värme utan att ändra på aggregationstillstånd är att ämnet i fråga inte kräver lika dyr isolering och risken för läckage finns inte. Problemet med denna process är att det inte skapas lika mycket latent värme som då när man ändrar på ett ämnes aggregationstillstånd. (Alva, Lin, Fang, 2017) (Lizana et al. 2017b)

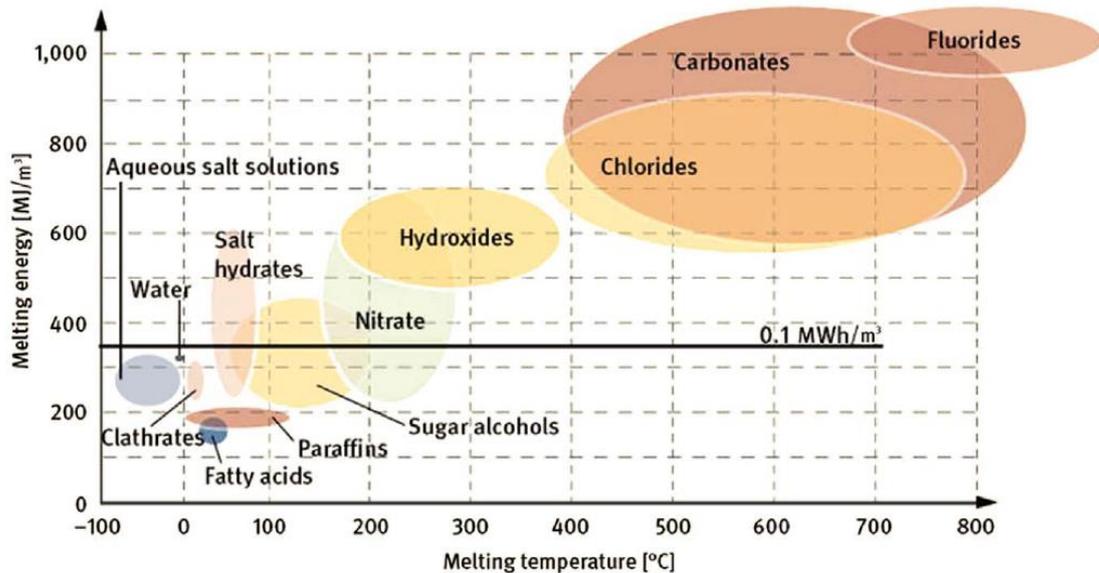
Latenta TES-system har precis som andra system både för- och nackdelar. Fördelarna med latent TES-system är att de ämnen, som används är relativt billiga och vanligen inte giftiga. Största problemet med produktion av latent värme är volymkravet. Latent värmeproduktion kräver 50-100 gånger mera volym än sensibel värmeproduktion för att nå liknande energimängd. Ett annat problem är att de ämnen som lämpar sig för latent TES-system har låg värmeledningsförmåga. Trots att de flesta ämnen i latent TES-system inte är giftiga, är en del av dem eldfarliga. Vissa ämnen är dessutom frätande,

medan andra reagerar med plast. Detta försvårar transport och lagring av bl.a. fettsyror, paraffiner och estrar. (Alva, Lin, Fang, 2017) (Lizana et al. 2017b)

#### **4.3.1 Latenta värmelagringsämnen**

I latent värmelagring system kan man utnyttja både organiska och icke-organiska ämnen. Det är vanligt för fasta organiska ämnen att smälta kring 18 – 30 Celciusgrader, vilket gör dessa ämnen lätta att hantera. Organiska ämnen är dessutom sällan giftiga, frätande eller dyra, vilket gör dem den mest utnyttjade ämnesgruppen i latent TES-system. Av alla organiska material som utnyttjas i dessa system är parafin det vanligaste. En vanlig form av parafin i dessa TES-system är en biprodukt från oljeraffinering. Denna typ av parafin smälter vid 28 Celsiusgrader och är väldigt billig. Parafin är luktfritt och kemiskt stabilt, varför den är ypperlig för värmeproduktion och -förvaring. Andra organiska ämnen, som utnyttjas i latent TES-system är fettsyror, estrar, alkoholer och glykoler. (Alva, Lin, Fang, 2017) (Lizana et al. 2017b)

Icke-organiska ämnen tillämpas då man vill uppnå högre temperaturer och operera inom större temperaturskillnader. Detta betyder, att man kan lagra och producera större energimängder. Icke-organiska ämnen används huvudsakligen då det är frågan om massiva energibehov, t.ex. i kraftverk eller stora industrikomplex. (Alva, Lin, Fang, 2017) (Lizana et al. 2017b)



