



Sandbatteriets potential för energilagring

Oliver Lundström

Lärdomsprov

Energi- och miljöteknik

2024

Lärdomsprov

Oliver Lundström

Sandbatteriets potential för energilagring.

Yrkeshögskolan Arcada: Energi- och miljöteknik, 2024.

Identifikationsnummer:

9333

Uppdragsgivare:

Yrkeshögskolan Arcada

Sammandrag:

Detta arbete behandlar utmaningen med energilagring i Finland, särskilt på grund av Finlands användning av förnybara energikällor och hög energiförbrukning för uppvärmning under kalla årstider. Konceptet med sandbatteriet presenteras som en möjlig lösning, med fokus på det i Kankaanpää utvecklat av Polar Night Energy och Vatajankoski. Sandbatteriet använder sig av sensibel termisk energilagring och består av en stor isolerad behållare fylld med sand. Sandbatteriets fördelar inkluderar dess förmåga att lagra stora mängder energi effektivt vid höga temperaturer, dess enkelhet och låga kostnad samt dess kompatibilitet med förnybara energikällor. Arbetet jämför också sandsbatteriteknik med andra energilagringmetoder som elektrokemiska, mekaniska samt lagring i form av vätgas och beskriver deras för- och nackdelar. Dessutom diskuteras de tekniska aspekterna i form av simuleringar och beräkningar som är relevanta för att bedöma sandsbatteriernas potential för energilagring. Slutligen berörs de praktiska tillämpningarna och de ekonomiska fördelarna med sandsbatteriteknik, inklusive dess potential att optimera energianvändningen och minska kostnaderna samt utsläppen inom olika sektorer.

Nyckelord:

Fjärrvärme, Sandbatteri, Termisk energilagring

Degree Thesis

Oliver Lundström

The sand battery's potential for energy storage

Arcada University of Applied Sciences: Energi- och miljöteknik, 2024.

Identification number:

9333

Commissioned by:

Arcada University of Applied Sciences

Abstract:

This work addresses the challenge of energy storage in Finland, especially due to Finland's use of renewable energy sources and high energy consumption for heating during cold seasons. The concept of the sand battery is presented as a possible solution, focusing on the one developed in Kankaanpää by Polar Night Energy and Vatajankoski. The sand battery uses sensible thermal energy storage and consists of a large, insulated container filled with sand. The advantages of the sand battery include its ability to efficiently store large amounts of energy at high temperatures, its simplicity and low cost, and its compatibility with renewable energy sources. The work also compares sand battery technology with other energy storage methods such as electrochemical, mechanical, and hydrogen energy storage, describing their advantages and disadvantages. In addition, the technical aspects are discussed in the form of simulations and calculations that are relevant for assessing the potential of sand batteries for energy storage. Finally, the practical applications and economic benefits of sand battery technology are discussed, including its potential to optimize energy use and reduce costs and emissions across various sectors.

Keywords:

District heating, Sand battery, Thermal energy storage

Innehåll

1	Introduktion.....	6
1.1	Syfte med forskningen.....	6
1.2	Metodik	6
1.3	Energilagring allmänt.....	7
1.3.1	Elektrokemisk energilagring	7
1.3.2	Mekanisk lagring	7
1.3.3	Vätgas	8
1.3.4	Termisk lagring.....	10
1.4	Sandbatteriet.....	11
2	Befintliga och planerade tekniska lösningar	13
2.1	Kankaanpää	13
2.2	Andra lösningar	15
3	Teoretisk referensram.....	16
3.1	Materialens värmetekniska egenskaper.....	16
3.1.1	Specifik värmekapacitet.....	16
3.1.2	Värmeledning.....	18
3.2	Värmeledning genom vägg	18
3.3	Luftvärmepumpar.....	19
3.4	Direkt el	19
3.5	Elpriser.....	19
4	Fallstudie.....	21
4.1	Energibalanser	21
4.2	Simuleringar	23
4.2.1	Uppvärmning	23
4.2.2	Värmeförlust med tiden	25
4.2.3	Uttagning av energi.....	27
4.2.4	Kombinerat	28
4.3	Jämförelse och slutsatser	29
5	Sammanfattning	31
	Källor	32

1 Introduktion

Energilagring är en utmaning för energibranschen som måste lösas för att vi skall kunna övergå fullständigt till de ojämna och av väderleksförhållandena beroende förnybara energikällorna. I Finland är utmaningen extra stor eftersom energikonsumtionen är som högst under de kalla, mörka tiderna på året. Enligt statistikcentralens uträkningar på slutförbrukningen av energi i Finland 2022 användes cirka 27 % av energin i landet bara för att värma upp byggnader. Värmeenergi spelar alltså en väsentlig roll då det kommer till att minska på behovet av fossila energikällor.

1.1 Syfte med forskningen

Sandbatteriet är en ny innovation som kan vara en effektiv lösning för problemet med förnybara energiproduktionens ojämnheter i Finlands klimat. Syftet med forskningen är att dokumentera befintliga lösningar inklusive för- och nackdelar med olika tekniska lösningar för energilagring samt att simulera energitillförsel till lagret, energiförluster vid lagring och uttag av energi från lagret.

Sandbatteriet i Kankaanpää är en energilagringlösning av företaget Polar Night Energy i samarbete med energibolaget Vatajankoski. Sandbatteriet som togs i bruk 2022 försöker bevisa sandbatteriets relevans och har väckt stor uppmärksamhet både i nationell och internationell media. Den här forskningen använder Kankaanpääs sandbatteri som exempel och modell för simuleringar.

1.2 Metodik

En litteraturstudie gjordes först för att samla information om energilagring i allmänhet samt för att hitta all tillgänglig information om sandbatteriet och dess funktionsprincip. Två olika modeller av sandbatteriet byggdes upp i Comsol Multiphysics och olika situationer simulerades i programmet för att kunna förstå sandbatteriets beteende, samt styrkor och svagheter. Resultaten analyserades och jämfördes med andra alternativ för energilagring. På basen av analysen gjordes en slutsats om användningsområde för tekniken.

1.3 Energilagring allmänt

Då man väljer en lösning för energilagring måste flera olika faktorer tas i beaktande. Den slutliga formen av energi som vill tas ut, det vill säga ifall man är ute efter värmeenergi för till exempel fjärrvärme samt industriella behov, eller om man vill ta ut elektricitet för elnätet ur lagret. Geografiska förutsättningar spelar även en stor roll eftersom en del metoder kräver exempelvis mera utrymme än andra eller stora höjdskillnader för att kunna vara ett logiskt alternativ för en specifik situation. Nedan en genomgång av olika alternativ för energilagring.

1.3.1 Elektrokemisk energilagring

Den vanligaste typen av energilagring man stöter på i vardagen. Metoden är dock rätt så dyr i förhållande till energimängden som kan förvaras. Detta beror till stor del på att det behövs dyra material för att bygga battericellerna. Det är heller inte klimatvänligt eller etiskt att gräva fram ämnen som nickel, litium och kobolt som ofta används. Battericellerna kan dock byggas väldigt små vilket gör dem optimala för mindre energibehov som kan flyttas omkring.

Elektrokemiska batterier består av två eller fler celler som parallell- och seriekopplas så att den eftersträvade spänningen samt kapaciteten nås. En cell består av två elektroder: en anod och en katod som ligger frångilda i en elektrolyt. Det finns olika material som används för elektroderna och elektrolyten och valet av material påverkar cellens egenskaper så som livslängd, energitäthet och kostnadseffektivitet. (S. Ould Amrouche, 2016)

1.3.2 Mekanisk lagring

Mekanisk energilagring baserar sig på principen av potentiell eller kinetisk energi som lagras i olika föremål eller substanser. Hit räknas bland annat pumpad vattenkraft, komprimerad luft samt svänghjul.

Pumpad vattenkraft baserar sig på två bassänger med stor höjdskillnad. Vatten pumpas upp och förvaras i den högre bassängen då billig el är tillgängligt och sedan släpps vattnet ner genom en turbin då energin skall användas. Systemet är väldigt enkelt och man kan

förvara väldigt stora energimängder på detta sätt. Utmaningen med pumpad vattenkraft är geografiskt eftersom stora höjdskillnader krävs för att den potentiella energin skall vara effektivt användbar.

Komprimerad luft baserar sig på den enkla principen att pressa ihop luft i behållare för att sedan användas för energiproduktion senare. Utmaningen med att komprimera luft är att verkningsgraden inte är så stor då det skapas en massa spillvärme när man komprimerar luften.

Svänghjulet är av de äldsta formerna av energilagring och baserar sig på kinetisk energi som lagras genom att snurra på ett hjul väldigt snabbt. Energimängden som kan lagras är dock väldigt låg i förhållande till kostnaderna och svänghjulet tappar sin kinetiska energi med tiden vilket betyder att det endast lämpar sig för väldigt kortvarig lagring av energi.

