

# **Dimensionering av varmvattentank som säsongslager för uppvärmning i off grid-systemet vid Meteorian**

Simon Lund

Diplomarbete

Handledare: FD Jessica Tuuf

Examinator: Prof. Margareta Björklund-Sänkiahö

Energiteknik, Vasa

Magisterprogram i kemi- och processteknik

Fakulteten för naturvetenskaper och teknik

Åbo Akademi

Maj 2022

## ABSTRAKT

Det ökande energibehovet i dagens samhälle sätter krav på energikonsumtionen och energikällor. Den höga konsumtionen resulterar i större utsläpp vilket motiverar vidareutveckling av förnyelsebara energikällor samt optimering av energianvändning i både privata sammanhang och i industrier. Förbättringar inom energianvändning är ett steg närmare en mer hållbar framtid.

Vid Meteorian i Österbotten finns ett off grid-energisystem med förnyelsebara energikällor, en biodiesलगenerator, energilagring samt IoT-teknologi för att avläsa energidata. Syftet med detta arbete var att dimensionera ett säsongslager utifrån kapaciteten på de förnyelsebara energikällorna installerade i off grid-systemet samt att analysera energisystemets funktion. Målsättningen med optimering av off grid-systemet är att möjliggöra Meteorians verksamhet att fortgå året runt. Analysen av energisystemet ger en helhetsbild över de förnyelsebara energikällornas kapacitet för att möta energibehovet på området. Utgående från analysen kan nyckelområden såsom energibehov vidare undersökas för att vidareutveckla energisystemets funktion.

Arbetet gjordes genom att analysera historiska data från off grid-systemets sensorer. Data från förnyelsebara energikällor samt konsumenter i systemet gav potentiell lagringsbar energi som därefter gjorde dimensioneringen av säsongslagret möjligt. Resultatet som erhöles ger indikationer på energisystemets prestanda samt hänvisningar till förbättringsområden. Resultatet visar att off grid-systemet är i behov av en tillökning i form av förnyelsebara energikällor samt att införskaffa ett säsongslager.

Off grid-systemet på Meteorian klarar sig relativt bra under årets gång men är i behov av optimeringar i energianvändningen, speciellt vintertid. Förbrukningen av den erhållna förnyelsebara energin kan optimeras genom att införskaffa en värmepump med högre verkningsgrad under kallare förhållanden för att ytterligare förbättra energisystemets helhet.

**Nyckelord:** off grid-system, energilagring, förnyelsebar energi

## ABSTRACT

The rising energy demand in today's world puts pressure on energy consumption and energy sources. The elevated consumption of energy results in an increase of emissions which further motivates development of renewable energy sources and an optimization of the use of energy in both private and in industrial situations. Through improvements in the usage of energy, a more sustainable future can be reached.

At the Meteorica in Ostrobothnia there is an off-grid energy system with renewable energy sources, a biodiesel generator, energy storage and IoT-technology for reading of energy data. The aim of this study was to design a seasonal energy storage from the capacity of the renewable energy sources installed in the off-grid system and to analyse the function of the energy system. The aim with the optimization of the off-grid system at the Meteorica is to enable activities to proceed throughout the whole year. The analysis of the energy system gives an overview of the renewable energy sources capacity to meet the given energy demand. From the analysis key areas, such as energy demand, can be further researched to advance the function of the energy system.

This study was done through an analysis of historical data from the sensors of the off-grid system. Data from renewable energy sources and consumers in the energy system resulted in potential storable energy that made designing of a seasonal energy storage possible. The achieved results give indications on the performance of the energy system and references to areas in need of improvement. The results show that the off-grid system needs an expansion in form of renewable energy sources and an investment in a seasonal energy storage.

The off-grid system at the Meteorica manages relatively well during the year but needs optimizations in the use of energy, especially during the winter. An optimization in the consumption of the achieved renewable energy can be done by investing in a heat pump with a greater efficiency during colder conditions to further improve the entirety of the energy system.

**Key words:** off-grid system, energy storage, renewable energy

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

ABSTRAKT .....	I
ABSTRACT .....	II
INNEHÅLLSFÖRTECKNING .....	III
FÖRORD .....	V
1 INTRODUKTION .....	1
2 TEORI OCH LITTERATUR .....	4
2.1 Off grid-system .....	4
2.2 Energilagring .....	6
2.2.1 Kortvarig lagring .....	7
2.2.2 Säsongslagring .....	8
2.3 Energioptimering i off grid-system .....	11
2.3.1 Varmvattentank .....	12
2.3.2 Isolering av varmvattentank .....	13
2.3.3 Temperaturskiktning i varmvattentank .....	15
2.3.4 Schemalagd förbrukning .....	16
2.3.5 Värmepump .....	16
2.4 IoT – Internet of Things .....	19
3 MATERIAL OCH METOD .....	21
3.1 Fall: Meteorian .....	21
3.1.1 Det nuvarande energisystemet vid Meteorian .....	22
3.1.2 Meteorians IoT-system .....	25
3.2 Säsongslagring i varmvattentank .....	26
3.2.1 Energilagringspotential för Meteorian .....	26
3.2.2 Beräkning av isoleringsförlust från varmvattentank .....	27
3.2.3 Dimensionering av varmvattentank .....	29
3.2.4 Beräkning av vattentankens volym .....	30
3.2.5 Varmvattentankens bidrag till uppvärmning .....	33
4 RESULTAT .....	36
4.1 Energilagringspotential för Meteorian .....	36

4.2	Isoleringsförluster och dimensionering för varmvattentank.....	39
4.3	Varmvattentankens volym .....	40
4.4	Varmvattentankens bidrag till energisystemet.....	42
4.5	Sammanfattning av resultat .....	44
5	DISKUSSION .....	46
6	SAMMANFATTNING OCH REKOMMENDATIONER.....	51
	LITTERATURFÖRTECKNING .....	56
	BILAGOR .....	62

## FÖRORD

Denna avhandling har skrivits för Åbo Akademi som en fallstudie tagen från projektet: Energilagring i vårt framtida koldioxidsnåla samhälle (Energilagring!), ett samarbete mellan ÅA, Novia och VAMK som har finansierats av ERUF, Högskolestiftelsen i Österbotten, Aktiastiftelsen i Vasa, Novia, VAMK och Åbo Akademi.

Jag tackar professor Margareta Björklund-Sänkiaho på Åbo Akademi för möjligheten att skriva om detta ämne som blir mer och mer aktuellt med tiden. Jag vill även tacka Hans Lindén på Yrkeshögskolan Novia för värdefull hjälp med information angående off grid-systemets uppbyggnad samt Jessica Tuuf på Åbo Akademi för värdefulla återkopplingar och guidning genom skrivandet av denna avhandling.

Vasa, 13.05.2022

Simon Lund

## 1 INTRODUKTION

Konsumtionen av energi ökar stadigt varje år i takt med att utvecklingen av samhället går framåt och alltmer elektrifieras för att nå en grönare framtid. Eftersom konsumtionen av elektrisk energi ökar kommer även klimatet att påverkas. Orsaken till detta är att majoriteten av den el som används idag produceras genom användningen av fossila bränslen som i sin tur ökar utsläppen av växthusgaser och accelererar klimatförändringen. Följderna av utsläppen ökar med åren i takt med att världen moderniseras, vilket ger behov av att strypa konsumtionen av icke-förnyelsebara energikällor (Qin, et al., 2022). På grund av detta blir olika typer av egen energiförsörjning alltmer eftertraktade samtidigt som medvetenheten om framtidens energiförsörjning växer. Lösningar från enstaka solceller till större självförsörjande anläggningar blir alltmer vanliga också i nordliga klimat. Under senare år har solceller i privathushåll ökat drastiskt, vilket är en trend som förväntas fortsätta (Energimyndigheten, 2021).

För att minska den negativa påverkan på miljön behövs förnyelsebara energikällor. Dessa energikällor är en kostnadseffektiv och miljövänlig lösning för att möta energibehovet, speciellt på områden utan koppling till elnätet. Anläggningar som dessa går under benämningen off grid vilket betyder att de är utanför elnätets påverkan. Nackdelen, men även fördelen, med förnyelsebara energikällor, som solceller och vindkraftverk, är att energin alstras från omgivningens förhållanden. Detta betyder att energin finns att brukas under perioder som inte går att påverka. Då vinden inte blåser eller solen inte skiner finns ingen energi att alstra. På grund av detta krävs ett välplanerat energilagringssystem för att tillgodose konsumenterna i ett off grid-system med energi under perioder där produktionen är mindre än konsumtionen (Marocco, et al., 2022). Eftersom produktionen och konsumtionen i ett off grid-system med solceller inte alltid matchar varandra utgör energilagringen grunden för en välfungerande lösning (Jossen, Garche & Sauer, 2004). Energilagringens typ och storlek varierar beroende på klimatet samt konsumtionen i energisystemet och bör därför dimensioneras efter behovet.

Föreliggande arbete består av en teorisamling, som beskriver komponenterna i det aktuella off grid-systemet, och uträkningar för säsongslagring av energi. Arbetet fokuserar främst på material som är aktuellt för energilagring i off grid-systemet på Meteorian, det vill säga material som främjar utveckling av energilagringen i energisystemet. Meteorian är ett besökscenter beläget på meteoritkratern Söderfjärden i Sundom, Vasa. Området består byggnader, utställningar, ett astronomiskt observatorium, fågeltorn och ett eget off grid-system. Upprätthållningen av Meteorian sköts av Sundom bygdeförening och astronomiska föreningen Vasa Andromeda (Meteoria, 2021).

Meteorians off grid-system består av solpaneler, ett vindkraftverk, en biodiesलगenerator, batterier, en luftvärmepump, en mindre vattentank och ett system av sensorer för att avläsa energidata i energisystemet. Systemet har utvecklats under flera år via flera finansierade projekt samt genom tillägg av komponenter baserat på de specifika behov som finns vid Meteorian för att föra energisystemet närmare målet om ett off grid-system som förlitar sig på förnyelsebar energi.

Off grid-systemet installerat för Meteorian har hittills klarat sig relativt bra under året, eftersom verksamheten vanligen har kunnat fortgå under runt nio av årets tolv månader. Dock har man märkt att energisystemet, baserat på sol- och vindkraft, inte klarar av att möta energibehovet under kallare perioder eftersom generatören måste köras. Eftersom problemet under vinterhalvåret är känt vill man nu undersöka energisystemets förnyelsebara energiproduktion för att hitta en lösning för energilagring i strävan mot ett mera effektivt energisystem. Installerade komponenter i Meteorians off grid-system bör vara av lägre prisklass eftersom budgeten är begränsad samt att energisystemet även ska kunna vara applicerbar i ett egnahemshus. Slutgiltiga målet med Meteorians off grid-system är att besökscentret ska vara uppvärmt samt kunna hålla öppet året runt och att det ska drivas med förnyelsebar energi så långt som möjligt.

Syftet i detta arbete är att analysera och beskriva det befintliga energisystemet i Meteorians off grid-system samt att undersöka möjligheten för energilagring i en varmvattentank till det existerande systemet för att assistera uppvärmning av



byggnaden under vinterhalvåret. Meteorians befintliga energisystem har uppkommit genom tillägg och utveckling under cirka tio års tid och en noggrannare analys av dess komponenter har ännu inte gjorts. För att analysera tillgängliga energimängder under olika perioder av året samt undersöka energilagringens roll i energisystemet kan data från Meteorians datainsamling analyseras med databasen Novia IoT (2022a; 2022b; 2022c). Analysen av data gjordes genom att bearbeta data och hitta perioder som beskriver energisystemets prestation. Arbetet gjordes i samarbete med Åbo Akademi och Yrkeshögskolan Novia. I framtiden planeras det befintliga systemet få en utökning som innefattar utökning av energilagringsskapacitet samt elproduktion. För att kunna planera nya investeringar finns det behov av en ökad förståelse av det befintliga energisystemet, vilket detta arbete ger förutsättning till.

## 2 TEORI OCH LITTERATUR

### 2.1 Off grid-system

Off grid-system är samlingsnamnet för energisystem med egen produktion av elektricitet som är helt eller delvis avskilda från elnätet. Med delvis avskilda off grid-system avses energisystem med en koppling till ett ostabilt elnätverk där egen produktion av elektricitet är nödvändig. I ett off grid-system alstras energi från källor som exempelvis solceller, vindkraftverk, vattenkraftverk och generatorer (Bhattarai & Thompson, 2016). Generatorer spelar en viktig roll i off grid-system där de fungerar som ett stöd för energisystemets energibalans. Eftersom energikällor som används i ett off grid-system alstrar energi från naturens förutsättningar är generatorns bidrag viktig för att balansera energibehovet de förnyelsebara energikällorna för stunden inte kan möta. Enligt Wang et al. (2022) är dieselgeneratoren en kostnadseffektiv investering för ett off grid-system men har dock nackdelar som utsläpp samt att de är beroende av bränsle.