**Figur 2.** Tabell på smältpunkter och mängden energi som krävs för att sådana ämnen, som utnyttjas i latent TES-system, skall smälta. En lägre smältpunkt betyder att man behöver mindre energi för att smälta materialet, men detta korrelerar samtidigt med den mängd latent energi som ämnet kan frigöra. På grund av detta experimenterar man mycket med paraffiner, men stöter samtidigt på problem med att lagra tillräcklig mängd energi utan att lagringsvolymen är för stor. (Lizana et al. 2017a)

## 5 FALLSTUDIER

TES-system finns redan i bruk i olika delar av världen i enskilda hushåll. TES-system har även undersökts och utnyttjats i bostadsområden, bl.a. i Vartiosaari i Finland, Skandinavien och i Nordamerika. Forskningen inom området ger väldigt varierande resultat och helhetsbilden av TES-system i distriktlösningar är relativt bristfällig. Den mest heltäckande forskningen om implementeringen av TES-system i boenden, har gjorts i samband med distriktprojektet i Vartiosaari, men även i detta fall är forskningsresultaten teoretiska. Det finns inte mycket internationell forskning om Marstal i Danmark, men vissa siffror (Xu, Wang, Li, 2013) indikerar på att Marstal skulle producera ungefär 30% av sitt årliga värmebehov med hjälp av solfångare och integrerade TES-system.

## 5.1 VARTIOSAARI, FINLAND

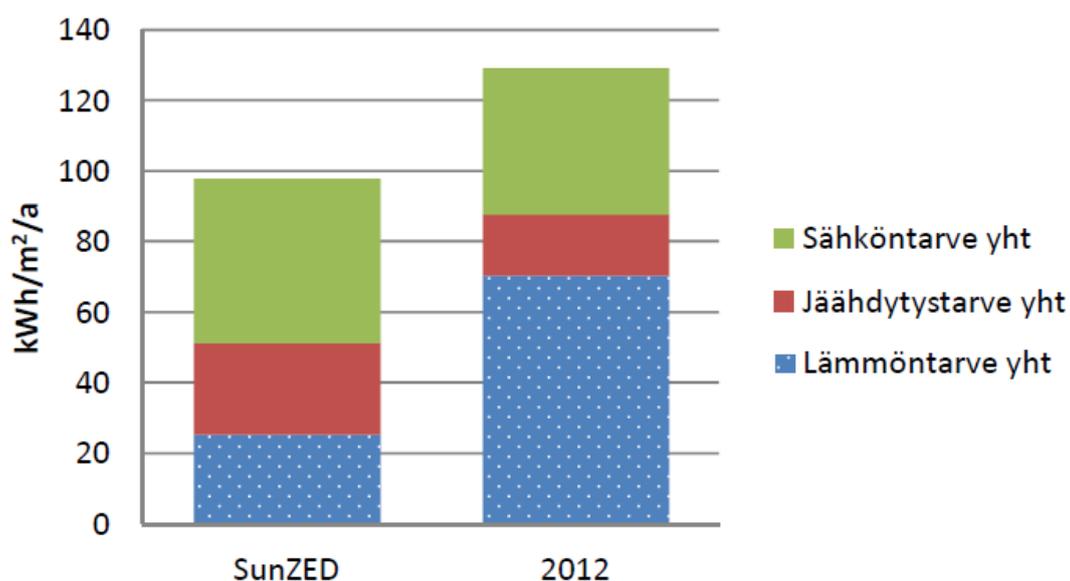
Vartiosaari är ett 82 hektar stort område i östra Helsingfors. Området planeras för 5000 – 7000 invånare och är ännu i byggnadsskede. TES-system är en central del av att göra boendeområdet energisjälvständigt, men även andra energilösningar krävs vid sidan om. De planerade husen byggs energieffektivt och kommer ha ungefär 50% lägre energibehov för uppvärmning än vanliga, moderna hus i Helsingfors. Utöver detta kommer spillovärme från nedkylning under sommaren att införas i fjärrvärmenätverket för återanvändning. Huvudmålet med Vartiosaari är dock att skapa boendelösningar med minimala, skadliga miljöutsläpp – inte energieffektivitet. Särskilt fokus har lagts på koldioxid- och svaveldioxidutsläpp. Detta till trots är energieffektivt byggande en central lösning för att minimera utsläpp, men det vore teoretiskt möjligt att bygga hus som har ännu större energisjälvständighet. Då blir dock materialkostnaderna lätt oralistiska för att kunna implementeras på stora områden. (Paiho et al. 2015) (Paiho, Hoang, Hukkalainen, 2017)