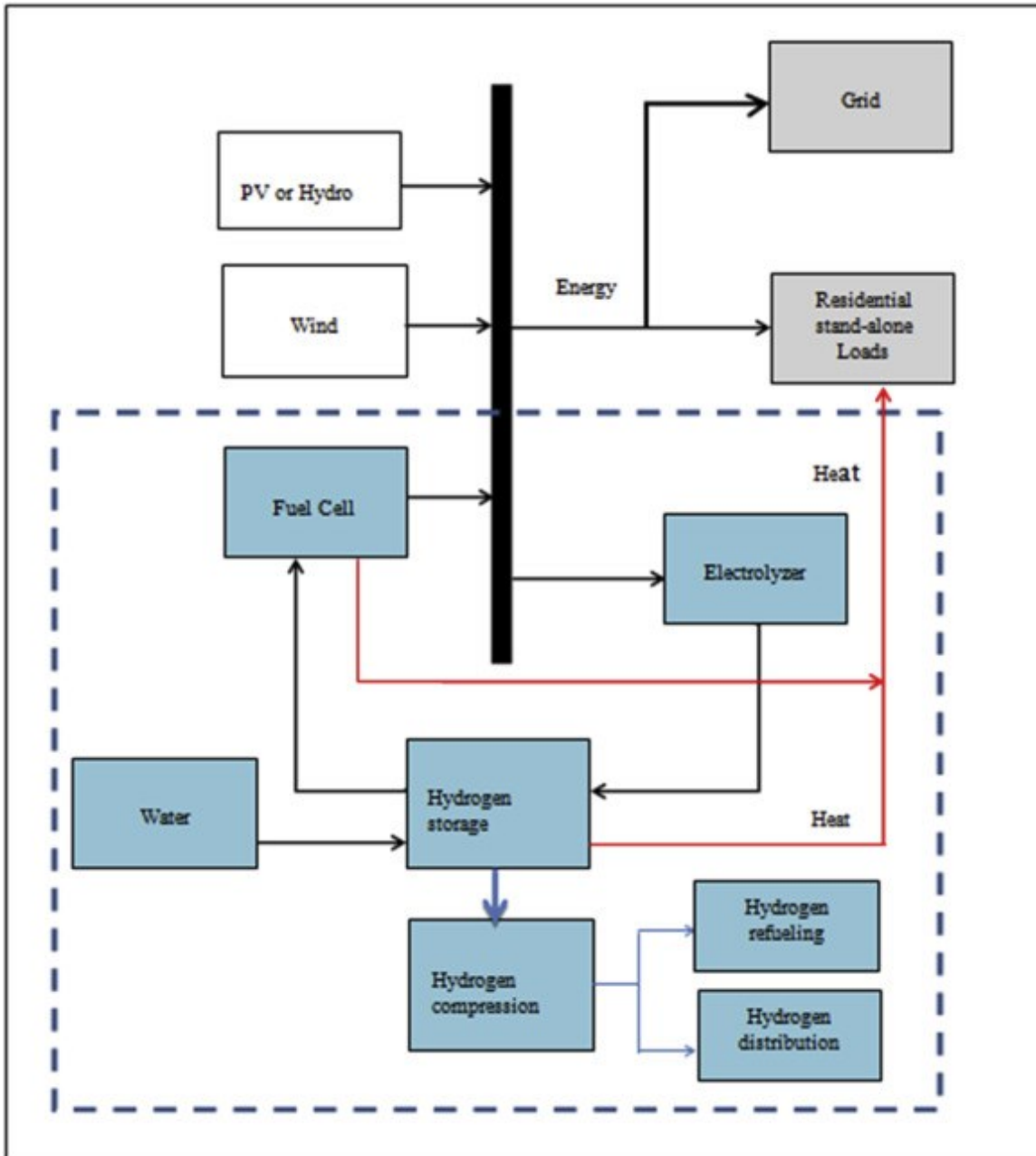
1.3.3 Vätgas

Då energi lagras som vätgas krävs det ett komplext system som består av en elektrolys. I elektrolysen delas vattenmolekyler till vätgas och syre med hjälp av elektricitet. Vätgasen lagras sedan tills den förbränns för att skapa värme till exempel i industriellt bruk. Vätgasen kan också omvandlas tillbaka till elektricitet i en bränslecell. Dagens PEM (Polymer Electrolyte Membrane) bränsleceller har en verkningsgrad på endast 60%. (U.S. Department of energy, 2015)

Ifall vätgasen används som sådant för att skapa värme är verkningsgraden betydligt högre än om man konverterar den tillbaka till elektricitet. Vätgas har den högsta energimängden i förhållande till sin massa av alla bränslen. (S. Ould Amrouche, 2016)

I figur 1 visas vätgasens krets som energilagringssätt. Bilden visualiserar hur vätgasen kan skapas samt användas i olika skeden beroende på behovet. Vätgasen kan exempelvis användas direkt som värmekälla genom förbränning eller komprimeras och förflyttas till ett annat ställe för att sedan exempelvis omvandlas tillbaka till elektricitet i en bränslecell på ett nytt ställe.

Utmaningen med vätgas som energilagringsmetod är kostnaden för tekniken som krävs för processen samt verkningsgraden. Vätgasen är dock relativt lätt och billig att förvara längre tider samt transportera vid behov.



Figur 1 Vätgasens krets (S. Ould Amrouche, 2016)

1.3.4 Termisk lagring

Termisk lagring förkortas ofta till TES (Thermal energy storage).

Termisk lagring innebär att energi lagras som värme-energi i ett material. Vanliga material som används är bland annat vatten, smultna salter och betong.

“A wide variety of materials are being used for thermal energy storage. TES materials must possess suitable thermo-physical properties like favorable melting point for the given thermal application, high latent heat, high specific heat and high thermal conductivity etc. Other desired properties of thermal energy storage materials are low supercooling, low cost, easy availability, thermal stability, chemical stability, low volume change, non-toxic, low vapor pressure, congruent melting and low flammability etc.” (Guruprasad Alva, 2018)

TES system kan användas tillsammans med vilken energikälla som helst men verkningsgraden är betydligt högre ifall energikällan är värme. Ett vanligt användningsområde av TES system är i samband med koncentrerad solenergi. Omkring hälften av alla CSP (Concentrated solar power plant) är kombinerade med TES och över 70 % av kommande och planerade CSP är kombinerade med TES. Då solenergin koncentreras med hjälp av speglar kan väldigt höga temperaturer nås vilket är optimalt då det kommer till TES. (Guruprasad Alva, 2018)

Energitätheten i TES system kan vara låg men det kompenseras vanligtvis med väldigt billiga material samt driftkostnader. Ifall energin används som värme är verkningsgraden givetvis högre än om man konverterar värmen till el. Termiska lagringens svaga sida är förluster under långa energilagringstider. Värmeenergin rymmer sakta ut beroende på hur väl isolerat det är. (Guruprasad Alva, 2018)

TES system delas in i sensibla, latent och kemiska system. Det är egentligen endast sensibla system som används för tillfället eftersom det är en mycket enklare och billigare process. Sensibel värmelagring är då man lagrar värme i ett material som inte ändrar fas utan endast temperaturen i materialet ändras.

Latent värmelagring innebär att materialet byter fas då den uppvärms och kyls ner. Vanligtvis används fasbytet mellan fast och vätska. Fasbytet mellan vätska och gas undviks

ofta eftersom volymskillnader blir väldigt stora. Paraffin används ofta som material i latent värmelagring. Det finns olika paraffiner med smältpunkter mellan -5C och 100C. Salter kan även användas vid latent värmelagring.

” For example in an operating range between 300 °C and 500 °C, by choosing LiNO₃ (melting point: 250 °C) only the sensible heat can be used for thermal energy storage and it will give a volumetric storage capacity of around 440 MJ m⁻³. But by choosing KNO₃ (melting point: 335 °C) both sensible heat and latent heat can be used for thermal energy storage and it will give a volumetric storage capacity of around 935 MJ m⁻³. Therefore when the salt is required to fulfill thermal storage purpose, utilizing latent heat is a good option. ” (Guruprasad Alva, 2018)

Det kan alltså vid specifika värmeområden vara väldigt lönsamt att utnyttja både sensibel och latent energi hos exempelvis salter.

Termokemisk energilagring (TCS) innebär att energi lagras som en reversibel kemisk reaktion mellan olika ämnen. I Anders Westerlunds slutarbete behandlas kemisk energilagring utförligt. I kemiska reaktioner kan det uppstå väldigt stora mängder värme-energi och den potentiella energitätheten i kemisk lagring kan vara väldigt stor. Kemisk värmelagring har alltså i teorin väldigt stor potential men är dock endast i experimentellt stadium för tillfället vilket betyder att det inte finns praktisk användning ännu men att det i teorin kunde vara en möjlig lösning. Problemet med kemisk lagring verkar vara kostnader av material samt materialdegradering då processen repeteras. Material som för tillfället experimenteras med är vatten och zeolit. (Westerlund, 2018)

1.4 Sandbatteriet

Sandbatteriets princip baserar sig på sensibel värmelagring. En stor isolerad behållare fylls med sand som kan förvara energi i form av väldigt höga temperaturer (upp till 1000 grader Celsius enligt Polar Night Energy). Den maximala temperaturen på sanden är egentligen endast begränsad av resten av sandbatteriets konstruktion samt inre komponenter för värmeöverföringens teknik eftersom sanden i sig själv tål extremt höga temperaturer. Verkningsgraden är förhållandet mellan energin som sätts in i ett system och energin som kan fås ur systemet. Enligt Polar Night Energy kan ett 1 GWh sandbatteri ha en verkningsgrad på till och med 95 %. Eftersom sandens värmekonduktivitet är relativt

låg, isolerar sandbatteriet sig själv till en del. De innersta delarna kan ha en väldigt mycket högre temperatur än de yttersta. Ett sandbatteri kan antingen grävas ner i marken eller stå ovanpå marken. (Polar Night Energy, 2024)