Installationen av off grid-system baseras oftast på energibehov i mer svåråtkomliga områden som gör en koppling till ett fast elnätverk problematiskt eller dyrt. Off grid-system används till både hushåll samt industri och kan därför skilja sig åt beroende på användningsområde. fördelarna med dessa energisystem kan sammanfattas som minskade utsläpp, minskade elkostnader och förbättring av energitillförsel samt ökad pålitlighet (Wang et al., 2022). Off grid-system har fått ökad uppmärksamhet under senare år tack vare dessa fördelar.

I strävan till att kunna förlita sig på förnyelsebar energiproduktion och gå från beroendet av fossila bränslen i ett off grid-system måste energiförsörjningen planeras utifrån omständigheterna. Detta betyder att valda komponenter för ett off grid-system inte nödvändigtvis fungerar för en annan destination på grund av skillnaden i tillgängligheten på de förnyelsebara energikällorna. Solcellers effektivitet är känsliga för temperaturförändringar, effektiviteten sjunker i takt med stigande temperaturer (Mussard, 2017). Detta betyder att solceller i kallare klimat har en högre effektivitet än solceller monterade i varmare klimat. Solpaneler kan täcka stora delar av

energibehovet i kallare klimat men positioneringen blir viktigare på grund av lägre instrålning från solen. Positionen för solpanelerna bör planeras för att maximera instrålningen, hinder som träd och berg kan drastiskt sänka den erhållna effekten. Enligt en studie gjord i Serbien av Pantic et al. (2016) erhöll solpanelerna en något högre effektivitet under decembers kallare temperaturer jämfört med de varmare temperaturerna i juli. Studien baserades på data från soliga dagar under juli till december. Orsaken till den lägre effektiviteten i juli är solcellernas temperatur som påverkas av omgivande temperaturen samt vindstyrkan på området.

Vindkraftverk alstrar energi från passerande flöde av luft, vilket enligt Sohoni, Gupta och Nema (2016) resulterar i att geografiska hinder som berg, skog och byggnader samt även vindkraftverk i grupp kan påverka resultatet. Störningen leder till minskad effekt som erhålls jämfört med den specificerade, därför kan effekten från olika vindkraftverk av samma modell variera. På grund av påverkande faktorer för ett vindkraftverks effekt bör placeringen noga planeras och gärna simuleras före montering, speciellt för vindkraftverk i grupp. Vid installation av vindkraftverk i kallare regioner bör möjlig isbildning på rotorn tas i beaktning (Roberge, et al., 2022). Isbildning påverkar prestationen för den förnyelsebara energikällan och kan i större anläggningar vara en säkerhetsrisk, då större isbitar kan falla av under användning. System som motverkar isbildning finns till nyare vindturbiner och går även att eftermontera till en äldre modell.

Off grid-lösningar kräver energilagring av olika bredd för att fungera. Energilagringen bör planeras utgående från systemets design och dess geografiska position. Off grid-system på sydliga breddgrader kan klara sig med batterier som enda källa för energilagring på grund av god instrålning från solen året runt och mildare vintrar. Detta gäller dock inte på de nordligare delarna av klotet där en kombination innehållande både kortvarig och långvarig energilagring är mer passande (Puranen, Kosonen & Ahola, 2021).

## 2.2 Energilagring

Stabil lagring av energi i ett off grid-system är enligt Jossen, Garche och Sauer (2004) nyckeln till en fungerande cirkel i ett förnyelsebart energisystem. Eftersom speciellt strålningen från solen varierar från dag till dag och varierar grovt mellan säsongerna bör den energi som kan tas emot under året lagras (Dahash et al., 2019). Lagring av energi behövs eftersom vinterhalvårets brist på tillgänglig solenergi sammanfaller med tiden då klimatet är som mest påfrestande. Motsatsen sker under sommaren med mildare påfrestning från klimatet samt ett överflöd av tillgänglig solenergi.

Energilagringmetoder för off grid-sammansättningar består av elektrokemiska, kemiska och termiska lager. För att nå målet om ett självförsörjande system i kallare regioner utan input från elnätet krävs en kombination av kortvarig lagring och säsongslagring. Detta menar Puranen, Kosonen och Ahola (2021) är på grund av hur de förnyelsebara energikällorna fungerar, energin finns tillgänglig under naturens förutsättningar. Den kortvariga lagringen tillhandahåller energi till systemet under perioder då energins inflöde är större än utflödet. Energi sparas under dagen för nattens eller de kommande dagarnas behov. I dessa sammanhang sparas även energi i säsongslagringen för att sedan kunna användas under perioder då energiflödet in är mindre än det som är energikravet för byggnaden.

Ett off grid-system med hybridlagring främjar funktionen och minskar kostnader. Genom att inte enbart förlita sig på batterier för lagring av energi utan även använda sig av diesel som energikälla eller ett säsongslager kan kapaciteten på batterierna minskas (Marocco et al., 2022). Genom att kombinera batterier med vätgaslager nås en kostnadseffektiv lösning där vätgasens förmåga att på lång sikt lagra energi resulterar i att stora batteribanker blir helt onödiga. Dock är varken ett system med endast en dieselgenerator eller ett vätgaslager lönsamt i sig utan bör kombineras med batterier. Energilagringenheter från förnyelsebara energikällor bör enligt Cruickshank och Baldwin (2016) ha ett välfungerande flöde för lagring och konsumtion av energi. Dessa system ska effektivt kunna lagra energin under tider med överflöd och distribuera under tider med underskott. Utöver dessa egenskaper är även hög energidensitet och låga energiförluster viktiga för ett energieffektivt och

kostnadseffektivt system.

### 2.2.1 Kortvarig lagring

Med kortvarig lagring avses lagring från några dagar upp till några veckor. Detta sker till största del med elektrokemisk lagring, som blysyra- eller litiumbatterier. Batterierna lagrar energi för kommande närliggande behov till exempel nätter eller då önskad effekt inte uppnås. Kortvarig lagring fungerar även som en buffert för säsongslagring i kombinationer där vätgas används som säsongslagring. Batterier assisterar omvandlingen och effektiviserar processen för att bearbeta den varierande belastning som följer av konsumenternas ojämna elförbrukning (Puranen, Kosonen & Ahola, 2021). Även om elektrokemisk lagring är den mest använda metoden för kortvarig lagring används i vissa fall även termisk lagring av energi, till exempel mindre varmvattentankar. Dessa har en urladdningsperiod på ett par dagar och används ofta i kombination med större energilager och fungerar därefter som en buffert för variation i konsumtionen (Cruickshank & Baldwin, 2016). Storleken av ett kortvarigt lager som batterier ska dimensioneras efter systemets energibehov. I regel innebär detta att batterierna ska ha kapaciteten att lagra 3–10 gånger konsumenternas dagliga energibehov (Jossen et al., 2004).

Batterier är ett självklart val för kortvarig lagring på grund av flexibiliteten i användningen, lågt underhåll, hög verkningsgrad, snabb respons och pålitligheten. I förnyelsebara energisystem är både blysyra- och litiumbatterier goda val för kortvarig lagring. Litiumbatterier har börjat ta över rollen av blysyrabatterier på grund av den högre energidensiteten litiumbatterier besitter. Enligt Olabi et al. (2022) kan litiumbatterier lagra upptill 150 Wh per kilogram batteri medan blysyrabatterier endast kan lagra 25 Wh per kilogram. Förutom detta har även litiumbatterier möjligheten att urladdas djupare och snabbare än blysyrabatterier utan att ta skada, vilket resulterar i att litiumbatterier är med kostnadseffektiva i det långa loppet. Blysyrabatteriers livslängd förkortas om de urladdas till under 50% (Olabi et al., 2022).

Vid installation av batterier för lagring av förnyelsebar energi är priset för batteripaketet en viktig faktor. Litiumbatterier ger möjligheten till en högre

energidensitet men resulterar även i en större kostnad (Olabi et al., 2022). Priset per kilowattimme lagringskapacitet är enligt Kebede et al. (2021) i stationära anordningar 235,50 €/kWh för blysyrbatterier och 1555 €/kWh för litiumbatterier. En annan faktor att ta i beaktande vid val av batteripaket för ett förnyelsebart energisystem är miljöpåverkan. Blysyrbatteriers påverkan klassas som hög och litiumbatteriers som medium/låg (Kebede et al., 2021).

För att uppskatta blysyrbatteriers laddningsprocent mäts spänningen över batteripolerna. I ett 12 VDC (volt likström, eng. Direct Current), batteri anses batteriet vara fulladdat då spänningen når runt 12,85 VDC och urladdat vid runt 11,65 VDC. Vid användning av ett 48 VDC batteripaket multipliceras dessa värden med fyra (SunOn Battery, 2021). Ett batteripaket på 48 VDC skulle därefter vara fulladdat vid spänning över 51,3 VDC och urladdat vid 46,4 VDC (PVeducation, 2022). Dessa spänningar mäts under öppen krets, det vill säga efter att batterierna har kopplats bort från systemet. Laddning och urladdning av batterier påverkar den momentana spänningen i batteriet. Spänningen i batterierna vid olika laddningsprocenter påverkas även av tillverkarens använda material samt batteriets ålder (SunOn Battery, 2021).

### **2.2.2 Säsongslagring**

På långt nordliga och sydliga breddgrader där solinstrålningen är näst intill helt frånvarande under flera månader per år krävs energilagring i annan form än batterier. Orsaken är enligt Puranen, Kosonen och Ahola (2021) att produktionen och konsumtionen av energi inte matchar varandra i sådan grad att lagring med hjälp av batterier inte längre är lönsamt utrymmesmässigt eller av ekonomiska och rent praktiska skäl. I dessa fall är säsongslagring ett krav för att klara sig helt off grid. Detta innebär lagring av energi under en period med överskottsproduktion för att användas under en period med underskottsproduktion.

För att lagra energi från en säsong till en annan krävs stora lager av energi för att man ska kunna tillgodose systemets behov. Säsongslager kan som Marocco et al., (2022) beskriver motiveras som både en central del samt som en ekonomisk lösning för systemets funktion. Långtidslagring av energi ger möjligheten att kunna förlita sig på

enbart egenproducerad energi utan att använda en dieselgenerator med höga kostnader på daglig basis. Lagringen resulterar i att största delen av den tillhandahållna energin under året kan utnyttjas, vilket i sin tur resulterar i att energibristen under svårare perioder minskas. Genom detta förminskas kostnaderna under de mer krävande perioderna.

Genom att utnyttja den tillgängliga energin från högsäsong, det vill säga perioder då förnyelsebara energikällor producerar mer än det momentana behovet, främjas systemets helhet, eftersom säsongernas möjligheter att producera inte överensstämmer med konsumtionsbehovet under alla säsonger (Cruickshank & Baldwin, 2016). Genom att spara överskottsenergi från sommaren i form av värme öppnas möjligheten att bruka egenproducerad värmeenergi under den mer problematiska perioden på vinterhalvåret. Enligt Marocco et al. (2022) finns risken att systemet som helhet blir större än absolut nödvändigt, under största delen av året, på grund av viljan att säkerställa en konstant energitillförsel. Detta är dock nödvändigt för att klara sig off grid.

Ett populärt och aktuellt alternativ när det gäller säsongslagring är vätgas. Denna lagringsmetod är välanpassad till säsongslagring tack vare dess egenskap att lätt kunna utvidgas vid behov och att energin inte försvinner, förutsatt att tryckbehållarna för gasen inte läcker. Nackdelen med vätgaslagring är att nettoeffekten som fås ur lagringen är betydligt lägre än effekten som läggs in, på grund av att energin ska omvandlas vid produktion av vätgas och vid konsumtion (Puranen, Kosola & Ahola, 2021). På grund av detta är vätgas inte ett alternativ för kortvarig lagring och bör därför kombineras med batterier för att systemet som helhet ska nå sin tänkta potential.

Elektrolys, vätgaslager och bränslecell är nyckelkomponenterna i ett vätgassystem. Vatten går genom elektrolysen för att producera vätgas som senare vid behov används i bränslecellen för att producera elektrisk energi (Lagorse et al., 2008). Verkningsgraden för elektrolysen är enligt Barbir (2005) och U.S. Department of Energy (2014) runt 70 % och för bränslecellen 50 % enligt Puranen, Kosonen och Ahola (2021) samt 40 % enligt Lagorse et al. (2008). Utöver den elektriska energin fås även spillvärme från elektrolys och bränslecell som kan användas för uppvärmning,

vilket ytterligare höjer verkningsgraden. Ett komplett vätgassystem har inga utsläpp eftersom fossila bränslen ej används, trots detta är de inte lika brett använda som dieselgeneratorer på grund av ekonomisk lönsamhet. Det är dock förutspått att vätgassystem får en ökad ekonomisk lönsamhet genom stigande bränslepriser och sjunkande pris på bränsleceller (Wang et al., 2022).