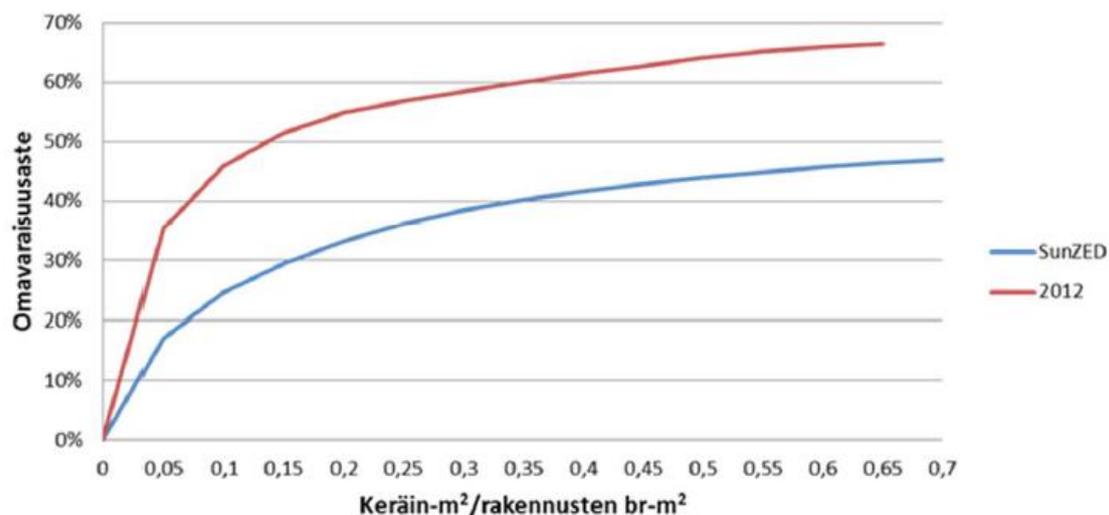
**Figur 3.** Karta och ritning på det planerade boendedistriktet i Vartiosaari. (Paiho et al. 2015)

### 5.1.1 Slutsatser

Det finns redan teoretiska simuleringar på effektiviteten av TES-system i Vartiosaari och resultaten är lovande. I ett scenario med nollenergibyggnader (se SunZED i figur 3) kunde man uppnå 60 % energisjälvständighet genom att lagra solvärme i borrhål. Solvärmens samlades med solfångare och kunde utnyttjas under kalla årstider med jordvärmepumpar. Solfångarna gav från ett energikostnadsperspektiv bästa resultat då de täckte 5% av den area som boendedistriktet kräver. Med de byggnader som för tillfället planeras till Vartiosaari kunde man uppnå 30% energisjälvständighet i uppvärmning. (Paiho et al. 2015) (Paiho, Hoang, Hukkalainen, 2017)



**Figur 4.** Graf på teoretiska värme-, -nedkylnings och elbehov i Vartiosaari. Vänstra stapeln representerar de behov som nollenergihus har, medan den högra stapeln är för vanliga hus, som byggts enligt de byggnadsbestämmelser som kom i kraft i Finland år 2012. (Paiho et al. 2015)



**Figur 5.** Graden av energisjälvständighet, som kan teoretiskt uppnås för byggnaderna i Vartiosaari med solfångare och TES-system, med arealförhållandet mellan solfångare och byggnader som en funktion. Röda linjen är för hus, som är byggda enligt de finska byggnadsbestämmelserna för år 2012. Den blåa linjen är för ett scenario nollenergihus. (Paiho et al. 2015)

	SunZEB	2012	Suhde (SunZEB/2012)
Lämpö (kWh/m <sup>2</sup> /a)	47,0	67,4	0,7
Viilennys (kWh/m <sup>2</sup> /a)	25,9	17,2	1,5
Sähkö (kWh/m <sup>2</sup> /a)	37,6	41,5	0,9

**Figur 6.** Medelvärden på värme-, nedkylnings- och elbehov i finska nollenergihus och hus byggda enligt finska 2012 byggnadsbestämmelser samt, förhållanden i energibehov mellan respektive hustyper. Trots att detta slutarbete inte undersöker rollen av nedkylning i samband med TES-system, är det värt att nämna att nollenergihus har större nedkylningsbehov under varma årstider än vanliga hus. (Paiho et al. 2015)