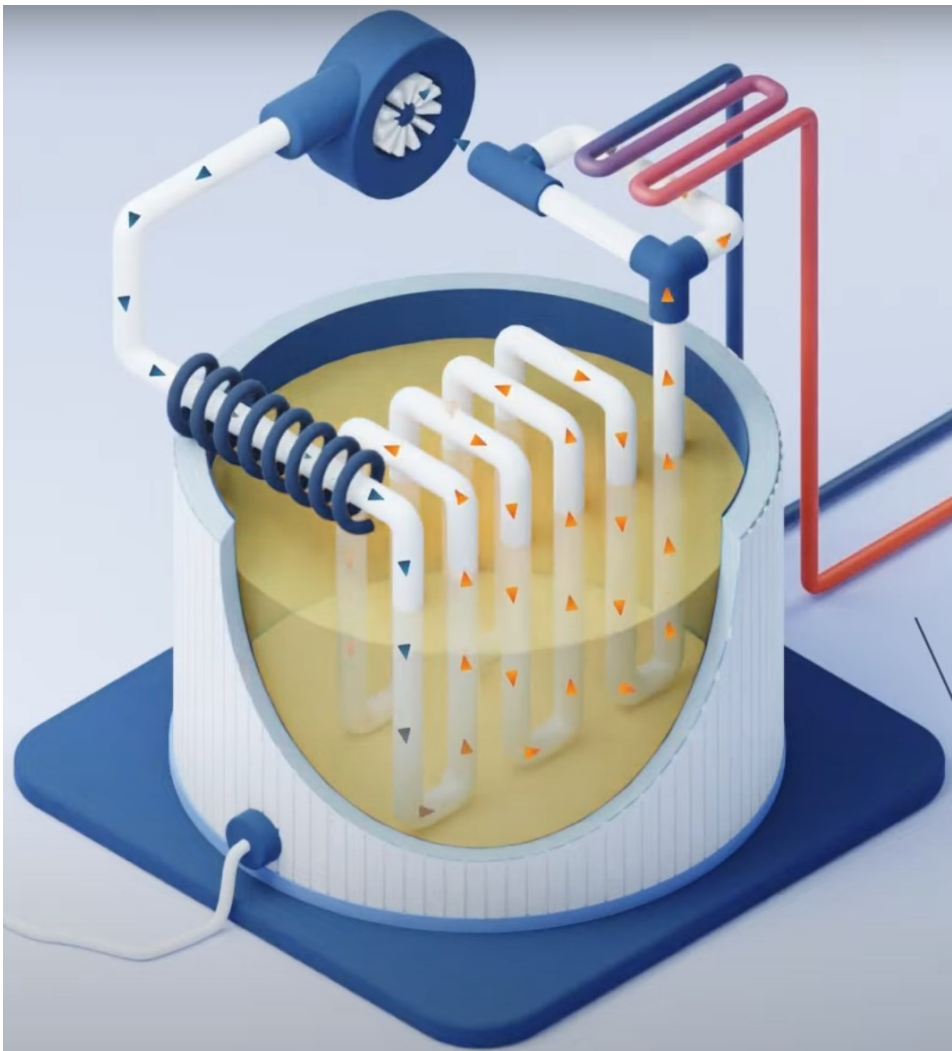
För att lagra värme i sanden används en luftkrets med värmemotstånd. Då den värmda luften cirkulerar i kretsen värmer den upp sanden. Då värme vill tas ur sandbatteriet används samma luftkrets och värme-energin tas ur luften med hjälp av en värmeväxlare.

Fördelen med att lagra värme i sand jämfört med det vanliga värmemediet vatten är enligt Polar Night Energy att energimängden som kan lagras i sand är flerfaldigt större än i vatten tack vare att temperaturerna kan vara så mycket högre i sanden medan vattnet är begränsat av sin låga kokpunkt. Man kan alltså lagra antingen betydligt mera energi i ett lika stort värmebatteri eller samma mängd energi i en betydligt mindre konstruktion. Sand har även andra bra egenskaper. Sand är billigt, ofarligt för allt levande samt kan fås lokalt så gott som överallt. Sandbatteriet kan använda vilken sorts sand som helst och är på så sätt inte påverkad av sandbristen som plågar andra industrier. Polar Night Energy ger gruvavfall som ett exempel på sandkälla. ”500 million tons of mining waste was produced only in EU during the year 2020”.

2 Befintliga och planerade tekniska lösningar

2.1 Kankaanpää

Sandbatteriet i Kankaanpää har en kapacitet på 8 MWh och är ett samarbete mellan företagen Polar Night Energy och Vatajankoski. Sandbatteriet i Kankaanpää är det första kommersiellt operativa sandbatteriet i världen. Energibolaget Vatajankoski använder sandbatteriet för att höja temperaturen på spillvärme från dataservers så att den resulterande värme-energin sedan kan användas för Kankaanpääs fjärrvärmesystem. Spillvärmen från datacentralen är endast omkring 60 °C och behöver därför värmas innan det kan användas för fjärrvärme. Då spillvärmen värms upp ytterligare med sandbatteriet blir den resulterande vattentemperaturen mellan 80 och 105 °C. (Hurttila, 2022)



Figur 2. Sandbatteriets funktionsprincip. (Polar Night Energy, 2023)

Sandbatteriet är en ungefär 4 m bred och 7 m hög isolerad stålsilo. Inuti silon är Polar Night Energys patenterade teknik för värmelagring och silon är fylld med ca.100 ton sand. I Figur 2 visas en förenklad version av luftkretsen i sanden. I verkligheten är det frågan om flera mindre rör som går olika långt in i sandbatteriet. Då värme lagras och tas ut ur silon kan luftens flöde styras till de olika delarna av silon beroende på till exempel hur stort behovet av energi är. Eftersom sanden är varmare i mitten så kan värme tas ut däri- från ifall värmebehovet är stort. Luftkretsen drivs av en 15 kW fläkt. (Hurttila, 2022)



Figur 3. Sandbatteriet i Kankaanpää. (Polar Night Energy, 2024)

Värmeenergi lagras i batteriet med hjälp av en luftkrets som värms direkt med tre 80 kW elmotstånd vilket alltså ger en kombinerad kraft på 240 kW. (Hurttila, 2022) Eftersom värmen skapas med el motstånd är verkningsgraden 100 %. Vatajankoski, se figur 3, använder sig av förnybar energi för att värma sanden. (Polar Night Energy, 2024) Sandbatteriets funktion är till stor del automatiserat. Sandbatteriet följer parametrarna på fjärrvärmens behov samt elpriser och styr själv ifall energi skall lagras i sanden samt hur mycket värme som fjärrvärmens behöver. (Hurttila, 2022)

Värme-energi tas ut ur systemet via en värmeväxlare kopplat till luftkretsen. Med hjälp av värmeväxlaren flyttas värme-energin från luftkretsen till fjärrvärmens vattenkräts. Sandbatteriets värmemotstånd, luftkrets och värmeväxlare kan också användas som en direkt elvärmekälla för fjärrvärmens ifall sandbatteriets energimängd inte räcker till för att värma luften och behovet är stort. (Hurttila, 2022)

2.2 Andra lösningar

Polar Night Energy har ett pilotprojekt i Tammerfors som har varit i bruk sedan 2020. Sandbatteriet innehåller 40 ton sand och har fungerat som en testplats för tekniken i sandbatteriets utveckling. (Hurttila, 2022)

Polar Night Energy har nyligen gjort ett avtal med Loviisan Lämpö om ett 100MWh sandbatteri i Borgnäs. Sandbatteriet kommer att vara 13 m hög och 15 m bred. Som energilagringmedium kommer att användas krossad täljsten. Täljstenen är en biprodukt från Tulikivis produktion av värmelagringskaminer och stenkrossen kommer att ha en högre värmeledningsförmåga (6,4 W/mK) än sanden som används i Kankaanpää. Den specifika värmekapaciteten på täljstenen är också högre än hos vanlig sand (0,98 J/gK) men eftersom stenkross kommer att användas så påverkar tätheten egenskaperna då det inte är frågan om solid täljsten. (Tulikivi, 2024) Sandbatteriet i Borgnäs kommer att använda Polar Night Energys algoritmer för att lagra värme-energi då elen på spotmarknaden är billigt och använda den lagrade värmen till större del då elen är dyr. Den lagrade energimängden motsvarar Borgnäs fjärrvärmebehov för en månad under sommaren och en vecka under vintertid. (Polar Night Energy, 2024) (Airaksinen, 2024)

För Borgnäs betyder den nya energilagringmetoden att kommunen kan avstå från sina gamla oljepannor helt och hållet och minska drastiskt på all annan förbränning. träflisförbränningen kommer exempelvis att minska med 60 %. Totalutsläppen kommer att minska med 70 % vilket motsvarar 160 koldioxid ekvivalenta utsläpp i året. (Airaksinen, 2024)

3 Teoretisk referensram

Mängden lagrad energi kan uttryckas med formeln:

$$Q = m * c_p * \Delta T$$

(massan gånger specifika värmekapaciteten gånger temperaturskillnaden)

Exempelvis Kankaanpääs sandbatteri med 100 ton sand med specifika värmekapaciteten på 830 J/kgK och temperaturskillnad på 350 grader Kelvin lagrar 29 050 MJ.

$$Q = 100\,000 \text{ kg} * 830 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} * 350 \text{ K} = 29\,050\,000\,000 \text{ J}$$

Vilket är ungefär 8MWh eftersom 3600 J är 1 Wh.

$$\frac{29\,050\,000\,000 \text{ J}}{3600 \text{ s/h}} = 8\,069\,444 \text{ Wh}$$

3.1 Materialens värmetekniska egenskaper

För att kunna göra beräkningar på sandbatteriets potentiella användning måste de använda materialens egenskaper först utforskas. Eftersom vattenbaserade värmelagrings lösningar är så vanliga på energimarknaden så görs jämförelserna här med vattnets egenskaper.