Säsongslager i form av varmvattentank ger möjlighet till långtidslagring utan de större kostnader som omfattar lagring i form av vätgas. Energilagring i varmvattentank har fått större uppmärksamhet under de senaste åren och ses som en möjlighet att effektivisera och korrigera brister från förnyelsebara energikällor, som tillgänglighet vid behov. Lagring av energi i varmvatten uppfyller kraven för säsongslager genom att snabbt vid behov ge möjligheten att distribuera värme till byggnader. Varmvattentanken har dessutom enligt Dahash et al. (2019) potentialen att lagra värmeenergi i flera månader.

Lagringsenheten kan placeras på marknivå men även grävas ner, detta beroende på områdets möjligheter samt önskemål från ägaren av området. En stor lagringstank resulterar i en stor kontaktarea till omgivningen och bör därför utrustas med tjock isolering (Dahash et al., 2019). Detta görs enligt Cruickshank och Baldwin (2016) vanligast med till exempel polyuretan eller glasull. På grund av detta kommer installationskostnader i kallare klimat att öka. Detta är dock nödvändigt för att bevara energin till det tänkta syftet i fråga.

Vid lagrande av värmeenergi är vattentankar det populäraste alternativet, både på grund av vattnets egenskaper och konstruktionen av lagringsenheten. Vatten har en hög värmekapacitet, vilket leder till att stora mängder energi kan lagras på en relativt liten yta och är lätt att fördela till målområden genom en pump. Detta resulterar enligt Aktaş och Kirçiçek (2021) i att vatten är den vanligaste vätskeformen att använda i flytande energilagring tack vare dess kostnadseffektiva och väl presterande egenskaper. Vattentankar som används till mindre ändamål för säsongslagring av energi, som till exempel för mindre grupper av hus, är fortfarande så pass små att de kan levereras kompletta till platsen. Detta kan ske utan att stora markarbeten behöver göras som kan störa byggnadsprocessen på området (Cruickshank & Baldwin, 2016).



Vid användning av jord- eller bergvärme kan marken runt kollektorslangen, som är slangen var energikällan cirkulerar, användas som ett säsongslager (Naranjo-Mendoza, et al., 2019). Marken värms upp av solen under sommaren och lagrar energin som värme. Denna värme används därefter av värmepumpen under året för att hålla byggnaden uppvärmd. Utöver detta finns möjligheter att sommardag köra ner värme i marken, eftersom här ofta finns ett energiöverskott. Detta är speciellt viktigt i kallare klimat där uppvärmning av utrymmen är vanligare än nerkyllning. Markens temperatur kan minska om energibehovet är större än den balans som naturen själv kan upprätthålla på området. Lagring av denna typ är främst avsedd för att bibehålla balansen i jordmånen för att kommande säsong kunna köra pumpen på samma verkningsgrad som tidigare. Lagring av termisk energin i jordmånen har visat ekonomiska fördelar vid användning av en passande design. Lagringen är oftast av låg temperatur för att kompensera konsumtionen från kallare perioderna men även lagring av hög temperatur är möjlig. Lagring av hög temperatur kräver en energikälla som kan köra ner varmare temperaturer än den som värmepumpen klarar av samt att området som fungerar som ett värmelager behöver avgränsas med isolering. Lagring av hög temperatur är ovanligare eftersom lösningar med varmvattenlager tenderar att prestera bättre. Dock finns en fördel med termisk lagring av höga temperaturer i fall där energibehovet är stort och ingen naturlig vattenreserv finns till förfogande. I dessa fall blir konstruktionen av en stor vattentank som ska grävas ner för att lagra vatten dyrare.

### **2.3 Energoptimering i off grid-system**

Optimeringar i off grid-system baseras på förbättringar i energianvändningen för den tillgängliga energin som finns att förbrukas. Optimeringar görs genom att analysera behovet med hjälp av beräkning, simulering eller undersökning av förhållanden och händelser (Cho & Valenzuela, 2022). Det sökta resultatet för optimeringar kan vara att öka flexibiliteten, ekonomin eller funktionen. Detta kapitel går igenom den teoretiska bakgrunden till relevanta områden i off grid-systemet på Meteorian som senare implementeras i beräkningar och analyser.

### 2.3.1 Varmvattentank

Varmvattentankens design påverkar potentialen i energilagring. Genom en välplanerad design som möter det tänkta syftet fås en kvalitativ säsongslagring. Designen av varmvattentanken rör inte enbart storleken utan proportioner, kopplingars position, energitillförsel samt isolering påverkar direkt tankens potential. Som lagringsenhet för energi är målet att energidensiteten ska vara så hög som möjligt, vilket uppnås genom att åstadkomma en så hög temperatur i tanken som möjligt, genom exempelvis ett ökat tryck och god design. För att hålla hög energi i tanken tenderar temperaturskiktning att vara en viktig aspekt. Temperaturskiktning innebär att vatten med olika temperaturer bildar olika skikt, där den varmaste massan är i tankens övre del och den kallaste i tankens nedre del (Cruickshank & Baldwin, 2016).

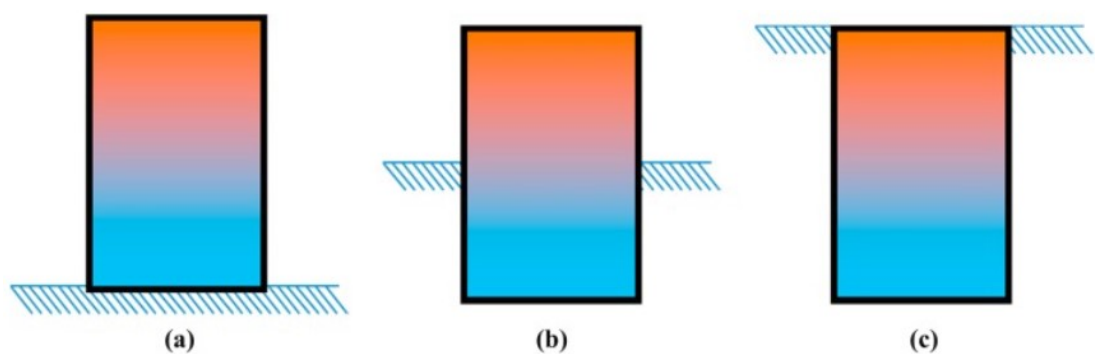
Storleken på en varmvattentank beror på lagringsbehovet i det tänkta systemet, vilket delvis kan kringgås genom att trycksätta tanken. Genom trycksättning av tanken möjliggörs en högre energidensitet och en lägre totalvolym för att möta den planerade lagringsbara energimängden (Aktaş & Kirçiçek, 2021). Högre energidensitet uppnås tack vare en förhöjd kokpunkt under tryck. Trycksättning av varmvattentankar är en åtgärd som förhöjer de totala kostnaderna för konstruktionen. Fördelar med trycksättning ur ett kostnadsperspektiv börjar synas vid volymer över 30 m<sup>3</sup>, vilket är orsaken till att tankar av mindre volymer vanligtvis inte är trycksatta. Varmvattentankar som lagringsmedium kan motiveras med att enheterna är lätta att installera och att de har ett brett användningsområde med låga kostnader och hög värmekapacitet. Trycksatta varmvattentankar är enligt Dahash et al., (2019) mer avancerade än tankar med atmosfäriskt tryck. Varmvattentankar med ett förhöjt internt tryck är utrustade med bland annat fler ventiler och termostater för att säkerställa funktionen samt skydda mot olyckor. Trycksatta tankar kräver mer tillsyn, vilket bidrar till en förhöjd totalkostnad i form av underhåll men även under designskedet.

Varmvattentankens dimensioner påverkar prestandan. Större enheter tenderar att prestera bättre än mindre, även om de har samma energidensitet. Orsaken till prestationsskillnaden är förhållandet mellan mantelarea och volym. Större varmvattentankar har jämförelsevis ett lägre förhållande än mindre tankar. En större

varmvattentank resulterar dock i en större total lagrad energimängd, vilket systemet i fråga inte nödvändigtvis har kapacitet till att utnyttja. En annan metod för att minska förlusterna är stora lager med lägre energidensitet, vilket enligt Hesaraki, Holmberg och Haghghat (2015) ger möjlighet till ett lägre förhållande mellan mantelarea och volym för att minska förluster. En varmvattentank med lägre energidensitet besitter dessvärre en temperatur som kan vara lägre än 30 °C, vilket gör att temperaturen inte är användbar som den är. Större varmvattentankar med lägre energidensitet kan med fördel kombineras med en värmepump, för att utnyttja potentialen i den lagrade energin. Kombinationen kan exempelvis användas till uppvärmning av bruksvatten eller utrymmen.

### 2.3.2 Isolering av varmvattentank

För att motarbeta energiförluster i lagring av energi krävs förebyggande åtgärder. Varmvattentanken kräver en god isolering för att prestera enligt önskad nivå, där det mest kostnadseffektiva alternativet för detta ändamål är en välisolerad vattentank på marknivå. Nackdelen med en vattentank på marknivå är att den kraftigt utsätts för omgivningens förhållanden, speciellt under vintertid, samt att den tar upp ett stort synligt område. Andra lösningar för att motarbeta energiförluster är att delvis eller helt gräva ner varmvattentanken, där det senare alternativet resulterar i en ökad kostnad på upp till 30 % av totalkostnaden (Cruickshank & Baldwin, 2016). Ökade kostnader för nergrävda tankar uppstår från jordarbetet för de större vattentankarna, vilket inte nödvändigtvis gäller för mindre anordningar. Exempel på varmvattentankars montering visas i figur 1.



Figur 1: Olika typer av konstruktion för varmvattentankar. Där (a) är marknivå, (b) delvis nergrävd och (c) helt nergrävd (Dahash et al., 2019).

Med isoleringsförluster avses lagrad energi som försvinner till omgivningen. Förluster i isolering för ett termiskt lager, så som varmvattentankar, går inte helt att undvika på grund av att förlusterna är direkt proportionerliga till kontaktarean och lagringsmediet men även lagringstiden. Enligt Aktaş och Kirçiçek (2021) är en välplanerad isolering en central detalj för att undvika stora energiförluster från vattentankar, speciellt vid lagring under en längre tid. Som isoleringsmaterial av varmvattentankar används ofta polyuretan, som har goda egenskaper med högt  $\lambda$ -värde (Pinamonti et al., 2021). Polyuretans tjocklek kan exempelvis vara 30 cm, vilket anses vara en god isolering. För att kontrollera den valda sammansättningen av isoleringen beräknas den teoretiska förlusten från den valda sammansättningen med omgivande mediets temperatur. Förslagsvis kan en nergrävd vattentank antas vara omringad av jord som har samma temperatur som den genomsnittliga utomhustemperaturen för området. För att vidare motverka isoleringsförluster i varmvattentankar med temperaturskiktning kan isoleringen enligt Ghaddar (1994) fördubblas i tankens övre del där temperaturen inne i tanken är som högst.

Fördelar med nergrävda vattentankar är bland annat bättre utrymmesoptimering, eftersom andra anordningar kan placeras ovanpå, samt att anordningen är belägen i en mildare omgivning speciellt under vintertid. Genom att vattentanken är nergrävd är kravet på tilläggsisolering inte lika stort, på grund av att den varmare jordmassan under marknivå inte har samma kylande effekt som den kalla vinterluften. En delvis nergrävd varmvattentank är ytterligare ett annat alternativ som kombinerar de två tidigare nämnda alternativen. Fördelen med en delvis nergrävd vattentank jämfört med en helt nergrävd vattentank är att markarbetet blir betydligt billigare och mindre omfattande eftersom jordmassorna som erhålls med fördel kan läggas runt tankens övre del (Cruickshank & Baldwin, 2016). Däremot kräver tankens översta del, som inte är nergrävd eller skyddad med jord, en isolering. Isoleringen behöver dock inte vara lika omfattande för hela vattentanken som i alternativet där vattentanken är placerad på marknivå. Nergrävda varmvattentankar har även fördelar som minskade effektkrav på pumpanordningar, eftersom toppen av tanken är närmare i nivå med konsumenten i systemet.