## 5.2 NORDAMERIKA

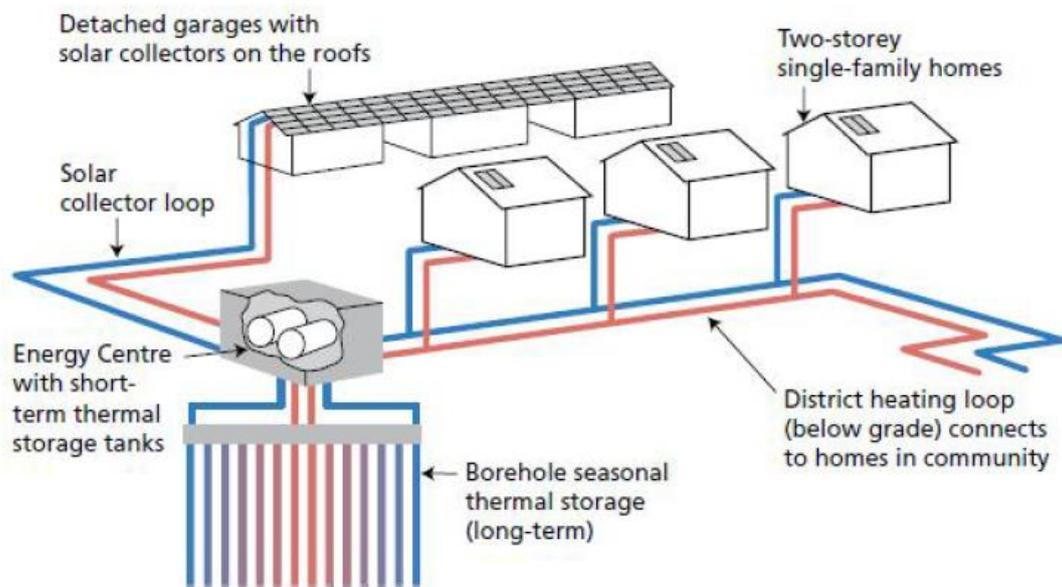
I Nordamerika har man forskat hur bra underjordiska TES-system skulle klara sig på den öppna marknaden från ett rent kostnadsperspektiv i jämförelse med redan existerande teknologier, däribland fossila uppvärmningsteknologier. Ifall man inte lägger värde på de ekologiska fördelarna i ett TES-system, som opererar i första hand med förnybar energi,

klarar teknologin inte sig ens i de mest fördelaktiga förhållandena mot fossila bränslen. (Reed et al. 2018)

### 5.2.1 Slutsatser

På basen av forskning om bränsleprisutveckling och kostnaderna associerade med byggandet av uppvärmningssystem, som opererar med fossila bränslen, borde priserna på implementeringen av underjordiska TES-system sjunka med 28% i optimala förhållanden på den nordamerikanska marknaden. I de mest krävande klimatförhållandena borde priset på underjordiska TES-system sjunka med ungefär 65%. (Reed et al. 2018)

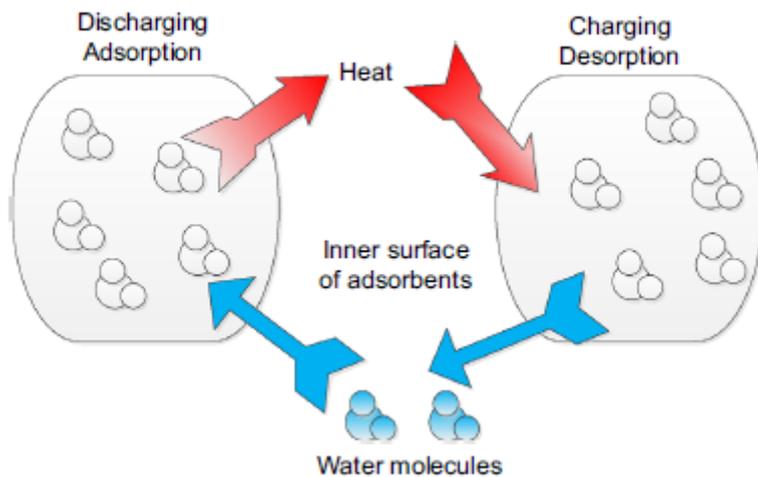
Dessa kalkyleringar baserar sig i huvudsak på ett projekt med namnet “Drake Landing”, som var det första nordamerikanska forskningsprojektet med målet att undersöka lämpligheten av underjordiska TES-system i distriktboenden. Detta betyder, att ovannämnda beräkningar kunde se annorlunda ut ifall det fanns mera referensmaterial om implementeringen av underjordiska TES-system. Det är även värt att nämna att ifall optimala förhållanden kräver en prissänkning på 28%, är man inte väldigt långt ifrån att teknologin skulle vara ekonomiskt realistisk ifall man värderar den ekologiska aspekten. (Reed et al. 2018)



**Figur 7.** Ungefärlig ritning på TES-systemet med integrerat solfångarsystem som användes i forskningsprojektet Drake Landing. (Paiho et al. 2015)

### 5.3 140 KVM EGNÄHEMSHUS MED 30 KWH/KBM VÄRMEBEHOV

Ett simuleringsexperiment där Köll et al. (2017) undersökte möjligheterna att täcka uppvärmningsbehoven av rum och varmvatten för ett egnahemshus på 140 kvm med termokemisk TES och solfångare har gett lovande resultat. Experimentet utfördes på en 1:3 storleksskala med antagandet att det totala värmebehovet (uppvärmning av rum samt varmvatten) för huset är 30 kWh per kubikmeter under testperioden. Under simuleringen applicerades samma klimatförhållanden, som förekommer i Gleisdorf, Österrike. Solvärme samlades under sommaren och lagrades i enheter bestående av zeolit och vatten. Testperioden räckte från början av oktober till slutet av januari.