3.1.1 Specifik värmekapacitet

Specifik värmekapacitet är en enhet som beskriver hur många joule med energi per kilogram av ett ämne som krävs för att höja temperaturen med en grad Kelvin. Enheten är alltså J/(kg * K). Symbolen c brukar användas. Sand har en specifik värmekapacitet på 830 J/kgK medan vatten har värmekapaciteten 4182 J/kgK. (ToolBox, 2024) Detta betyder att vatten kan förvara väldigt stora mängder energi i förhållande till temperaturen jämfört med sanden.

En snabb uträkning på den teoretiska värmekapaciteten hos vatten baserat värmebatteri jämfört med sandbatteri ifall batteriet är en kubikmeter stort.

Vatten

$$Q_{vatten} = 1\,000 \text{ kg} * 4\,182 \text{ J/kgK} * 75\text{K} = 313\,650\,000 \text{ J}$$

Sand

$$Q_{sand} = 1\,600 \text{ kg} * 830 \text{ J/kgK} * 575\text{K} = 763\,600\,000 \text{ J}$$

Sand har en densitet på cirka 1 600 kg/m³ medan vatten har en densitet på cirka 1 000 kg/m³. En kubikmeter stort värmebatteri kan alltså i så fall lagra 313,65 MJ eller 87,1 kWh värme-energi mellan 25 och 100 °C varmt vatten medan ett lika stort sandbatteri med 25 till 600 °C varm sand kan lagra 763,6 MJ eller 212,1 kWh med värmeenergi. Ifall sanden värms till 1 000 °C kan nästan 1 300 MJ lagras.

Utgående från det data som Polar Night Energy har publicerat om Kankaanpääs sandbatteri kan man beräkna ett temperaturerna rör sig omkring 250–600 °C ifall den använda sanden har en specifik värmekapacitet på 830 J/kgK. Då når man alltså den utgivna kapaciteten på 8MWh med 100 ton sand.

$$100\,000 \text{ kg} * 830 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} * 350 \text{ K} = 29\,050\,000\,000 \text{ J}$$

$$\frac{29\,050\,000\,000 \text{ J}}{3600 \text{ s/h}} = 8\,069\,444 \text{ Wh} \approx 8 \text{ MWh}$$

Ifall Sandbatteriet i Kankaanpää skulle vara ett vattenbaserat TES system skulle givetvis temperaturerna vara väldigt mycket lägre. Energitätheten skulle även vara betydligt lägre. Vattnet skulle också behöva isoleras mera eftersom vattnet i sig själv leder ifrån sig värme så mycket kraftigare. I Kankaanpääs silo skulle det rymmas cirka 62,5 ton vatten. Ifall vi antar en temperaturskillnad på exempelvis 50 °C mellan det inkommande och uttagna vattnet så landar energikapaciteten på cirka 3,6 MWh.

$$62\,500 \text{ kg} * 50 \text{ K} * 4182 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} = 13\,068\,750\,000 \text{ J}$$

$$\frac{13\,068\,750\,000 \text{ J}}{3600 \text{ s/h}} = 3\,630\,208,333 \text{ Wh} \approx 3,6 \text{ MWh}$$

3.1.2 Värmekonduktivitet

Värmekonduktiviteten hos ett ämne beskriver hur bra ett ämne leder värmeenergi genom sig, enheten är Watt per meter gånger Kelvin, alltså: $\frac{\text{W}}{(\text{m} * \text{K})}$

Inom byggbranschen talar man oftast om byggmaterialens lambdavärde λ . Symbolen k används också ibland.

$$\lambda_{sand} = 0,15 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\lambda_{vatten} = 0,6 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

Eftersom sandens värmekonduktivitet är så låg så leder det till att värmen leds långsamt ur sanden även om isoleringen inte skulle vara så tjock. Detta kan man exempelvis uppleva på en sandstrand efter en solig dag då sanden kan kännas varm långt in på kvällen eftersom värmen har läpts så långsamt ifrån sanden.

3.2 Värmeström genom vägg

Sandbatteriet i Kankaanpää består av en isolerad stålsilo och för att kunna räkna ut värmeförlusterna måste isoleringsmaterialet bestämmas. Eftersom stenull har en väldigt hög temperaturlåghet samt isoleringsförmåga så väljs det för dessa simuleringar. Tjockleken på isoleringen är heller inte tillgänglig så en tjocklek på 20 cm väljs. Silons väggar antas bestå av 4 mm tjockt stål på bägge sidor av isoleringen.

Stenullen Paroc extra 200 mm har en värmekonduktivitet på 0,036 W/mK.

Stål har en värmekonduktivitet på 50 W/mK.

3.3 Luftvärmepumpar

Eftersom temperaturerna i Kankaanpääs sandbatteri är så höga (250–600 °C) så har luftvärmepumpen ingen roll. Dagens luftvärmepumpar klarar inte av så höga temperaturer och är därför mera aktuella när det kommer till exempelvis vattenbaserade TES system. Fördelarna med sandbatteriet ligger till stor del i de höga temperaturerna så ett sandbatteri med låga temperaturer är inte relevanta trots att värmepumpar då kunde användas effektivt.

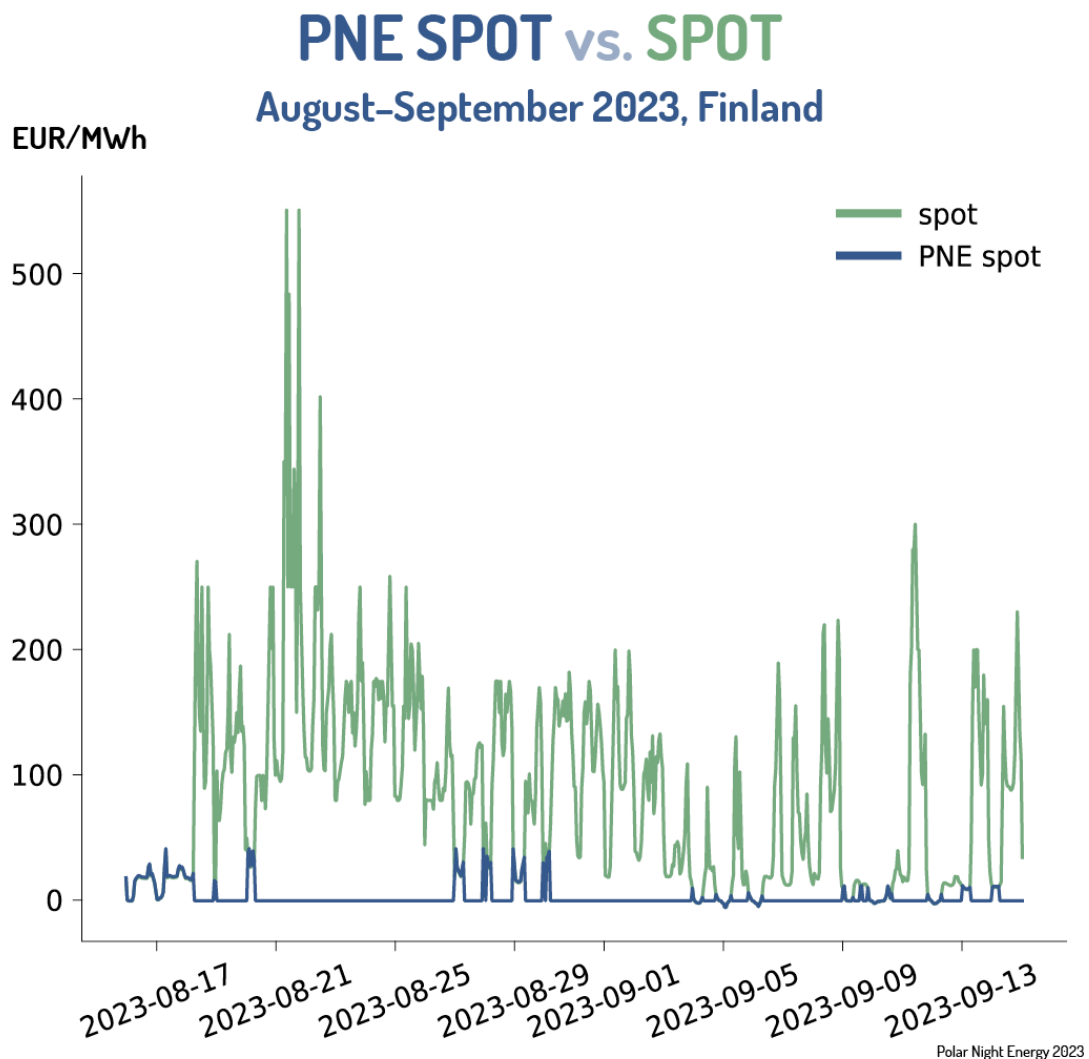
3.4 Direkt el

Fördelen med direkt eluppvärmning är enkelheten som egentligen hela sandbatteriets princip baserar sig på. Idén är att ett sandbatteri kan byggas väldigt billigt var som helst i världen med lokala tillgångar till all teknik. En isolerad stålsilo med värmerör och traditionella värmemotstånd kan alltså byggas enkelt och billigt hos vilken lokal samarbetspartner som helst. Eftersom värmemotstånd har en verkningsgrad på 100 % så uppstår det heller inga egentliga förluster här.