### 2.3.3 Temperaturskiktning i varmvattentank

Temperaturskiktning nås genom att låta vattnet i tanken med hög energidensitet vara ostört. Vattnet delar sig naturligt och bildar skikt där den energirika massan, det vill säga det varma vattnet, samlas i tankens övre del och det kallare vattnet samlas mot tankens nedre del. Tankens övre del som fungerar som den energilagrande delen ska ha en design som låter massan vara ostörd, så att det varmare vattnet inte ska blandas med det kallare och tappa temperaturskiktningen (Cruickshank & Baldwin, 2016). Temperaturskiktningens kvalitet hålls genom att kontrollera kopplingar i kontakt med massan. Skiktningen främjas genom att ett lågt vattenflöde in till och ut ur tanken. Enligt Shah, Andersen och Furbo (2005) kan beroende på krav även skydd tilläggas för att vidare främja temperaturskiktningen, som diffusorer eller stratifierare. Dessa dämpar och utjämnar flödet in till vattentanken vilket skyddar den värmebärande massan från att blandas med kallare vattenmassor. Installation av skydd för temperaturskiktningen tenderar dock enligt Cruickshank och Baldwin (2016) att leda till högre kostnader för lagringsenheten.

Isoleringsförluster till omgivningen förstärker temperaturskiktning för vatten av olika temperaturer. I en jämnvarm vattentank kyls vattnet intill väggarna ner på grund av att energin förflyttas genom väggarna till omgivande material. Detta resulterar i att vätskan blir tyngre och söker sig till botten av tanken. Den större vattenmassan som befinner sig i mitten av tanken skjuts därefter upp till tankens övre del och bildar ett område med hög energidensitet. Tankens höjd till diameter förhållande påverkar resultatet av temperaturskiktningen (Fan & Furbo, 2012). I vattentankar med ett lågt förhållande på höjd till diameter fås en liten temperaturskillnad och i tankar som har ett högt förhållande fås en större temperaturskillnad. Detta påverkar även stabiliteten av skikten, ostabilare skikt vid lägre och stabilare vid högre förhållanden. Vattnets skiktning i olika temperaturer resulterar enligt Cruickshank och Baldwin (2016) i att ett system med termisk solfångare och varmvattentank med temperaturskiktning kan ha 37% högre verkningsgrad än en vattentank som är jämnvarm av samma storlek. Detta resulterar i en högre effektivitet och en delvis mer praktisk design, tack vare att diverse olika temperaturer finns till förfogande. Författarna poängterar även att denna procent beror på det närliggande systemets design och funktion samt momentana

händelser i direkt kontakt.

Olik geometri på förvaringsenheten påverkar tankens kapacitet. Vertikala varmvattentankar ger bäst resultat i frågor om temperaturskiktning, eftersom skikten ges större utrymme och att flöden inte påverkar strukturen i skikten lika kraftigt som en vågrät monterad tank. Tankens egenskaper i temperaturskiktning förbättras ju större höjden är i förhållande till bredden (Cruickshank & Baldwin, 2016). Förbättringen sker tills kontaktarean till omgivningen blir för stor och förluster mot isolering kommer emot. Ett förhållande där höjden är tre till fyra gånger diametern anses vara en bra kompromiss för att nå de önskade egenskaperna i skiktning utan att förlusterna i isolering och ekonomi blir för stora.

#### **2.3.4 Schemalagd förbrukning**

Off grid-systemets belastning är direkt påverkat av användaren i fråga. Eftersom systemet i sig inte är kopplat till elnätet som har en mer eller mindre obegränsad kapacitet bör förbrukningen i direkt kontakt till systemet planeras. Detta gäller i synnerhet system som är starkt beroende av solens instrålning på solpanelerna, vilket direkt påverkar energiflödet till systemet (Puranen et al., 2021). Vid låg instrålning bör kraftigt energialstrande produkter stå stilla, för att vitala delar ska få den energi som krävs samt att flödet når en balans. Därför bör de större konsumenterna schemaläggas till tider då produktionen är som högst på dygnet, enligt solens bana eller automatiseras genom kommande vindstyrka. En optimering som detta innefattar att hela hushållets elektronik ska kunna regleras till en mer kontrollerbar helhet.

#### **2.3.5 Värmepump**

Verkningsgraden för en värmepump bestäms efter dess design och förutsättningar från omgivningen. Kompressorn och värmebärande mediet i pumpen bör vara dimensionerade för ändamålet. De är dock inte de enda komponenterna som bestämmer verkningsgraden för värmepumpen. De viktigaste faktorerna för att öka effektiviteten på en värmepump är att kunna kontrollera temperaturen hos källan och även temperaturen hos målet för uppvärmning. Ju längre dessa två temperaturer är från

varandra desto lägre verkningsgrad uppnås från arbetet som läggs in. Värmepumpens verkningsgrad beskrivs genom ett COP-värde (eng. Coefficient of Performance), vilket är koefficienten på värmepumpens verkningsgrad. Genom att höja energikällans temperatur fås enligt Hesaraki, Holmberg och Haghghat (2015) en förbättring av COP-värdet med 2–4 % för varje grad. Det samma gäller målområdet temperatur där COP-förbättras med 1–2 % för varje grad som temperaturen sänks. Enligt Pinamonti et al. (2021) höjs prestandan genom integrering av en vattenvärmepump för ett redan existerande system med varmvattentank. Till skillnad från en luftvärmepump används vatten som värmekälla i en vattenvärmepump och kan kombineras med ett varmvattenbaserat säsongslager för att utnyttja hela potentialen. Fördelar med värmepumpar är deras höga COP-värde, det vill säga förhållandet mellan erhållen värmeenergi och tillförd elektrisk energi. Genom att erhålla ett högt COP-värde avlastas kompressorn och värmepumpen möter behovet med mindre förbrukad energi.

Den vanligaste typen av värmepumpar är luftvärmepumpar som använder sig av utomhusluftens energi för att värma mediet inne i pumpen. Dessa luftvärmepumpar har god prestanda under största delen av året, men tappar en avsevärd del prestanda under perioder där utomhusluften är som kallast. Typiska COP-värden för en luftvärmepump är 2,9 till 4,2, vilket betyder att energin som fås ut ur pumpen är 2,9 till 4,2 gånger högre än den elektriska energin som konsumeras (Pinamonti et al., 2021). Vattenvärmepumpar använder sig exempelvis av en varmvattentank för att värma mediet inne i pumpen. Eftersom denna vätska är varmare än utomhustemperaturen erhålls ett större COP-värde för vattenvärmepumpen än för luftvärmepumpen. Vattenvärmepumpen kan i kombination med ett säsongslager i form av varmvattentank nå COP-värden på upptill 5–6 tack vare den mindre temperaturskillnaden. Kombinationen vattenvärmepump och säsongslager resulterar i att varmvattentankens energi räcker längre samt att dess temperaturskiktning hålls lättare intakt.

Luftvärmepumpar förlorar sin effektivitet under kallare perioder då utomhusluften, som fungerar som energikälla, når kraftiga köldgrader. Dessa pumpar förbättrar ekonomin i uppvärmning av utrymmen under största delen av året men fallerar när värmen behövs som mest. En lösning för uppvärmning under hela året är enligt Lee et

al., (2022) jordvärmepumpar, eller bergsvärmepumpar, som använder den lagrade värmen i marken som energikälla. Jordvärmepumpar har en högre installationskostnad på grund av markarbetet men kan under vintern verka med ett högre COP-värde i jämförelse med luftvärmepumpen, vilket i sin tur sänker pumpens elförbrukning. Marken har en högre temperatur än utomhusluften under den kallare perioden på året. Eftersom pumpen utnyttjar markens energi kan temperaturen i det aktuella området sjunka under åren, vilket i sin tur försämrar verkningsgraden för pumpen. Eftersom behovet för uppvärmning är större än kylning i det nordliga klimatet kan en obalans i marken skapas då mer energi pumpas ut än in. Om balans inte går att uppnås finns det möjlighet till att kombinera termiska solfångare eller en varmvattentank med jordvärmepumpen (Emmi et al., 2015). Termiska solfångare alstrar värme från solen under året, vilket pumpas ner i jordvärmepumpens uppsamlingsområde för att användas under vintern. Lagrad energi i en varmvattentank kan även direkt användas som energikälla till värmepumpen under perioder då högre verkningsgrad önskas. Jordvärmepumpars COP-värde kan variera nämnvärt under åren beroende på solens instrålning och markens temperatur.

För att jordvärmepumpar ska kunna alstra energi från marken behövs en kollektorslang som monteras vågrätt eller vertikalt. Vid vertikal montering kallas det bergvärme och vid vågrät montering jordvärme (Thermia, 2022). Fördelen med jordvärme är bland annat energikällans mer stabila temperatur än den hos en luftvärmepump, där energikällan är den omgivande luften. Användning av jorden som energikälla gör att kraftiga förändringar i temperaturen inte påverkar prestandan. I kallare klimat där uppvärmning är mer dominant än kylning under året finns enligt Emmi et al., (2015) risk för obalans i markens energi. Markens obalans motverkas om möjligt med att köra ner energi i marken under sommaren genom att kyla byggnaden eller, som tidigare nämnt, med hjälp av en varmvattentank. Genom att kyla byggnaden körs värme ner i kollektorslangen, som därefter kan upptas av marken. Även om klimatet i området medför en risk för problem i markens energibalans finns möjligheten att problemet löser sig själv eller ej inträffar. Markens energibalans påverkas av hur grundvattenströmmar och andra geologiska strukturer ser ut på området samt storleken av energibehovet för byggnaden.



Enligt Naranjo-Mendoza et al. (2019) är jord- eller bergvärmepumpen ett stabilare och mer praktiskt val av uppvärmning i kallare regioner, tack vare energikällans placering. Fördelarna är, i jämförelse med luftvärmepumpen, bland annat att ingen extern värmekälla behövs under de kallaste perioderna, samt ingen risk för isbildning i förångaren. Dessutom har jord- eller bergvärmepumpen en bättre termisk stabilitet i energikällan och en lägre energikonsumtion. Utöver detta har marken som energikälla en högre genomsnittstemperatur under den kallare delen av året än luftvärmepumpens energikälla, vilket förhöjer COP-värdet. Även om temperaturen i marken påverkas av årstidernas inverkan är detta inte lika märkbart som i fall där luften är energikällan. Största nackdelen med jord- eller bergvärmepumpen är installationsprocessen som innebär markarbete och en högre kostnad. Kostnadsökningen är främst märkbar för bergvärme där en ökning på 20–30 % i jämförelse med luftvärmepumpen är att förvänta. Risken för obalans i jordmänen, där temperaturen gradvis sjunker under åren, når till slut en ny lägre balans. Detta kan i extrema fall motverkas för bergvärmepumpar genom att borrhålen görs djupare, vilket medför ytterligare förhöjd kostnad för installationen.

## **2.4 IoT – Internet of Things**

IoT, Internet of Things eller sakernas internet, är kommunikation mellan fysiska enheter som möjliggör övervakning och styrning av processer på distans. Enheter kommunicerar och rapporterar sinsemellan för att optimera funktionen i ett system. IoT-teknik är möjlig att implementera till allt som kan kommunicera över internet (Kiran, 2019). Grunden i tekniken är att modernisera, effektivisera samt att ta bort kravet på att en människa måste vara närvarande för processens utförande. I fall där stort antal olika data behöver avläsas med täta mellanrum är IoT-system en ekonomisk förbättring. Nya eller gamla sensorer, som modifierats, registrerar data utan den mänskliga kontakten, som ökar kostnaderna (Shamshiri, et al., 2019).

Användning av IoT i området för off grid-system möjliggör kommunikation inom energisystemet. IoT samlar och bearbetar data från off grid-systemet som därefter möjliggör en större kontroll över energisystemet (Bisaga, et al., 2017). Kommunikation inom energisystemet skapar en helhet som främjar systemets

funktion. Eftersom data från sensorers avläsningar samlas i en databas är värden lättillgängliga, vilket förenklar analyser av registrerade händelser och effektiviserar ansamlingen av data. Utöver att systemet registrerar och rapporterar värden kan även avvikande händelser automatiskt rapporteras till administratörer för systemet (Mudaliar & Sivakumar, 2020). Eftersom tekniken möjliggör större kontroll över ett valt system genom att kunna följa med diverse processer på distans kan IoT implementeras på ett brett urval av branscher. De valda komponenterna för ett IoT-system beror på användarområdet, Raspberry Pi är en av de vanligaste tack vare användarvänligheten. Raspberry Pi är kompakta datorer som möjliggör uppbyggnaden av datasystem utan stora kostnader (Raspberry Pi, 2022).