**Figur 8.** Grundläggande principen för adsorptionsprocessen i TES-system med zeolit och vatten. Som man ser på figuren, är det frågan om en cyklisk process där värme frigörs då vatten adsorberas till zeolit, medan värme får vattnet att frigöras (desorption) så att det kan utnyttjas på nytt för adsorption. (Li & Zheng, 2016)

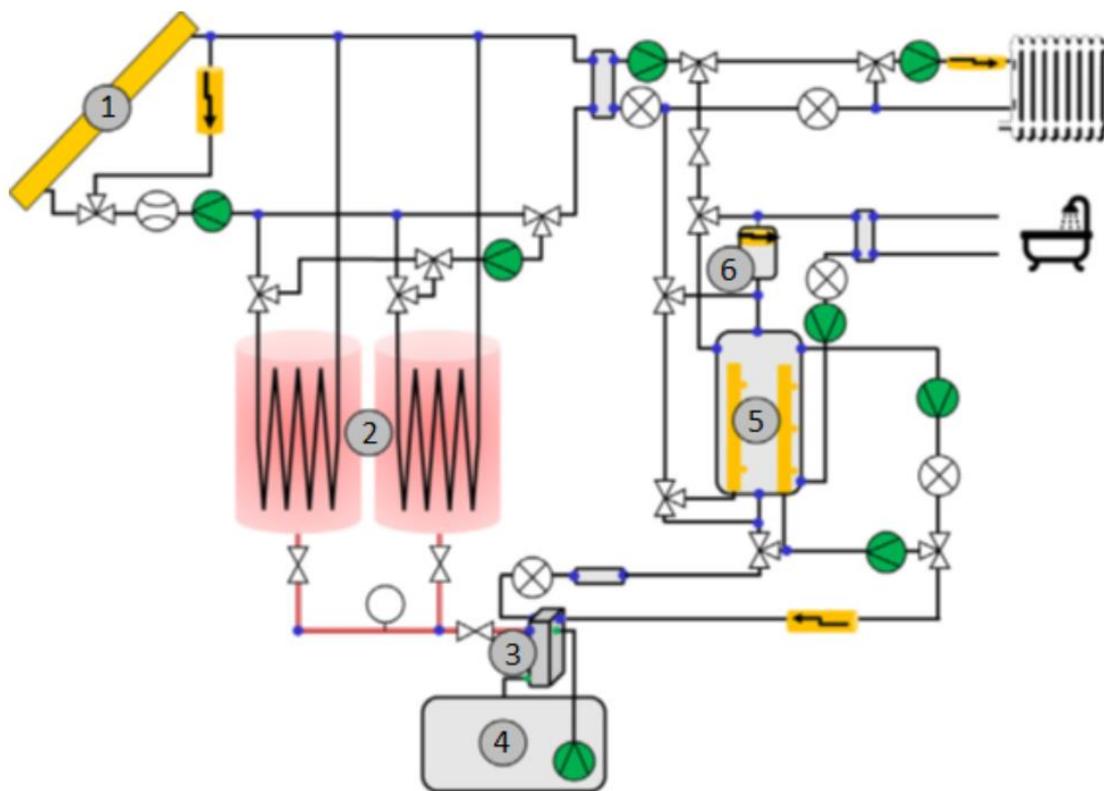
Detta låter som ett realistiskt värmebehov för finska boendeförhållanden. Enligt VTT:s rapport (Paiho et al. 2015) för det planerade, energieffektiva boendedistriktet i Vartiosaari är det årliga värmebehovet för ett nollenergihus 47 kWh per kvadratmeter och 67,4 kWh per kvadratmeter för boenden, som byggts enligt de allmänna bestämmelser, som kom i kraft år 2012 i Finland. När man beaktar att experimentet för egnahemshuset talar om värmebehov per kubikmeter och att medelhöjden från tak till golv i ett finskt hem är 2,6 meter. (G1 Suomen rakentamismääräyskokoelma, 2004), inser man att experimentet skulle betyda i finska omständigheter att man räknat med ett värmebehov på ungefär 80 kWh per kvadratmeter. (Köll et al. 2017)