3.5 Elpriser

Elpriserna fluktuerar mycket på marknaden beroende på balansen mellan produktionen och efterfrågan. Speciellt i nordligare länder har årstiden en väldigt stor inverkan på tillgängligheten av billig sol och vindenergi samt behovet av värme-energi. För att kunna utnyttja sommarens solenergi för att värma husen på vintern skulle det krävas väldigt långvarig och massiv energilagring. Ett sandbatteri skulle kunna vara lösningen på det här.

Polar Night Energy medger att deras nuvarande sandbatteri i Kankaanpää endast är menat för kortvarigare energilagring. Kankaanpääs sandbatteri omkrings ett par veckor i taget. Sandbatteriet är alltså mera menat för att jämna ut elkostnaderna på spotmarknaden från dag till dag. Man lagrar energi på en blåsig dag med låga spot priser på elen och så utnyttjar man värmen på dyrare vindstilla dagar. Exempel på spotpriser ses i figur 4.



Figur 4. Spot köp för energilagring. (Polar Night Energy, 2024)

Terhi Moisala hos Polar Night Energy har gjort en kostnads kalkyl på ett spa i Finland som kombineras med ett 2 MWh Sandbatteri och har ett konstant värmebehov på 500 kW. Ifall sandbatteriet används smart och ”laddas” beroende på spot elpriserna så nås en energikostnad på endast 11 €/MWh under den simulerade månaden. Detta kan jämföras med 86 €/MWh med endast direkt el och 34 €/MWh med en värmepump med COP 2,5. Moisala kom även fram till att ifall sandbatteriet deltog och kompenserades för balanseering av elnätet under samma tidsperiod hade det gjort en vinst på 94 €/MWh.

4 Fallstudie

4.1 Energibalanser

Fouriers lag:

$$q = -\lambda * A \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right)$$

Differential versionen

$$q = -\lambda * A * \frac{dT}{dx}$$

q = värmeflöde, λ = konduktiviteten, A = arean, T = temperaturen, x = tjockleken

Fouriers lag beskriver konduktionsförluster som sker genom ett material beroende på dess egenskaper samt temperaturskillnaden. Lagen kan användas för att beräkna förlusterna genom sandbatteriets vägg. (Science Direct, 2024)

Energibalansen i sandbatteriet påverkas till stor del av storleken på sandbatteriet. Värmeförlusterna sker endast genom skalet på silon. Eftersom sandbatteriet är av cylindrisk form så ökar volymen snabbare i förhållande till den yttre arean vilket leder till mindre värmeförluster. Ifall de yttre måtten på silon fördubblas ökar volymen åtta gånger.

$$E_{\text{lagrat}} = E_{\text{in}} - E_{\text{ut}}$$

Energien lagrad i sandbatteriet bildas genom att beräkna skillnaden mellan den energin som körs in i sandbatteriet och den energin som tas ut samt förlusterna som uppstår. Energin som kommer in i sandbatteriet kommer från luftkretsen med elmotstånd på sammanlagt 240 kW och förlusten från fläkten på 15 kW kan räknas bort. Ut ur sanden rymmer värmeenergi både via konduktion till väggarna som sedan förloras till omgivningen via

värmestrålning samt konduktion och konvektion till luften. Då energi tas ut från sanden måste även fläktens 15 kW räknas bort.

Silons vägg samt taket antas bestå av tre lager. Inre 4 mm tjockt stål, 200 mm stenull samt yttre 4 mm tjockt stål. Stenullen har en värmekonduktivitet på 0,036 W/mK och stålen har en värmekonduktivitet på 50 W/mK. Värmen på insidan antas vara 600 °C och utsidan -15 °C. Arean på väggen antas vara 88 m² och taket 12,6 m². Det yttre värmemotståndet (R_{se}) antas vara enligt C4 anvisningarna 0,04 (m²*K)/W. (Miljöministeriet, 2002)

Den totala termiska resistansen på väggen blir i detta fall.

$$R_{tot} = \frac{1}{A} * \left(\frac{L_{stål}}{\lambda_{stål}} + \frac{L_{ull}}{\lambda_{ull}} + \frac{L_{stål}}{\lambda_{stål}} + \frac{1}{R_{se}} \right)$$

$$R_{tot} = \frac{1}{100,6 \text{ m}^2} * \left(\frac{0,004 \text{ m}}{50 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,2\text{m}}{0,036 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,004 \text{ m}}{50 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{1}{0,04} \right)$$

$$R_{tot} \approx 0,3037 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Värmeförlusten kan sedan räknas ut genom att ta i beaktande temperaturskillnaden på 615 K.

$$Q_{tot} = \Delta T / R_{tot}$$

$$Q_{tot} = 615 \text{ K} / 0,3037 \text{ K/W}$$

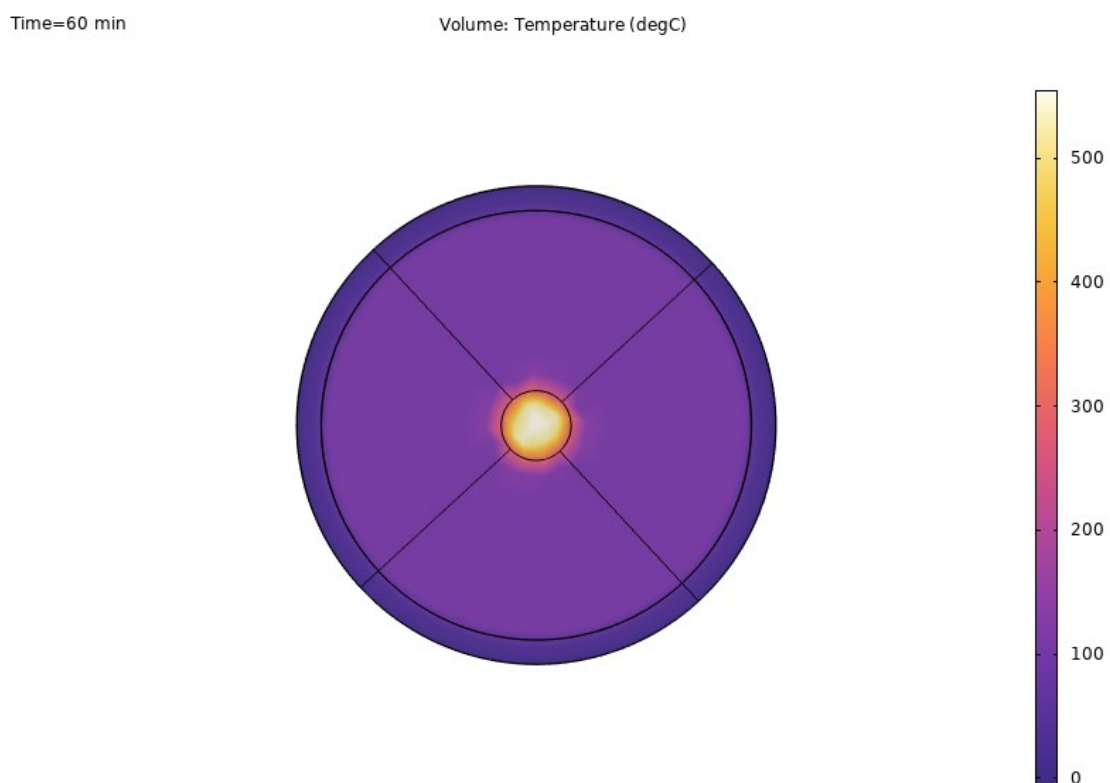
$$Q_{tot} \approx 2025 \text{ W}$$

4.2 Simuleringar

I simuleringarna antas sandens starttemperatur vara som kallast 100 °C och för att ge sandbatteriet sämsta möjliga förutsättningar med höga förluster antas omgivningens temperatur vara -15 °C för att simulera kalla vinterdagar. Programmet Comsol Multiphysics har använts för att simulera de olika scenarierna och bilder samt grafer har tagits ut för att visualisera resultaten.

4.2.1 Uppvärmning

Eftersom sanden isolerar sig själv så bra så krävs det långa tider för att värma upp sanden ifall den har svalnat för mycket. Ifall den fulla kapaciteten på 240 kW matas in i sanden i mitten av batteriet värms endast mitten upp väldigt snabbt medan resterande sandmassan hålls sval. I figur 5 nedan kan värmefördelningen ses efter 60 minuter efter att värmen läfts in i mitten av sanden med fulla effekten.