Ett IoT-system kan bestå av sensorer, Raspberry Pi, moln (databas, webbtjänst, kontrollapplikation, övervakningsapplikation) och presentationsenheter, som datorer och telefoner (Mudaliar & Sivakumar, 2020). Enheten programmeras utifrån användningsområdet. Moln som till exempel MQTT möjliggör kommunikation mellan databas och enheter. Data registreras från sensorer som därefter kategoriseras och publiceras av MQTT till en förvald slutdestination i databasen (MQTT, 2022).

### 3 MATERIAL OCH METOD

I detta kapitel behandlas arbetets material, som har erhållits av Hans Lindén (2021) i form av presentation och diskussion om energisystemets uppbyggnad vid Meteorian. I kapitlet förklaras energisystemets sammansättning samt arbetets metod.

#### 3.1 Fall: Meteorian

Meteorian är ett besökscenter i Vasa beläget på Söderfjärden. Söderfjärden har uppkommit från ett meteoritnedslag för 520 miljoner år sedan som med tiden bildade ett platt område som till största del är täckt av jordbruksmark med besökscentret placerat i mitten (Meteoria, 2021).

Meteorians off grid-systemet fick sin början från det faktum att fast el ansågs vara för dyrt att dra till platsen och av en vision om en testanläggning för förnyelsebar energi i Vasa. Genom åren har Meteorians energiförsörjning utvecklats i takt med verksamhetens behov. Energiförsörjningen började med en vindturbin och en dieselgenerator och har under senare år förbättras med solpaneler samt biodiesel till generatoren. Meteorians off grid-system övervakas med sensorer kopplade till en IoT-databas som rapporterar avlästa data. Data från systemet och väderförhållanden har registrerats sedan 2019 och möjliggör analys samt styrning av systemet på distans.

Utställningsladan Meteorian, *Meteoria Exhibition*, var områdets första byggnad och uppvärmda byggnaden, *Meteorite Barn*, är i dagsläget den enda uppvärmda byggnaden. Byggnaden består av en föreläsningssal och värms av en luftvärmepump som drivs av den förnyelsebara energin som är producerad i off grid-systemet. Utställningsladan presenterar fynd från meteoritnedslaget på Söderfjärden och är därtill utrustad med ett astronomiskt observatorium. Energilagringen i systemet består av en batteribank som befinner sig i Energikällaren, *Energy cellar*, där också biodieselgeneratoren samt övrig utrustning för solpaneler och vindkraftverk är installerade. Meteorians byggnader, förnyelsebara energikällor samt övriga konstruktioner visas i figur 2.



Figur 2: Meteorians byggnader, energikällor och energilagring (Lindén, 2021).

Meteorian fungerar idag dels som en demomiljö för diverse utrustning inom förnyelsebar energi, dels som ett besökscenter. Målet med det installerade energisystemet är att verksamheten på området ska kunna vara aktiv under hela året.

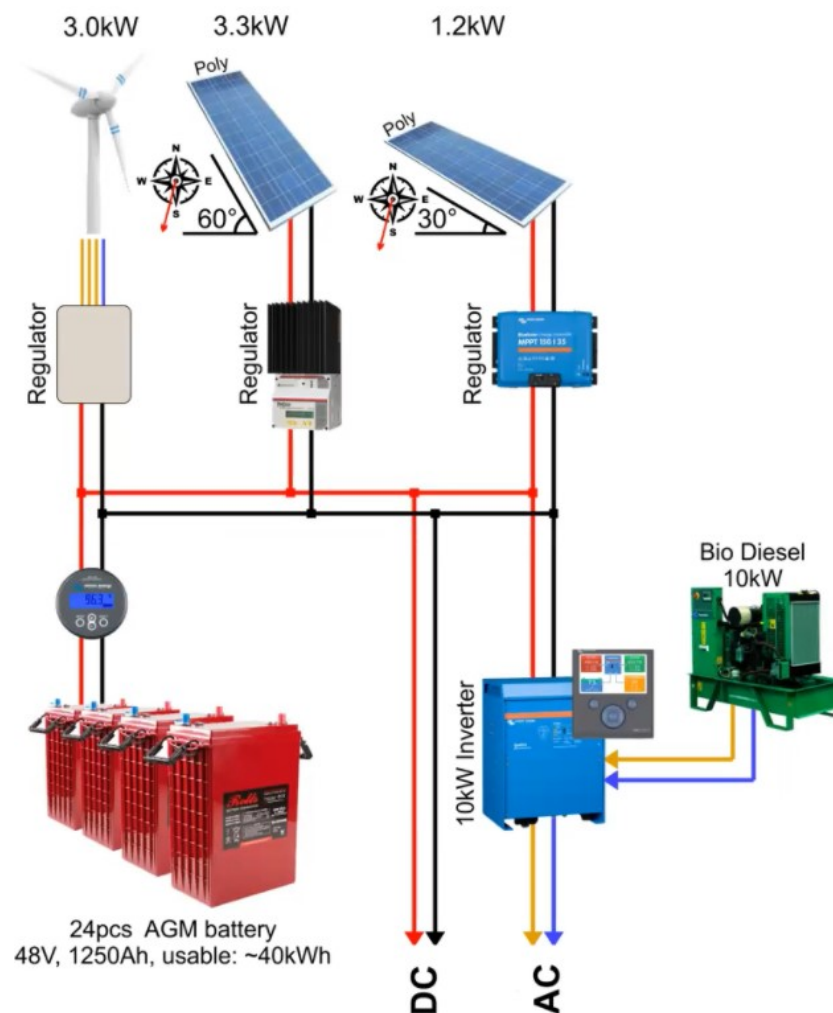
### 3.1.1 Det nuvarande energisystemet vid Meteorian

Det befintliga energisystemet består av elproduktion från solpaneler och ett vindkraftverk, med en biodiesलगenerator som backup. Energisystemet har planerats och byggts upp av Hans Lindén, projektingenjör vid Yrkeshögskolan Novia, tillsammans med samarbetspartners. Solpanelerna och vindturbinen omvandlar sol och vindenergi till elenergi, som därefter lagras i en batteribank. Batteribanken är placerad i en jordkällare som har getts namnet Energikällaren.

I energikällaren finns systemets nyckeldelar så som regulatorer, inverter, konverter, generatoren samt en kontrollpanel. Regulatorerna reglerar inkommande likström, DC, från solpanelerna och inkommande växelström, AC, från vindturbinen till 48 VDC för att passa in med det resterande systemet. Invertern står mellan DC- och AC-kretsarna och har även generatoren kopplad till sig. Generatoren körs vid behov och kan startas automatiskt, manuellt och på distans. Då generatoren körs matas 230 VAC (volt växelström, eng. Alternating Current) till systemet som därefter kan användas till förbrukning och för att ladda batterierna i 48 VDC-systemet genom invertern. Energikällaren styrs delvis genom Victrons, inverterns märke, styrsystem och övervakas via Modbus som därefter övervakas av det egna systemet. Modbus är ett kommunikationsverktyg som möjliggör utbyte av data mellan enheter, sensorer och

mätinstrument (Modbus, 2022). I detta fall används Modbus för att kommunicera mellan sensorer, enheter och styrsystemet.

Elproduktionen i det befintliga systemet består av två grupper solceller, ett vindkraftsverk och en biodieselgenerator. Solcellerna har en effekt på 1,2 kW respektive 3,3 kW och vindkraftverket på 3 kW. I fall där den förnyelsebara energiproduktionen inte räcker bidrar generatören till energisystemets tillförsel på elektricitet. Exempel på produktion av förnyelsebar energi och generatorns inverkan presenteras i figur 8. Den förnyelsebara energin lagras i en 48 VDC batteribank på 1250 Ah. Energikällarens komponenter samt vindkraftverket och solcellerna presenteras i figur 3. Systemet är byggt på 48 VDC och genom en inverter fås 230 VAC till förbrukning.



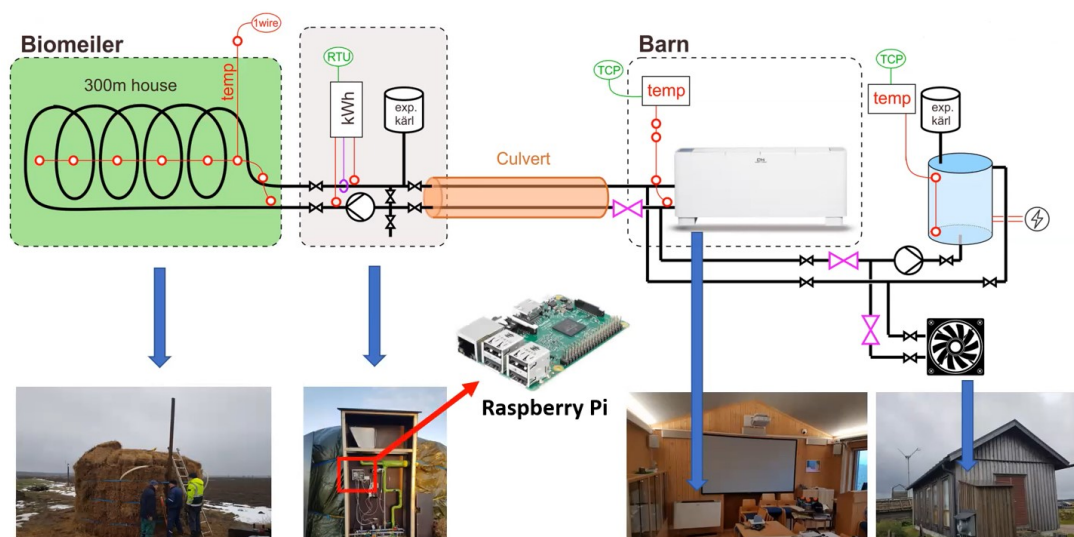
Figur 3: Energikällarens komponenter samt vindkraftverk och solceller (Lindén, 2021).

Utöver batterier finns även en varmvattentank som möjliggör energilagring. Varmvattentanken på 500 liter används för tillfället främst till att dumpa energi, vilket leder till att solpanelerna kan ladda mer. Solpanelerna slutar ladda då batterierna är fulla. Eftersom detta är en demomiljö, där potentialen i sol- och vindenergi demonstreras, behöver batterierna tömmas i syfte att få mer korrekt statistik över solpanelerna. Detta sker genom en fläkt som kyler ner varmvattentanken sommartid. Energi som matas till varmvattentanken tas vanligen inte tillbaka till systemet.

Konsumtionen i systemet består av uppvärmning av lokalen, belysning, kameror, IT-system, väderstation samt bruksel. IT-system och kameror är prioriterad konsumtion, vilket ger möjlighet att följa med energisystemet, övervaka och styra generatoren även under svårare förhållanden. Elkonsumtionen vid Meteorian är varierande beroende på i vilken grad lokalen används och på temperaturen utomhus. Kontinuerlig förbrukning i systemet utgörs av förbrukningen från IT-systemet och övervakningskameror.

Uppvärmning av lokalen sker med en luftvärmepump, Mitsubishi FH35. Luftvärmepumpen är modellanpassad för nordiska klimat med kalla vintrar och har en värmegaranti för utomhustemperaturer ner till  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Utöver detta har även luftvärmepumpen en energisparfunktion för en grundtemperatur på  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (20grader, 2011).

För uppvärmning finns även en kompost som kan förse byggnaden med värme, dock inte tillförlitlig. Komposten förser konvektorn inne i Meteorian med varmvatten som värms från nerbrytningsprocessen i komposten och pumpas därefter till konvektorn. Komposten består av  $50\text{ m}^3$  material med 300 meter slang som är fördelad inuti massan. Komposten är endast isolerad med halmbalar och är belägen intill byggnaderna, det vill säga i mitten av en åker. Detta gör att komposten kyls ner kraftigt under vintern, men klarar fortfarande av att ge relativt bra värme till lokalen under hösten. Eftersom komposten förbrukas med tiden fylls den på vid behov och möjlighet från lokala resurser. Komposten är ett tidigare försök på att utjämna tillgången på energin under året. Den existerande mindre vattentanken samt komposten som är sammanlänkad med konvektorn presenteras nedan i figur 4.



Figur 4: Kompost, styrenhet, konvektorn inne i uppvärmda byggnaden samt mindre befintlig varmvattentank (Lindén, 2021).

### 3.1.2 Meteorians IoT-system

Materialet för detta arbete består av en databas med ansamlade data från upp till två år tillbaka. Datat i databasen kommer från sensorer som är monterade i energisystemet. Dessa sensorer erhåller värden som därefter registreras i databasen, där de kan analyseras. Data publiceras i grafisk form, vilket ger möjlighet till att snabbt kunna hitta kritiska punkter i historiska data för att på så sätt dra slutsatser om hur komponenter samspelar.