### 5.3.1 TES-systemets uppbyggnad

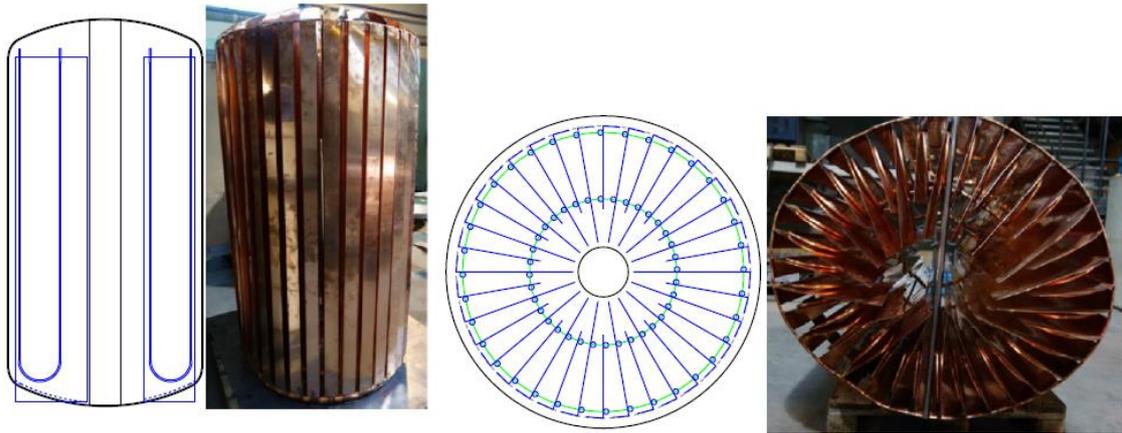
I det utförda experimentet fanns sex centrala delar. Den första var solfångare med en total värmeupptagningsyta på 12 kvadratmeter (1), vilka fanns på laboratoriehusets tak. Den följande delen var två isolerade, cylindriska värmelagringsenheter (2) – 1 kubikmeter var

och fyllda med zeolit. Den maximala energidensiteten, som kunde nås för värmelagringsenheterna var 178 kWh per kubikmeter. Värmen från solfångarna förs först till zeolitenheterna, varifrån man sedan enligt behov kan överföra värme till systemets värmeväxlare (3) – den tredje delen av systemet. Värmeväxlaren utför nödvändig kondensation och evaporering i systemet. (Köll et al. 2017)

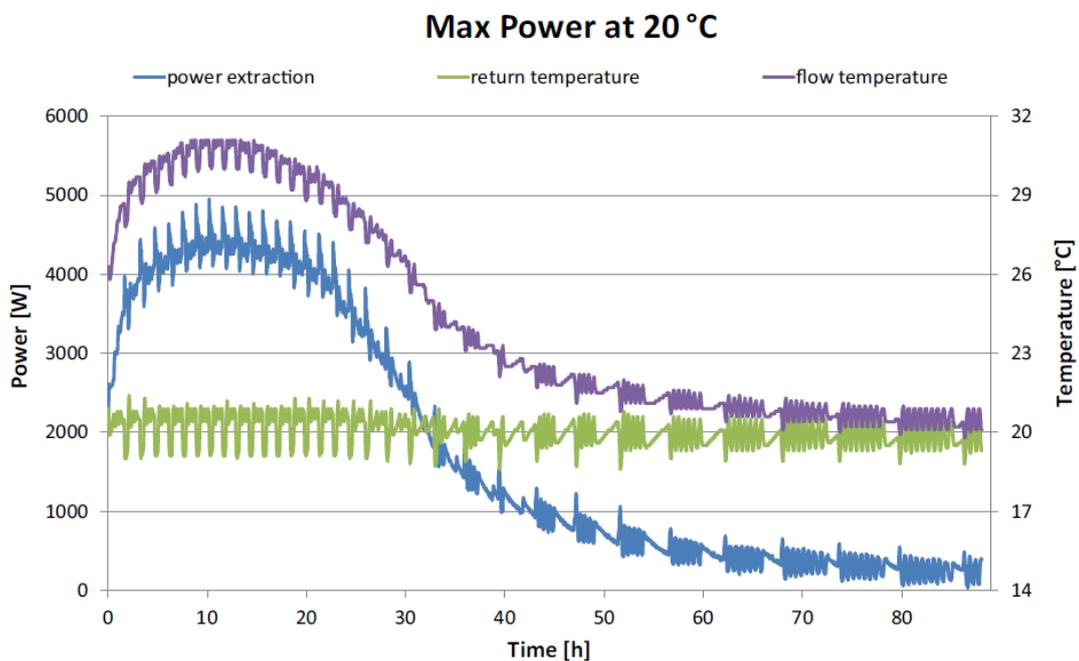
Från värmeväxlaren leds värme vidare till sorptionslagringsenheten (4), som behövs för adsorptionsprocessen i systemet. Härifrån överförs värmen vidare till en 80 liters varmvattenboiler (6) för omedelbara varmvattenbehov och en större stratifierad vattenlagringsenhet (5) på 660 liter. Från den större vattenlagringsenheten tas vatten för evaporeringsprocessen under sommaren. (Köll et al. 2017)



**Figur 9.** Ritning på TES-systemet och dess kopplingar i experimentet. (Köll et al. 2017)



**Figur 10.** Bild och ritning på uppbyggnaden av värmewäxlaren. Genom utnyttjandet av koppar kunde man öka värmeledningsförmågan på den värme som uppstod från adsorptionsprocessen och öka hela systemets verkningsgrad. (Köll et al. 2017)