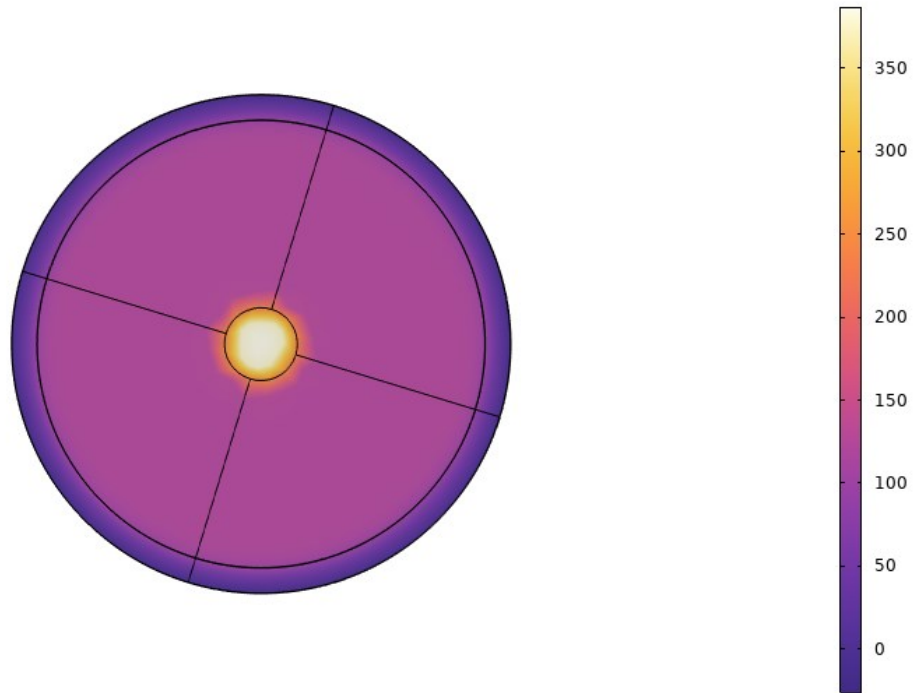


Figur 5. Värmefördelningen efter en timmes uppvärmning på full effekt

Ifall värmen fördelas jämnare och man värmer sanden långsammare blir resultatet bättre. Nedan i figur 6 visas en bild på fördelningen, då 30kW körs in i mitten och 90kW till resten av sanden i 5 timmar.

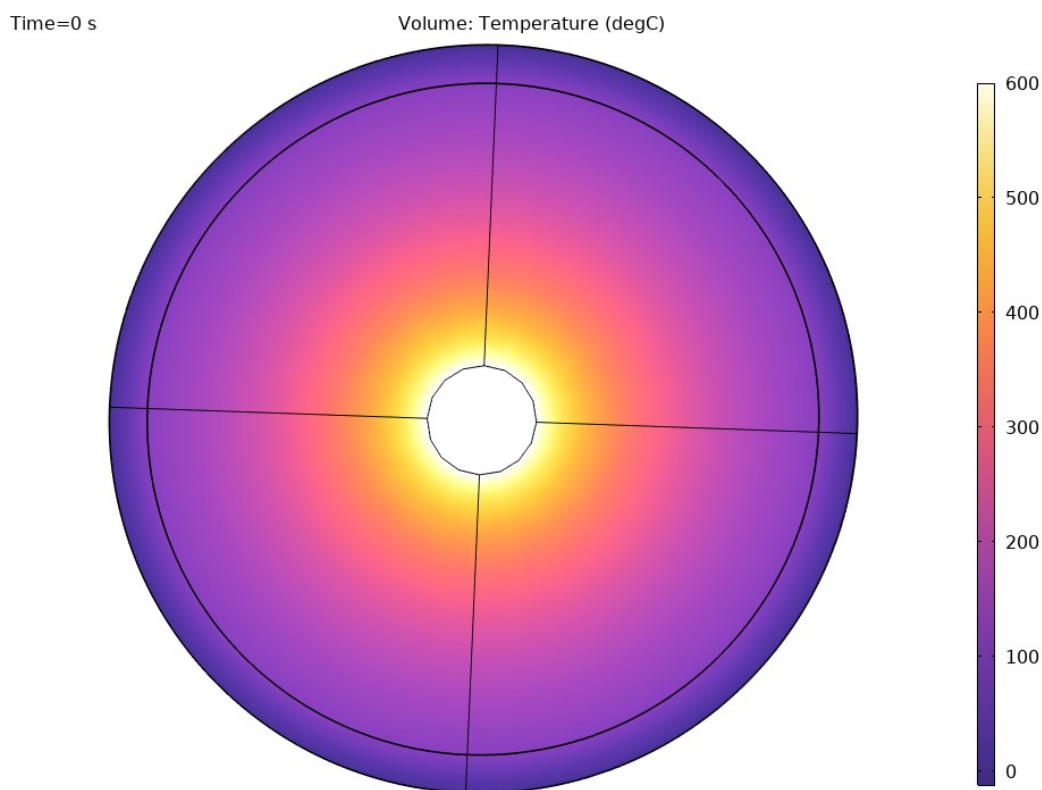
Time=300 min

Volume: Temperature (degC)



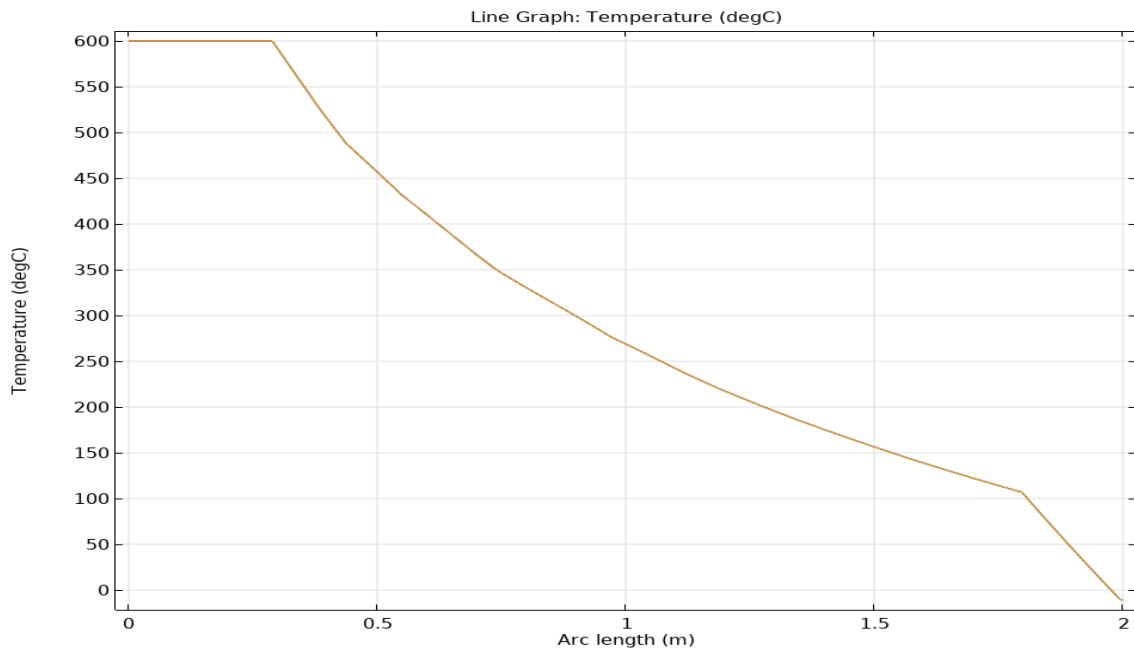
Figur 6. Värmefördelningen efter 5 timmars utspridd uppvärmning med halv effekt.

4.2.2 Värmeförlust med tiden



Figur 7. Värmens fördelning innanför sandbatteriet

Ovan i figur 7 visas en bild på värmebalansen ifall mitten har en temperatur på 600 °C och omgivningen är -15 °C. Det är rätt användbart att hålla en sådan värmefördelning innanför sanden, vilket behandlas senare i arbetet. I figur 8 visas en graf som visar temperaturprofilen från mitten av silon till periferin.