Off grid-systemet på Meteorian består av fem Raspberry Pi-datorer, som övervakar och styr systemet med hjälp av IoT. Det här medför möjligheten att övervaka och styra systemet på distans. Data som ansamlas från systemet publiceras på [iot.novia.fi](http://iot.novia.fi) som är öppet för allmänheten. De data som är öppna för allmänheten är i grafisk form, vilket gör djupare analyser problematiska. För att analysera data på djupare nivå finns rådata som administratörer för systemet har åtkomst till. Från [iot.novia.fi](http://iot.novia.fi) fås data som rör uppvärmda byggnaden, energi och väder.

Sensorerna registrerar data från händelser i energisystemet. Sensorernas värden registreras därefter av Raspberry Pi-datorer som är utplacerade i off grid-systemet. Positionerna på de fem Raspberry Pi-datorerna visas i figur 2. Raspberry Pi rapporterar värdena vidare till MQTT servern. Det installerade IoT-systemet består av sensorer,

Raspberry Pi-datorer, server och databas. Raspberry Pi-datorerna används i detta fall som kommunikationsverktyg på de olika områdena i systemet.

Ett arbete som beskriver planeringen och installationen av IoT-systemet i fråga är för tillfälle under bearbetning.

I detta arbete används data från sensorer för solceller, vindkraftverk, generator, batterier, temperatur, luftvärmepump, fläktarna i utställningen och den mindre varmvattentankens värmare.

### **3.2 Säsongslagring i varmvattentank**

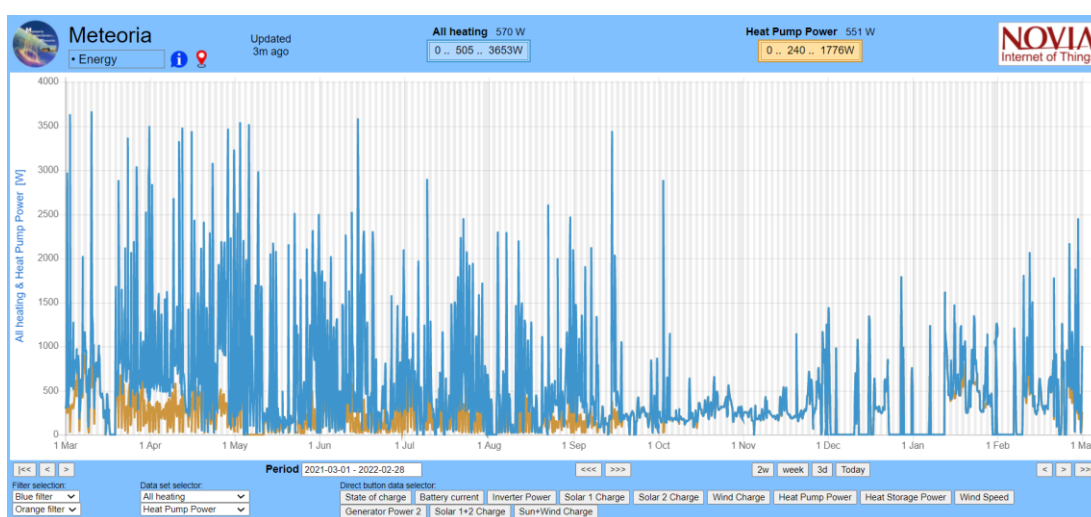
För att undersöka möjligheten för säsongslager krävs en analys på produktionen och konsumtionen av elektricitet samt påverkande faktorer som temperaturskillnader. Från databasen Novia IoT (2022a; 2022b; 2022c) tas data från kategorierna *Energy*, *Barn* och *Weather*. Exempel på databasens design syns i figur 5. Analysen av solcellers, vindturbinens och generatorns genomsnittliga effekt per vecka 2021 presenteras i figur 8 med genomsnittliga temperaturer per vecka inomhus och utomhus. Analysen av data resulterar i en energimängd som är möjlig att lagra inför kommande uppvärmningsbehov. Energimängden ger därefter volymen på ett säsongslager i form av en ny nergrävd varmvattentank för energisystemet.

#### **3.2.1 Energilagringspotential för Meteorian**

Eftersom produktionen av förnyelsebar energi kraftigt ökar i början av mars anses detta utgöra början på perioden då energi kan lagras inför kommande vinter. Perioden för analysen av lagringsbar energi är mars 2021 till februari 2022. För att undersöka potentialen för säsongslagring i systemet analyseras data från databasen Novia IoT (2022a) under kategorin *Energy*. Här analyseras registrerade historiska data från sensorerna för luftvärmepump, värmaren till varmvattentanken och fläktarna i utställningen, vilka hör till datasamlingen *All heating*. Data från sensorerna för de nämnda enheterna står för all uppvärmning i energisystemet. Förbrukning av varmvattentankens värmare och fläktar är energi som i dagsläget gått förlorad. De har



använts för att förbättra statistiken för solceller och vindkraftverk genom att tömma batteripaketet. Energin analyseras genom totala mängden energi per månad. Eftersom den totala lagringsbara energin under året endast räcker till en vattentank med en totalvolym på under 30 m<sup>3</sup> används med hänvisning av Aktaş och Kirçiçek (2021) atmosfäriskt tryck, vilket även förbättrar ekonomin för ett projekt av denna storlek. Aktuella datasamlingar är *All heating* och *Heat Pump Power*. Eftersom luftvärmepumpen, *Heat Pump Power*, är en del av *All heating* subtraheras denna från *All heating* för att få fram den energi som är möjlig att lagra. Det valda tidsspännet samt datasamlingar visas i figur 5.



Figur 5: Utgångsläget för analysen av data. Data från kategorin Energy under perioden 3.2021–2.2022 med All heating och Heat Pump Power som valda datasamlingar (Novia IoT, 2022a).

### 3.2.2 Beräkning av isoleringsförlust från varmvattentank

På basen av den kalkylerade lagringsbara energin per månad beräknas energiförluster, vattnets temperaturer och den användbara energin per månad. Eftersom dessa faktorer påverkas av och påverkar den slutgiltiga volymen och mantelarean på varmvattentanken beräknas varmvattentankens storlek i liter med hjälp av Microsoft Excels problemlösare i ett senare skede, för att söka en optimal tankstorlek. Efter att formler och krav är definierade i problemlösaren fås slutgiltiga lösningen. I detta skede görs en tabell i Excel för att ge de använda formlerna bestämda celler att hämta värden från. Tabellen görs för perioden mars 2021 till februari 2022.

Beräkningarna på isoleringsförlusten för den nergrävda varmvattentanken utgår från ett 30 cm tjockt skikt av polyuretan med ett  $\lambda$ -värde på 0,023 W/m\*K (Pinamonti et al., 2021). Som temperaturdifferens används den genomsnittliga utetemperaturen under året,  $T_1$ , och den genomsnittliga varmvattentemperaturen per månad,  $T_2$ . Genomsnittlig utetemperatur används då denna temperatur motsvarar den omgivande jordens temperatur, eftersom vattentanken är nergrävd för att skydda mot de snabba förändringarna i utetemperatur (Pinamonti et al., 2021). R-värdet för isoleringen, som beskriver isoleringens isoleringsförmåga, beräknas genom  $\lambda$ -värdet samt isoleringsmaterialets tjocklek med formel 1.

Den slutgiltiga isoleringsförlusten beräknas genom formel 3, vilken påverkas av mantelarean (formel 2), temperaturer och R-värdet. Formel 3 ger svaret i enheten watt, vilket omvandlas till kWh genom att multiplicera månadens timmar för att passa in med övriga värden. Exempel på värden för mars månad 2021 presenteras i tabell 1 och värden för  $T_0$ , som är vattnets utgångstemperatur;  $T_1$  samt tryck presenteras i tabell 2. I tabell 2 visas även cellen för den slutgiltiga volymen och medeltemperaturen på vattnet inne i vattentanken under tolv månader.

$$R = \frac{l}{\lambda} \quad (1)$$

$$A_m = 2\pi r(r + h) \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{A_m}{R} (T_2 - T_1) \quad (3)$$

$R$  = skiktets isoleringsförmåga ( $m^2 K/W$ )

$l$  = skiktets tjocklek ( $m$ )

$\lambda$  = materialets värmeledningskoefficient ( $W/mK$ )

$A_m$  = varmvattentankens mantelarea ( $m^2$ )

$r$  = varmvattentankens radie ( $m$ )

$h$  = varmvattentankens höjd ( $m$ )

$\Phi$  = isoleringsförlust ( $J/s = W$ )

$T_1$  = temperatur ute (jord) ( $^{\circ}C$ )

$T_2$  = temperatur inne (vatten) ( $^{\circ}C$ )

Tabell 1: Exempel på data och beräkning av isoleringsförlust för mars 2021.

Dagar	31
Månad	3
All uppvärmning	607,20 kWh
Luftvärmepump	262,00 kWh
Lagringsbar energi	345,20 kWh
Isoleringsförlust	75,73 kWh

Cellen för beräkning av isoleringsförlust knyts till cellerna för mantelarea, R-värde,  $T_1$  och  $T_2$ . Formeln får även ett tillägg för att ge värdet kWh genom månadens timmar.

Tabell 2: Celler för slutgiltig volym och varmvattentankens medeltemperatur under året samt värden för det interna trycket, vattenmassans utgångstemperatur och genomsnittliga temperaturen utomhus.

Slutgiltig volym		l
P_atm	1,01	bar
T <sub>o</sub>	25,00	°C
T <sub>1</sub>	5,20	°C
T_medel, år		°C

### 3.2.3 Dimensionering av varmvattentank

Varmvattentankens dimensioner för volym och mantelarea beräknas ur potentialen från den lagringsbara energin i energisystemet. Tankens dimensioner bestämdes till ett förhållande där höjden är tre gånger diametern. Detta förhållande är enligt rekommendationer från Cruickshank och Baldwin (2016) för att få de önskade egenskaperna i temperaturskiktning utan alltför stora förluster i isolering och ekonomi. I dimensioneringen för beräkningen av varmvattentankens mantelarea bestämdes höjden därför vara sex gånger radien, som syns i formel 5. Radien beräknas ur slutgiltiga volymen i liter och höjden beräknas från det bestämda förhållandet. Formel 5 beskriver tillvägagångssättet för beräkning av radie från volym med låst förhållande på höjd till radie. Formler för att beräkna volym och mantelarea presenteras som formel 4 och 2. Dimensioneringen av varmvattentanken färdigställs från erhållet värde på varmvattentankens storlek i liter.

$$V = \pi r^2 h \quad (4)$$

$$V = \pi r^2 h \rightarrow r = \frac{\sqrt[3]{\frac{2}{6\pi} V}}{h} \rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{V}{6\pi h}} \quad (5)$$

$V$  = varmvattentankens volym ( $m^3$ )

$r$  = varmvattentankens radie ( $m$ )

$h$  = varmvattentankens höjd ( $m$ )

Cellen för beräkning av radie knyts till cellen för varmvattentankens slutgiltiga volym. Mantelarean beräknas därefter från erhållna värden för radie och höjd.

### 3.2.4 Beräkning av vattentankens volym

I beräkningen av den totala energin lagrat i varmvattentanken för mars månad används vattenmassans entalpi vid 25 °C som utgångspunkt, eftersom vatten vid 25 °C,  $T_0$ , används som utgångstemperatur. Entalpiberäkningen beräknas med Excel-tillägget CoolProp (2020), vilket är ett Excel-tillägg baserat på en databas som beräknar sambandet mellan valda parametrar för olika substanser, genom kommandot: `"=PropsSI("H";"T";25+273,15;"P";1,01325 * 10^5;"water")/1000"`, där  $H$  är entalpin i J/kg,  $T$  är temperaturen i K och  $P$  är trycket i Pa. För beräkning av övriga månaders totala energi fungerar föregående månads totala energi som utgångspunkt. Isolering förlusterna för mars subtraheras från slutgiltiga volymens energiinnehåll vid 25 °C och lagringsbara energins summa för att få den totala energin för månaden. Totala energin för övriga månader beräknas från summan av föregående månads totala energi och den aktuella månads lagringsbara energi, varifrån den aktuella månads isoleringsförluster subtraheras. För att erhålla vattentemperaturer för månaderna löses entalpin ut genom att dividera totala energin med slutgiltiga volymen samt omvandla enheten från kWh till kJ. Temperaturen beräknas med Excel-tillägget CoolProp genom kommandot: `"=PropsSI("T";"H";170,56*1000;"P";1,01325*10^5;"water")-273,15"`. I kommandot definieras det sökta resultatet temperatur  $T$  följt av valda värden för entalpin  $H$  i J/kg och trycket  $P$  i Pa. Kommandot avslutas med att mediet är vatten samt omvandling från K till °C. Den slutliga mängden användbar energi för månaden fås från entalpidifferensen för den aktuella månads varmvatten och vatten vid 25 °C multiplicerat med slutgiltiga antalet liter i tanken som därefter omvandlas från J/kg till

kWh. Exempel på värden för den totala energin, entalpin i vattentanken, medeltemperatur och användbar energi presenteras i tabell 3.