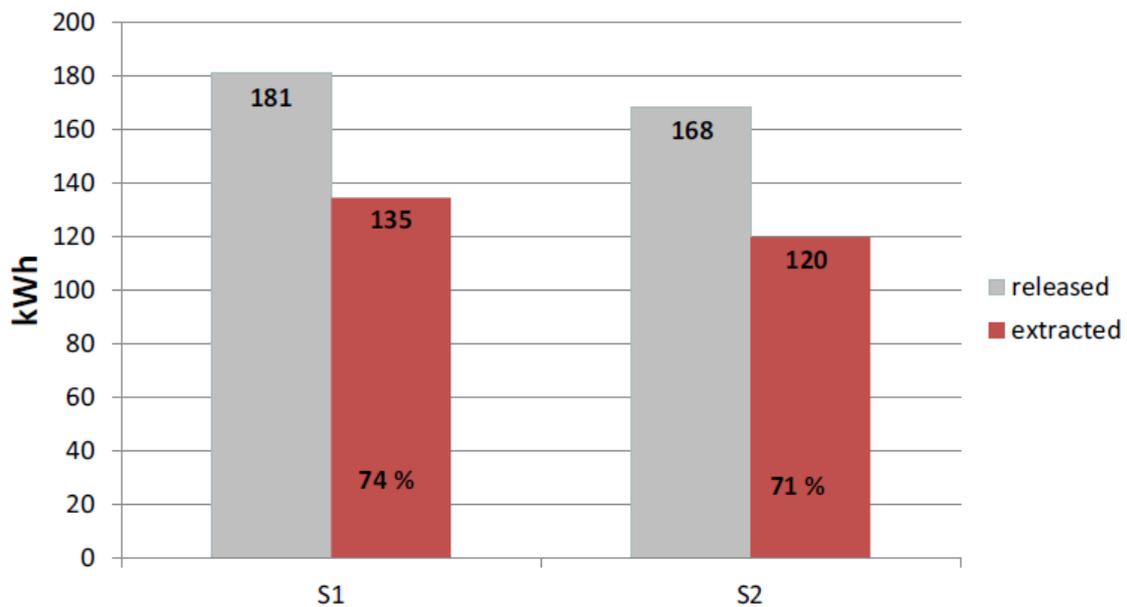
**Figur 11.** Statistik på den maximala energimängden, som kunde utvinnas från adsorptionsprocessen som en funktion av tiden. Den blåa linjen representerar den maximala energin, som kunde utnyttjas för husets värmebehov. Den violetta linjen är den teoretiskt

maximala energimängden i systemet, medan den gröna linjen visar temperaturen på vattnet efter utvinnandet av värme för huset.

### 5.3.2 Slutsatser

Under experimenteringsperioden lyckades man täcka 83,5% av egnahemshusets värmebehov. Den termokemiska värmelagringsenheten hade en energidensitet på 178 kWh per kubikmeter, vilket är tredubbelt vad en sensibel vattenlagringsenhet kan uppnå. (Köll et al. 2017)

Termokemisk lagring visade sig vara ett effektivt sätt att arrangera värmelagringen. Värmeförlusterna i TES-systemet var försumbara, varför man kunde utnyttja väldigt långt all den energi som hade lagrats under sommaren. De största problemen med ett termokemiskt TES-system av den typen som användes i experimentet är de ekonomiska kostnaderna och att utförandet av experimentet i full skala skulle kräva ytterligg optimering. Resultaten från experimentet är lovande, men kostnaderna är ännu i dagens läge orealistiska på tanke av potentiell masskommersialisering. (Köll et al. 2017)



**Figur 12.** De gråa staplarna representerar den mängd energi, som skapades av adsorptionsprocessen i respektive zeolitlagringsenhet. De röda staplarna är den mängd energi, som kunde användas för uppvärmningsbehov. (Köll et al. 2017)

## **6 SLUTSATSER OM TERMISK ENERGIFÖRVARING SOM METOD FÖR UPPVÄRMNING AV BYGGNADER**

På basen av den forskning och de experiment som behandlats i detta slutarbete, kan man konstatera att TES-system har en kapacitet och verkningsgrad, som gör dem relevanta i dagens värld, men att mycket till forskning behövs för att teknologin skall bli självförsörjande och slå ordentligt igenom på hushållsmarknaden. Dagens forskning har stark fokus på TES i kraftverksapplikationer, vilket gör att forskningen kring TES-system för hushåll är bristfällig. Trots att det finns experiment, som lyckats nå en hög verkningsgrad på TES-system i hushåll, är antalet sådana experiment liten och dessa resultat kan inte ännu anses vara generaliserbara. Det råder stor osäkerhet om vilka material, som skulle tillämpa sig för TES-system för hushåll, vilket är det största problemet i dagens läge. Det är även svårt att säga vilken form av TES-teknologi som är bäst för hushåll, men termokemisk och latent TES verkar mest lovande.