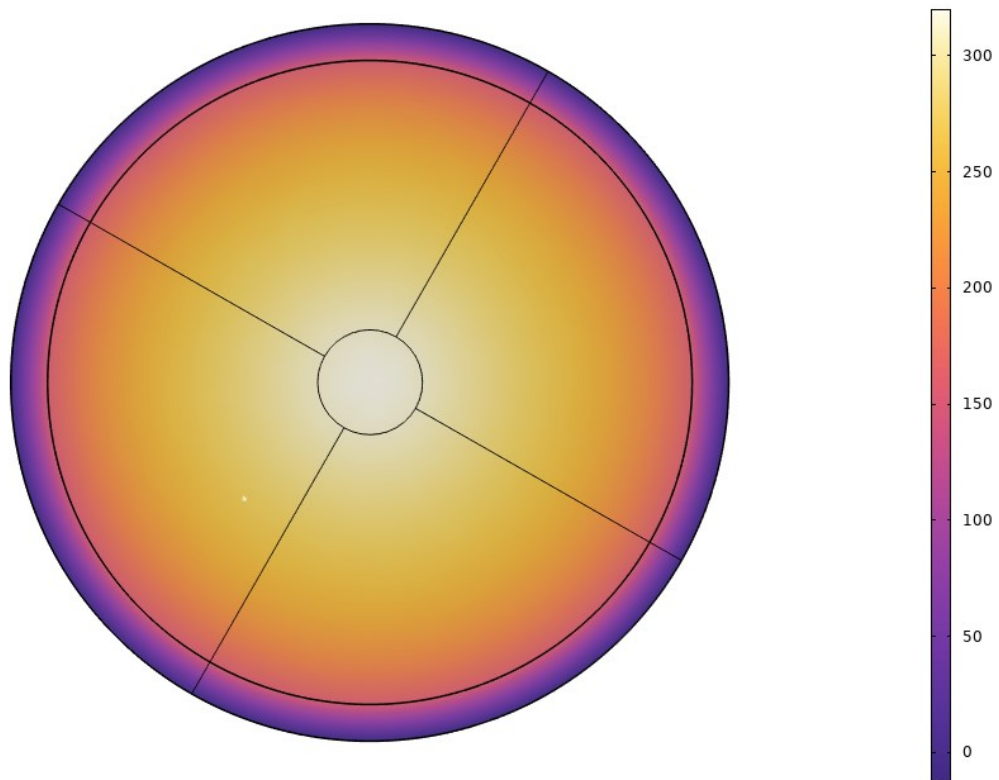


Figur 8. Värmebalansen

Enligt simuleringen i Comsol Multiphysics är förlusterna ca 400 W ifall denna värmefördelning uppehålls. Det betyder att ifall sandbatteriet lämnas en vecka utan någon värmeförsörjning har mitten fortfarande en temperatur på 350 °C. Ifall hela sandmassan hålls som 400 °C blir förlusterna från ytan över 1 500 W. Det är alltså väldigt lönsamt att uppehålla en högre temperatur i mitten av sandbatteriet och utnyttja sandens egen isoleringsförmåga i stället för att försöka uppehålla höga temperaturer i hela sanden.

Time=14 d

Volume: Temperature (degC)



Figur 9. Två veckors nerkyllning.

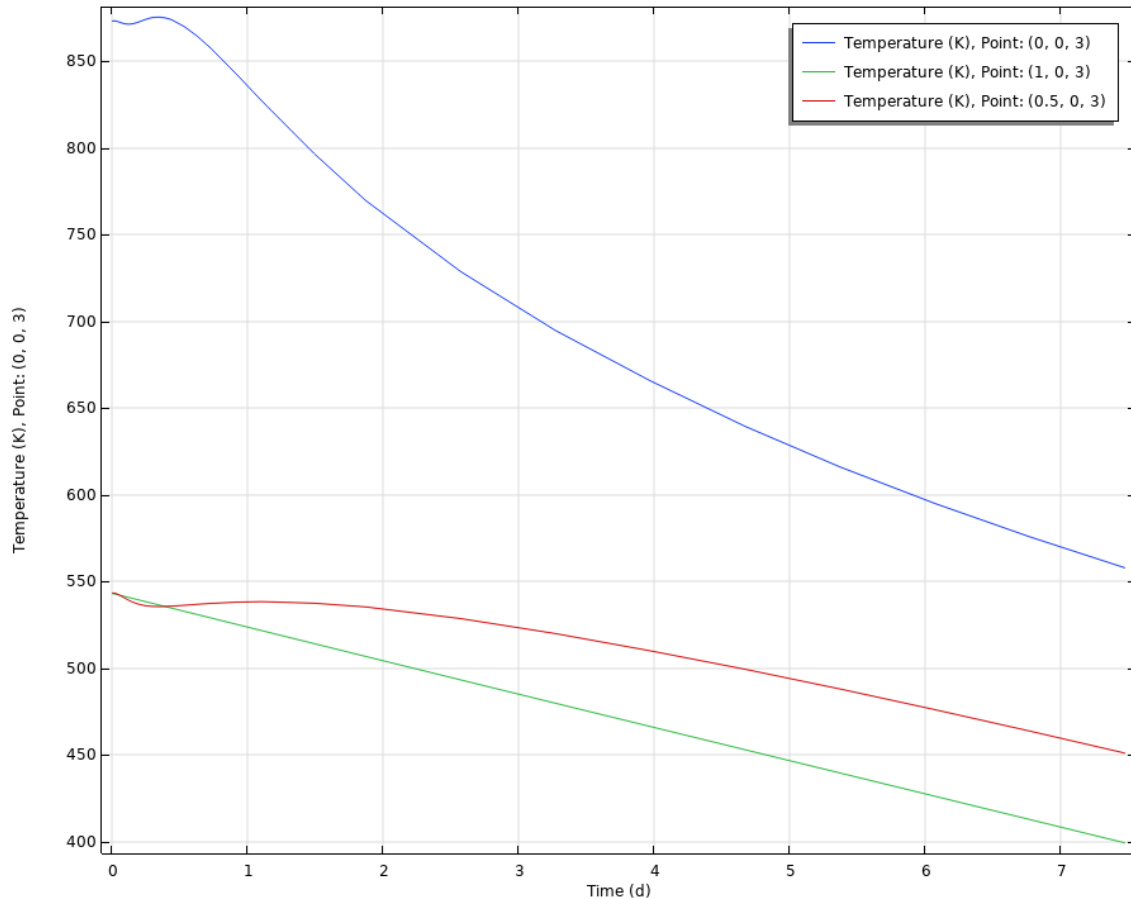
Ovan i figur 9 visas sandbatteriets värmefördelning efter två veckor utan värmeförsel. Värmen har jämnats ut men det är fortfarande en stor skillnad mellan mitten av sanden och de yttre delarnas svalare temperaturer.

4.2.3 Uttagning av energi

Energi kan tas ur sandbatteriet från olika delar beroende på energibehovet. Ifall endast lite energi behövs lönar det sig att utnyttja de yttre delarnas lägre temperaturer medan de inre delarna kan hållas förberedda för uttagning av större energimängder.

Nedan i figur 10 visas en graf då 20 kW värmeeffekt tas ut ur sandbatteriet i en vecka utan att värma upp sanden alls. Utgångstemperaturen är fördelad så att den mittersta delen har en temperatur på 600 °C medan resten ligger vid 270 °C. Temperaturen i Kelvin ($600 + 273$) är mätt från mitten, en halv meter från mitten samt en meter från mitten av batteriet

medan värmen togs ut från de yttre delarna. Från grafen kan vi se att värmen i mitten av sanden sjunker väldigt snabbt till en början på grund av den höga temperaturen som leds ut i resten av sanden.



Figur 10. Graf på sandbatteriets nerkyllning med tiden.

4.2.4 Kombinerat

Sandbatteriet fungerar bäst då man kombinerar värmeförlust och uttagning. Förlusterna stiger drastiskt då man värmer upp de yttre delarna till höga temperaturer. Detta gör sandbatteriet mera lönsamt för kortare tiders lagring av höga temperaturer i mitten av sanden medan de yttre delarna egentligen endast fungerar som isolering. Den fulla kapaciteten av sandbatteriet kan användas då man vill spara energi för längre perioder men då man kombinerar besparingarna med att kunna reagera på elprisernas fluktuationer samt

förlusternas minskning så är kortvarig besparing ett väldigt lockande alternativ. Yttre delarnas svalare temperaturer utnyttjas då lägre energimängder behövs medan mitten värms upp till höga temperaturer som kan utnyttjas då behovet är högre. Liksom Terhi Moisala hade räknat ut i figur 4 så är sandbatteriet väldigt bra för att kompensera de fluktuerande elpriserna då värmebehovet var relativt konstant. Ifall förbrukningen är ojämnare är det svårare att kunna utnyttja elprisernas ojämnhet lika effektivt eftersom man kanske plötsligt behöver mycket värmeenergi samtidigt som elpriset råkar vara högt. Då förbrukningen är jämn är det alltså lättare att beräkna när det lönar sig att lagra energi och när man vill utnyttja den lagrade energin.