*Tabell 3: Beräkning av totala energin, entalpin, medeltemperatur och användbar energi.*

Dagar	31	
Månad	3	
All uppvärmning	607,20 kWh	
Luftvärmepump	262,00 kWh	
Lagringsbar energi	345,20 kWh	
Isoleringsförlust	75,73 kWh	
Totala energin	700,17 kWh	
Entalpi	170,56 kJ/kg	
Medeltemperatur	40,70 °C	
T <sub>2</sub>	40,70 °C	
Användbar energi	269,47 kWh	

Cellen för beräkning av totala energin knyts till cellerna för värmeenergi för vattenmassan vid 25 °C, lagringsbar energi och isoleringsförlust. Cellen för entalpin knyts till cellerna för totala energin och slutgiltiga volymen. Cellen för användbar energi knyts till cellerna för varmvattnets entalpi, 25 °C vattnets entalpi och slutgiltiga volymen.

Efter att formler länkats samman definieras kraven för Excels problemlösare. Problemlösarens målsättning var att maximera användbara energin för februari 2022, vilket är den sista månaden i det valda tidsspännet. Problemlösaren hittar ett värde för övriga celler där den användbara energin är så hög som möjligt vid den valda cellen, detta resulterar även i att övriga månaders användbara energi är maximerade. Variabla värden är cellerna med vattentankens totala volym i liter samt beräkningsvärdet T<sub>2</sub> för isoleringsförlusten. Lösningens krav definierades som: T<sub>2</sub> är samma som medeltemperaturen per månad i vattentanken samt att temperaturen för augusti och september bör ligga mellan 90–95 °C, eftersom temperaturen är som högst här på grund av stor produktion av förnyelsebar energi. Kravet på att T<sub>2</sub> ska vara samma som medeltemperaturen per månad används för att undvika cirkulär referens i Excel, eftersom medeltemperaturen per månad beror på isoleringsförlusten och isoleringsförlusten beror på medeltemperaturen. Temperaturbegränsningen lades till

för att minimera tankens storlek samt för att motverka att vattenmassan börjar koka. Parametrar för problemlösaren presenteras i figur 6.

Figur 6: Problemlösarens målsättning, variabla celler och krav för lösning av vattentankens volym i liter.

Refererade cellerna i figur 6 är:

- |                   |  |
|-------------------|--|
| Ange målsättning: | Användbar energi för februari              |
| Variabla celler:  | Slutgiltiga volymen och $T_2$              |
| Begränsningar:    | Medeltemperatur per månad = $T_2$          |
|                   | Medeltemperatur, augusti mindre än 95 °C   |
|                   | Medeltemperatur, augusti större än 90 °C   |
|                   | Medeltemperatur, september mindre än 95 °C |
|                   | Medeltemperatur, september större än 90 °C |

### 3.2.5 Varmvattentankens bidrag till uppvärmning

För att analysera potentialen för den användbara energin undersöks hur stort bidrag varmvattentankens energi kan tillföra uppvärmningen av byggnaden. Den totala förbrukningen för luftvärmepumpen under de två första veckorna av mars månad 2021 har fungerat som ett exempel på hur energikravet för uppvärmning kan se ut. Dessa två veckor tack vare god täckning av data i databanken Novia IoTs (2022b) kategori *Barn* samt att energin har räckt till för att hålla en någorlunda stabil inomhustemperatur, trots det kalla vädret. Data från detta tidsspänn analyseras för att ge ett värde på energibehovet för uppvärmning under en mer krävande period.

Rådata som används i analysen av värmebehovet är importerad data från IoT-databasen och är tillhandahållen från administratören av systemet. Den data som erhållits är temperaturer ute och inne samt luftvärmepumpens förbrukning. Erhållna data är sensorernas avläsningar per minut. Data fås i ett textdokument och importeras till Microsoft Excel för att analyseras. Tidsmarkeringen fås i Unix tidsmarkering och bör därför konverteras för att få läsbara datum och tid. Exempel på importerade data visas i figur 7.

	A	B	C	D	E	F
1	id	timestam	Datum	Temperatur_Uti	Temperatur_Inni	MeteoriteBarn_AirPumpEnergy_Power
320971	819541	1617148748	30-03-2021 23:59	3.9	20.2	324.3
320972	819540	1617148688	30-03-2021 23:58	3.8	20.2	325.8
320973	819539	1617148628	30-03-2021 23:57	3.8	20.2	325.3
320974	819538	1617148568	30-03-2021 23:56	3.8	20.2	326.1
320975	819537	1617148508	30-03-2021 23:55	3.9	20.2	323.9
320976	819536	1617148448	30-03-2021 23:54	3.9	20.2	323.6
320977	819535	1617148388	30-03-2021 23:53	3.9	20.2	324.0

Figur 7: Erhållen rådata importerad till Excel med datumkonvertering.

Det riktgivande energibehovet för en vecka beräknas från importerade data genom att summera förbrukningen för luftvärmepumpen under det valda tidsspänn, kolumn "F" i figur 7. Eftersom avläsningarna sker med ett intervall på en minut ges denna summa i enheten  $W_{min}$ , vilket är förbrukningen under en minut. Detta värde omvandlas till kWh för att passa in i övriga beräkningar. Effekten från data är elektrisk energi in till pumpen som beräknas till termisk energi ut från pumpen genom ett SCOP-värde (eng. Seasonal Coefficient of Performance), som är den genomsnittliga

koefficienten på pumpens prestanda i ett valt geografiskt område under ett år. Genom erhållet energibehov för detta tidsintervall på två veckor fås riktgivande behovet på värmeenergi under en vecka för mer krävande förhållanden. SCOP-värdet på 3,5 (Scanoffice, 2022) som används är erhållet från en liknande luftvärmepump för att få ett riktgivande värde, eftersom den använda pumpen inte har ett SCOP-värde för kallare regioner. Värdet som används är taget från modellen Mitsubishi FT35 och modellen som används i Meteorian är Mitsubishi FH35

Veckobehovet kompletteras genom att undersöka pumpens arbete under det valda tidsintervallet. Luftvärmepumpen har ej utfört arbete under hela denna period på grund av att temperaturen har varit tillräckligt hög eller för att energin inte räckt till för pumpens konsumtion. Historiska importerade data analyseras med Excel-funktionen *ANTAL.OMF* som plockar ut antalet datapunkter, i detta fall minuter, där pumpens konsumtion är 0 samtidigt som temperaturen inne har varit under 14 °C. Temperaturen valdes genom antagandet att 15 °C var den valda lägsta temperaturen för byggnaden och gavs en buffert på 1 °C för snabba förändringar under denna temperatur. Antalet minuter pumpen varit stillastående jämförs därefter med totala antalet minuter under tidsintervallet för att se hur stor procent av tiden som pumpen inte har kunnat möta behovet.

Estimatet på 0,95 gavs som kompletteringsfaktor, det vill säga att 5 % av det krävda arbetet under tidsintervallet inte blev utfört. Estimatet är baserat på den tid som värmepumpen har varit stillastående och temperaturskillnaden från den önskade temperaturen inomhus. Erhållet riktgivande behov av värmeenergi ger möjlighet till ett riktgivande värden på den lagrade energins möjlighet att bidra till energisystemets uppvärmningskapacitet. Veckobehovet för uppvärmning under mer krävande förhållanden jämförs med den tillgängliga energin för alla månader.

För att jämföra säsongslagring i varmvattentank med övriga möjliga lagringsmetoder beräknas verkningsgraden för den beräknade lagringsenheten. Verkningsgraden beräknas genom den valda månadens användbara energi delat med summan lagringsbar energi för perioden fram till månaden i fråga. Exempelvis beräknas verkningsgraden för november månad 2021 från november månads användbara energi,

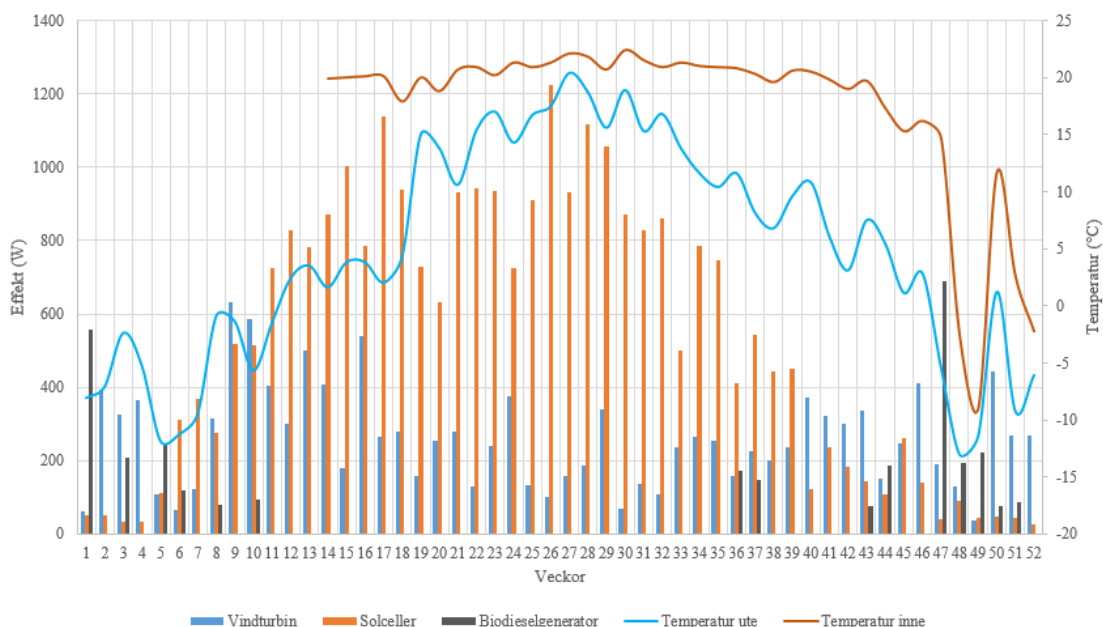


som är den energi som kan brukas, delat med summan lagringsbar energi från mars 2021 till november 2021, som är den totala mängd energi som satts in till tanken.

## 4 RESULTAT

### 4.1 Energilagringspotential för Meteorian

För att undersöka energisystemets prestation för att därefter gå vidare till förbättringar av uppvärmning analyserades produktionen av elenergi samt temperaturerna inne och ute. I figur 8 visas vindkraftverkets, solpanelernas samt dieselgeneratorns produktion av elektrisk energi under 2021 vid Meteorian. Bristen på energi vintertid är en svag punkt i dagens system, som resulterar i att energin inte räcker till för att hålla en grundvärme i byggnaden. Temperaturen släpps ofta under 0 °C i väntan på att produktionen ska öka igen, exempelvis vid vecka 46 i figur 8. Under denna tid skulle det vara möjligt att hålla grundvärme med generatorm, vilket dock medför att stora mängder biodiesel skulle förbrukas. Produktionen av elektricitet sommartid är hög men är nästintill helt frånvarande i jämförelse med vintern. Vindturbinen är den dominerande källan under vintern och assisteras kraftigt av biodieselgeneratorm då lagrade och förnyelsebara energin inte räcker till. Temperaturen inne i Meteorian påverkas av vinterns kalla väder. Temperaturen inne följer den yttre temperaturens inverkan, vilket beror på större isoleringsförluster och att luftvärmepumpen erhåller ett lägre COP-värde vid en kallare temperatur ute. COP-värdet sjunker enligt Hesaraki, Holmberg och Haghghat (2015) med 2–4 % för varje grad kallare temperaturen ute är. Produktionen av elektricitet ökar kraftigt i början av mars då solcellerna börjar ge effekt igen. Därför ses mars månad som en början på perioden där överloppsenergi kan tas tillvara och lagras till kommande vinter. För att underlätta uppvärmningen i lokalen undersöks därför möjligheten att lagra energin från högsäsong till lågsäsong i en varmvattentank. Denna vattenburna energi kan därefter brukas av den redan existerande konvektorn i lokalen.



Figur 8: Vindturbinens, solcellers och generatorns effekt i genomsnitt per vecka samt temperaturer ute och inne i ladan under 2021.