TES-system används redan till viss mån i byggnader, men det kommer troligen ännu vara en längre tid orealistiskt att skapa TES-system, som kan ensam ta hand om uppvärmning av hus och varmvatten. I praktiken vore det redan möjligt att ha ett TES-system som tar hand om alla värmebehov för ett hus året runt – det handlar till sist och slut endast om att ha ett TES-system, med tillräcklig värmekapacitet och -mängd för att klara av det. Realistiskt sett är teknologin dock inte tillräckligt kostnadseffektiv i dagens läge för att det skulle löna sig. Framtida forskning kommer sannolikt behandla frågor kring hur man kan göra den redan undersökta teknologin effektivare och billigare, eftersom dessa två aspekter orsakar för tillfället stora problem. Utöver detta, kommer det behövas mycket forskning kring lämpliga material för TES-system, eftersom de material som undersökts hittills är antingen för dyra, har dålig värmeledningsförmåga, degraderar med tiden eller

orsakar önskade, kemiska reaktioner som sänker TES-systemets verkningsgrad och orsakar korrosion.

## KÄLLOR / REFERENCES

Alva, G., Lin, Y., Fang, G. (2017). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 144 (2018), pp. 341-378.

G1 Suomen rakentamismääräyskokoelma 2004, c. 4.1.1. Available at: <https://www.finlex.fi/data/normit/28204-G1su2005.pdf> (Accessed 12.12.2018)

Hailu, G., Hayes, P., Masteller, M. (2017). Seasonal Solar Thermal Energy Sand-Bed Storage in a Region with Extended Freezing Periods: Part I Experimental Investigation. *Energies*. 10 (2017), pp. 1873-1884.

Köll, R. et al. (2017). An experimental investigation of a realistic-scale seasonal solar adsorption storage system for buildings. *Solar Energy*, 155 (2017), pp. 388-397.

Li, G., Zheng, X. (2016). Thermal energy storage system integration forms for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 62 (2016), pp. 736-757.

Lizana, J. et al. (2017a). Advanced low-carbon energy measures based on thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (2018), pp. 3705-3749.

Lizana, J. et al. (2017b). Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: A critical review. *Applied Energy*, 203 (2017), pp. 219-239.

Paiho, S., Hoang, H., Hukkalainen, M. (2017). Energy and emission analyses of solar assisted local energy solutions with seasonal heat storage in a Finnish case district. *Renewable Energy*, 107 (2017), pp. 147-155.

Paiho, S. et al. (2015). Paikallista energiaa asuinalueella. *VTT Technology*. 234 (2015). [Online] Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Available at:

[http://www.otalib.fi/cgi-bin/thw/trip/?%24%7BBASE%7D=vttjure&%24%7BHTML%7D=wwwrecordlistfi&%24%7BOOHTML%7D=wwwrecordlistfi&%24%7BSNHTML%7D=wwwerror&%24%7BTRIPROW%7D=6&%24%7BSAVEHTML%7D=%2Fvtt%2Fjure%2Fwwwjure-fi.html&%24%7BTRIPSHOW%7D=form%3Dwwwrecordsfi&%24%7BMAXHITS%7D=80000&%24%7BCCL%7D=DE+MASK%3D%27\\*%3A%21%2F%27&%24%7BCCL%7D=DEF+SORT+MAX%3D80000&%24%7BCCL%7D=DEF+VIEW+AUT%3DAU%2CAU2&%24%7BSORT%7D=PY+desc%2CED+desc&%24%7BFREETEXT%7D=paikallista+energiaa+asuinalueella](http://www.otalib.fi/cgi-bin/thw/trip/?%24%7BBASE%7D=vttjure&%24%7BHTML%7D=wwwrecordlistfi&%24%7BOOHTML%7D=wwwrecordlistfi&%24%7BSNHTML%7D=wwwerror&%24%7BTRIPROW%7D=6&%24%7BSAVEHTML%7D=%2Fvtt%2Fjure%2Fwwwjure-fi.html&%24%7BTRIPSHOW%7D=form%3Dwwwrecordsfi&%24%7BMAXHITS%7D=80000&%24%7BCCL%7D=DE+MASK%3D%27*%3A%21%2F%27&%24%7BCCL%7D=DEF+SORT+MAX%3D80000&%24%7BCCL%7D=DEF+VIEW+AUT%3DAU%2CAU2&%24%7BSORT%7D=PY+desc%2CED+desc&%24%7BFREETEXT%7D=paikallista+energiaa+asuinalueella) (Accessed 10.12.2018)

Reed, A.L. et al. (2018). Solar district heating with underground thermal energy storage: Pathways to commercial viability in North America. *Renewable Energy*. 126 (2018), pp. 1-13.

Xu, J., Wang, R.Z., Li, Y. (2013). A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. *Solar Energy*. 103 (2014), pp. 610-638.