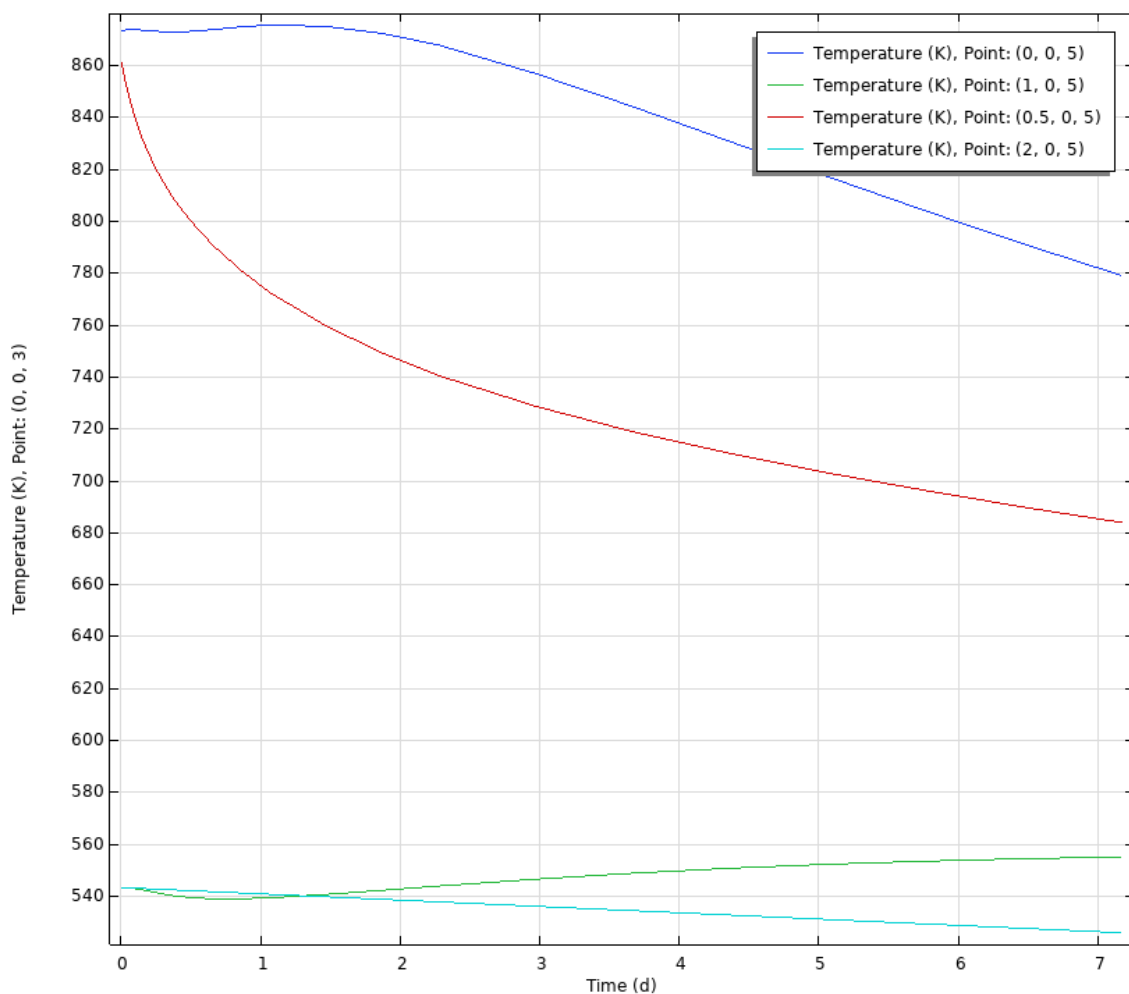
4.3 Jämförelse och slutsatser

Det verkar vara så att mindre sandbatterier fungerar bäst för kortvarigare tiders lagring av värme-energi medan större versioner skulle kunna användas för längre tiders lagring. Sanden isolerar sig själv bra men potentiella kapaciteten lider drastiskt ifall man inte värmer sanden tillräckligt högt. Sandbatteriets varierande temperaturer i de olika delarna kan också ses som en bra egenskap och styrka. Resten av systemet kan förenklas då den uttagna energimängden kan regleras genom att endast styra luftflödet till olika delar av batteriet med hjälp av ventiler. Ett annat alternativ skulle vara varierat luftflöde eller olika värmeväxlare.

Ifall sandbatteriet fylldes med vatten i stället för sand och vattnet värmdes endast i mitten till 100 °C är förlusterna 280 W ut ur skalet på silon. (400 W med 600 °C sand). Vattnet fördelar sin värme snabbt på grund av konvektion innanför silon vilket gör att samma isolerande effekt som sanden har inte kan utnyttjas utan hela vattnet har snabbt samma temperatur vilket i sin tur höjer förlusten genom väggarna.

En dubbelt större sandsilo simulerades också i Comsol Multiphysics. silon var alltså 14 m hög och 8 m i diameter. Stålen hölls som 4 mm men isoleringen dubblades till 40 cm. Eftersom volymen på en cylinder växer 8 gånger ifall den blir dubbelt större på alla led blir kapaciteten snabbt större då silon växer. Den dubbelt större silon skulle alltså teoretiskt rymma över 800 ton sand. Sandbatteriet skulle på så vis få en energikapacitet på ungefär 64 MWh.

I figur 11 nedan visas en graf där ett dubbelt större sandbatteri nerkyls i en vecka på samma sätt som i figur 10 ovan. Från grafen kan märkas att speciellt mitten uppehåller en hög temperatur väldigt mycket längre och kyls egentligen inte alls under de två första dagarna. Värme förändringen i resten av sandbatteriet är också betydligt långsammare. Punkten vid 0,5 m kyls drastiskt eftersom den ligger precis där den hetare mitten och svalare större sandmassan möts. Detta betyder att den delen kyls snabbt ner till en början, då värmefördelningen utjämnas i sanden. Den röda linjen är på så vis en del missledande. Orsaken till att det större sandbatteriet kyls så mycket långsammare är att förlusterna endast sker genom skalet och eftersom den yttre arean inte växer i samma takt som den inre sandvolymen så kan energin lagras längre tider med långsammare nerkyllning.



Figur 11. En veckas nerkyllning av ett dubbelt större sandbatteri

5 Sammanfattning

Sandbatteriet har stor potential för energilagring och kan spela en viktig roll i framtidens förnybara energimarknad. Sandbatteriet har sina för och nackdelar så som alla andra alternativ också. De största fördelarna är kostnaden att både bygga och uppehålla sandbatteriet samt de höga temperaturerna som är möjliga att sparas i sanden. Vissa industriella sektorer kan ha stor nytta av en möjlighet att lagra höga temperaturer som de kan använda i sina processer. Till svagheter hör bland annat förlusterna då sandbatteriets fulla potentiella kapacitet försöker utnyttjas, samt osäkerheten kring den nya teknologin. Längre tiders lagring kräver också mera fokus på isolering av sandbatteriet, medan ett sandbatteri som bara behöver lagra korta tider kan utnyttja sin egen isoleringsförmåga tillräckligt effektivt.

För långtidslagring av energi är sandbatteriet begränsad av den valda isoleringen och förlusterna kan snabbt bli onödigt stora. Vätgas eller kemiska battericeller är betydligt snålare för längre tiders lagring. Battericellernas fördel är också den snabba reaktionsförmågan både till urladdning och laddning och man reagera snabbare på elmarknadens situation. Svagheten är dock priset på materialen samt deras klimatpåverkan.

Ifall målet är att lagra elektricitet som ska tas ut som elektricitet så är sandbatteriet ett möjligt alternativ men kanske inte det bästa. Förlusterna samt operationskostnaderna minskar på sandbatteriets fördelar ifall det används som en värmepanna med turbiner för elproduktion. I detta fall hade det varit mera gynnsamt att använda sig av kinetiska energilagringmetoder ifall möjligt. Sandbatteriets fördel är att det kan placeras i princip var som helst.

Källor

- Airaksinen, A. (15. 3 2024). Suomeen rakenetaan 100 MWh:n hiekka-akku. *Tekniikka & Talous*, ss. 4-5.
- Guruprasad Alva, Y. L. (2018). *An overview of thermal energy storage systems*,. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037>.: Energy.
- Hurttila, E. (2022). *Hiekkalämpövaraston tekniikka ja käyttö*. SAMK. Theseus.
- Miljöministeriet. (30. 10 2002). *C4 Värmeisolering - Anvisningar*. Miljöministeriet. Haettu 5. 5 2024 osoitteesta C4 Värmeisolering - Anvisningar: <https://finlex.fi/sv/viranomaiset/normi/700001/1931>
- Polar Night Energy. (24. 10 2023). *YouTube*. Noudettu osoitteesta What Is a Sand Battery? Polar Night Energy's Sand-based Thermal Energy Storage Explained: https://www.youtube.com/watch?v=bZ9TyJ1bQ3Y&t=94s&ab_channel=PolarNightEnergy
- Polar Night Energy. (7. 3 2024). *Polar Night Energy*. Noudettu osoitteesta News: <https://polarnightenergy.fi/news>
- Polar Night Energy. (2024). *Polar Night Energy*. Noudettu osoitteesta Sand Battery: <https://polarnightenergy.fi/sand-battery>
- S. Ould Amrouche, D. R. (2016). *Overview of energy storage in renewable energy systems*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.243>.: International Journal of Hydrogen Energy,.
- Science Direct. (2024). *ScienceDirect*. Noudettu osoitteesta Fourier Law: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/fourier-law>
- ToolBox, T. E. (26. 3 2024). *Specific Heat of common Substances*. Noudettu osoitteesta Engineering toolbox: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html#gsc.tab=0
- Tulikivi. (2024). *Tulikivi*. Noudettu osoitteesta Täljstenens egenskaper: https://www.tulikivi.com/se/tulikivi/Taljstenens_egenskaper
- U.S. Department of energy. (november 2015). *Fuel cell fact sheet*. Noudettu osoitteesta <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/fuel-cells-fact-sheet>
- Water Science School . (5. 6 2018). *U.S. Geological Survey*. Noudettu osoitteesta Water Density: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/water-density>
- Westerlund, A. (2018). *Termisk energilagring som uppvärmningsmetod i byggnader: en metaanalys av forskningen*. Arcada. Helsingfors: Theseus.