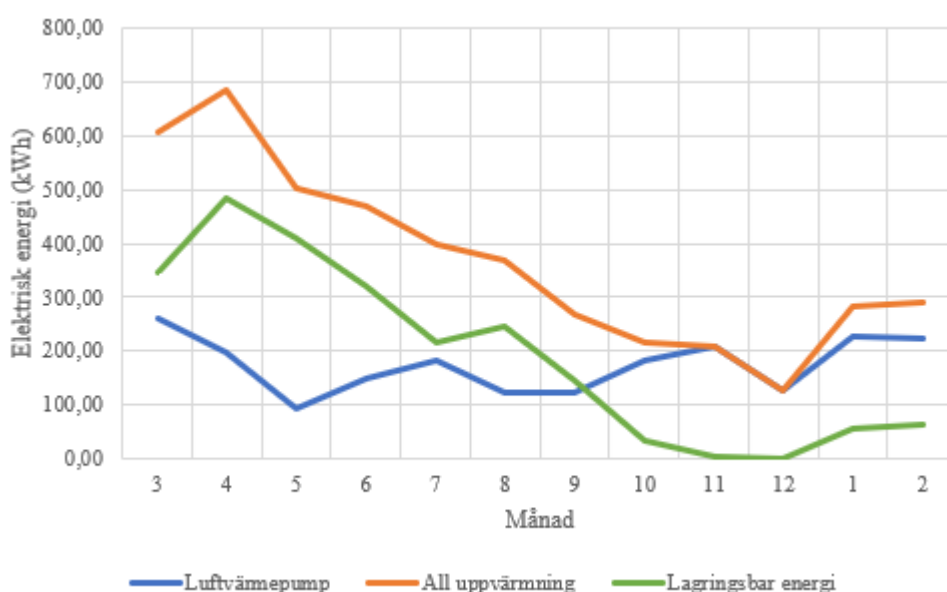
Energisystemet i dagsläget har en stor skiftning i produktion och konsumtion av elektrisk energi. Produktionen är som störst under perioder då systemet inte kräver stora energimängder för uppvärmning, vilket resulterar i energi som mer eller mindre slängs bort. Denna energi skulle vara användbar under perioder där den förnyelsebara energiförsörjningen fallerar, det vill säga främst under vintern men även sen höst. Problemet i off grid-systemet ligger dels på energilagringen, dels på elproduktionen. Produktionen av elenergi räcker och blir över sommartid men fallerar vintertid på grund av mindre instrålning från solen samt det stora värmebehovet. På grund av för liten lagringsförmåga och produktion klarar inte systemet av att tillgodose behoven utan stor hjälp av en dieselgenerator under kallare perioder. Figur 8 visar tydligt var de existerande energikällorna räcker till för områdets energibehov. Vinterhalvårets brist på förnyelsebar energi och kalla väder resulterar i att biodieselgeneratoren måste användas. För att försöka utjämna detta problem med varierande energibehov över säsonger undersöks potentialen i det existerande energisystemets energicykel.

Analysen av lagringsbar energi under mars 2021–februari 2022 presenteras som den totala mängden energi per månad som är lagringsbar för vinterns behov. Energin är summan av fläktarnas samt den existerande vattentankens värmares konsumtion per månad och presenteras i tabellform i tabell 4 och grafiskt i figur 9. I grafen syns även

att luftvärmepumpen har konsumerat mindre energi under december månad även om temperaturen utomhus har sjunkit, vilket syns i figur 8. Orsaken är att tillgängliga energin inte kan möta luftvärmepumpens energibehov vid dessa kallare temperaturer. Därför har värmepumpen varit avstängd för att spara energi till IoT-system och övervakning (Lindén, 2021). Detta har därefter resulterat i att temperaturen inomhus har sjunkit drastiskt.

*Tabell 4: Den möjliga lagringsbara energin beräknat från förbrukningen av fläktarna i utställningen och den existerande mindre varmvattentankens värmare.*

Dagar	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28
Månad	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
All uppvärmning	607,20	683,70	501,90	469,30	400,40	368,00	269,90	214,60	210,30	125,20	282,30	289,10 kWh
Luftvärmepump	262,00	198,20	93,90	149,90	183,90	122,10	124,00	182,30	207,40	125,20	227,50	224,40 kWh
Lagringsbar energi	345,20	485,50	408,00	319,40	216,50	245,90	145,90	32,30	2,90	0,00	54,80	64,70 kWh



*Figur 9: Värderna för luftvärmepumpens förbrukning, den totala förbrukade energin för uppvärmning i systemet och energin som går att lagra till kommande vinter.*

Lagringsbara energin per månad visar potentialen för säsongslagring. Figur 9 visar att *All heating* ökar kraftigt under mars till april. Ökningen beror på att produktionen av förnyelsebar energi kraftigt ökar, vilket syns i figur 8 från vecka 8–17. I samband med att stora mängder energi erhålls ökar även energikonsumtionen hos fläktarna i utställningen och den existerande varmvattentankens värmare för att förbättra statistiken för de förnyelsebara energikällorna. Denna energi är möjlig att spara till kommande behov.

## 4.2 Isoleringsförluster och dimensionering för varmvattentank

Isoleringsförlusten från varmvattentanken orsakas av temperaturskillnaden mellan vattnet och den omgivande jordens temperatur, R-värdet för den valda isoleringen samt mantelarean mellan dessa två temperaturer. I detta skede fås enbart resultat från isoleringsmaterialets prestanda. Den slutgiltiga isoleringsförlusten erhålls när mantelarea och medeltemperaturen,  $T_2$ , är definierad genom lösning med Problemlösaren. Isoleringsmaterialets tjocklek, lambda- och R-värde presenteras i tabell 5.

*Tabell 5: Isoleringens prestanda genom beräknad R-värde för ett 30 cm tjockt skikt av polyuretan.*

Isolering_polyuretan	
Tjocklek	0,30 m
$\lambda$	0,023 W/m*K
R	13,043 m <sup>2</sup> K/W

Dimensioneringen av varmvattentanken beror på den slutgiltiga volymen och presenteras efter att denna lösts av Problemlösaren. Tabell 6 presenterar cellerna för beräkning av radien från slutgiltiga volymen samt mantelarea. Efter erhållet värde för slutgiltiga volymen fås varmvattentankens radie.

*Tabell 6: Beräkning av vattentankens radie från slutgiltiga volymen samt mantelarea från radie och höjd förhållandet.*

Radie från volym	
Radie	dm
Höjd	dm
Mantelarea	
Radie	m
Höjd	m
Mantelarea	m <sup>2</sup>

### 4.3 Varmvattentankens volym

Varmvattentankens slutgiltiga volym beräknades från den tillgängliga energimängden som är möjlig att spara, utan att störa energisystemets övriga komponenter. Den användbara energin som är brukbar energi vid den aktuella månaden beräknades från differensen mellan månadens entalpi och entalpin vid 25 °C. Entalpin vid 25 °C och totala energin för vattenmassan vid 25 °C presenteras i tabell 7.

*Tabell 7: Utgångspunkt för vattenmassans energiinnehåll.*

Entalpi_25	104,92	kJ/kg
Värmeenergi	430,71	kWh

För att lösa varmvattentankens volym definierades formlers celler och krav samt variabla celler definierades för Problemlösaren. Problemlösarens krav och variabla celler presenterades i figur 5. Microsoft Excels problemlösare gav ett svar på 14 778 liter. I samband med detta värde beräknades även övriga data genom de sammanlänkade formlerna. Slutgiltig volym samt genomsnittlig temperatur under tolv månader presenteras i tabell 8. Slutgiltiga värden som erhållits efter funnen lösning presenteras i tabell 9 och tabell 10. Det bör även noteras att värmeenergi som brukas under en månad sänker energiinnehållet till efterkommande månader.

*Tabell 8: Slutgiltig volym samt medeltemperaturen inne i tanken under tolv månader.*

Slutgiltig volym	14778,34	l
P_atm	1,01	bar
T <sub>0</sub>	25,00	°C
T <sub>1</sub>	5,20	°C
T_medel, år	73,46	°C

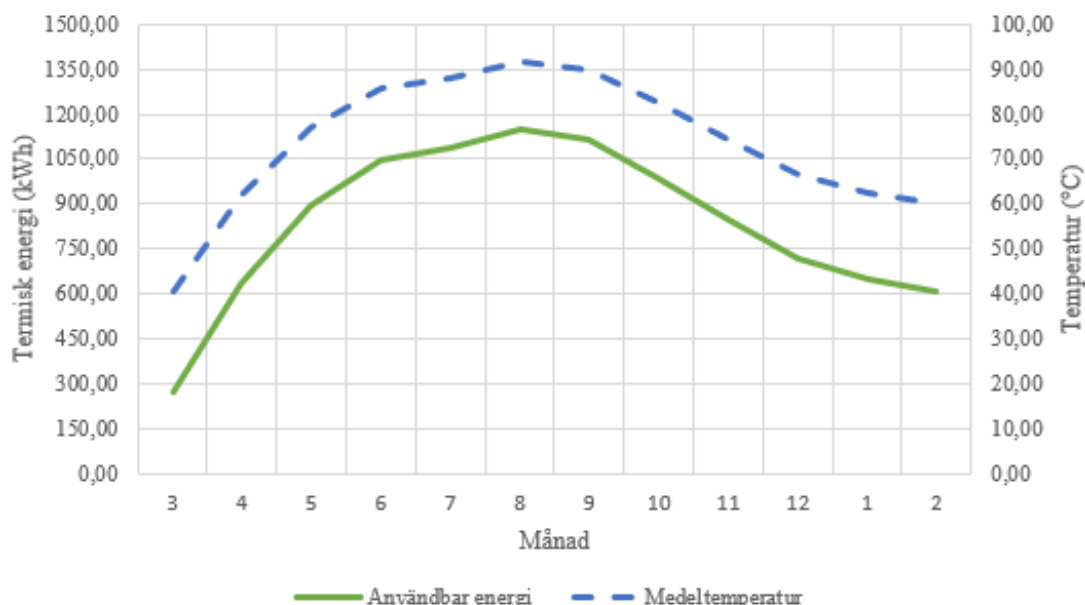
Tabell 9: Slutgiltiga värden för beräkningarna. Nederst är användbara energin som kan brukas från varmvattentanken under den aktuella månaden.

Dagar	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28
Månad	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
All uppvärmning	607,20	683,70	501,90	469,30	400,40	368,00	269,90	214,60	210,30	125,20	282,30	289,10 kWh
Luftvärmepump	262,00	198,20	93,90	149,90	183,90	122,10	124,00	182,30	207,40	125,20	227,50	224,40 kWh
Lagringsbar energi	345,20	485,50	408,00	319,40	216,50	245,90	145,90	32,30	2,90	0,00	54,80	64,70 kWh
Isoleringsförlust	75,73	117,54	153,07	166,45	176,90	184,49	175,05	164,53	142,49	131,00	122,59	106,08 kWh
Totala energin	700,17	1068,14	1323,07	1476,01	1515,62	1577,03	1547,88	1415,65	1276,05	1145,05	1077,27	1035,88 kWh
Energi per liter	170,56	260,20	322,30	359,56	369,20	384,16	377,06	344,85	310,85	278,94	262,42	252,34 kJ/kg
Medeltemperatur	40,70	62,14	76,96	85,84	88,13	91,69	90,00	82,33	74,23	66,61	62,67	60,26 °C
T <sub>2</sub>	40,70	62,14	76,96	85,84	88,13	91,69	90,00	82,33	74,23	66,61	62,67	60,26 °C
Användbar energi	269,47	637,43	892,36	1045,31	1084,91	1146,32	1117,17	984,94	845,35	714,35	646,56	605,18 kWh

Tabell 10: Slutgiltig dimension för varmvattentanken. Radien beräknad från slutgiltiga volymen som i sin tur används för att beräkna mantelarean.

Radie från volym	
Radie	9,22 dm
Höjd	55,33 dm
Mantelarea	
Radie	0,92 m
Höjd	5,53 m
Mantelarea	37,40 m <sup>2</sup>

Dimensioneringen av en varmvattentank för säsongslagring av överflödigt energi från sommar till vinter resulterade i en volym på 14 778 liter vatten. Problemlösarens resultat visar att en maximering av temperaturen inne i tanken inte är lönsam på grund av de ökande isoleringsförlusterna i samband med ökad temperaturskillnad. Temperaturen inne i tanken fick gå högre än den aktuella lösningen, vilket dock skulle medföra större förluster i isolering. Resultatet visar storleken för en varmvattentank dimensionerad enligt den energimängd som är möjlig att lagra från det redan existerande energisystemet. Figur 10 presenterar den användbara energin samt medeltemperaturen inne i vattentanken per månad. Vattenmassan erhåller sin högsta energidensitet i augusti från hög produktion av förnyelsebar energi. Från oktober och framåt förlorar vattenmassan snabbt sin höga energidensitet från att isoleringsförlusterna är större än lagringsbara energin, vilket syns i figur 8 under vecka 39 och framåt samt i tabell 9 under september och framåt.

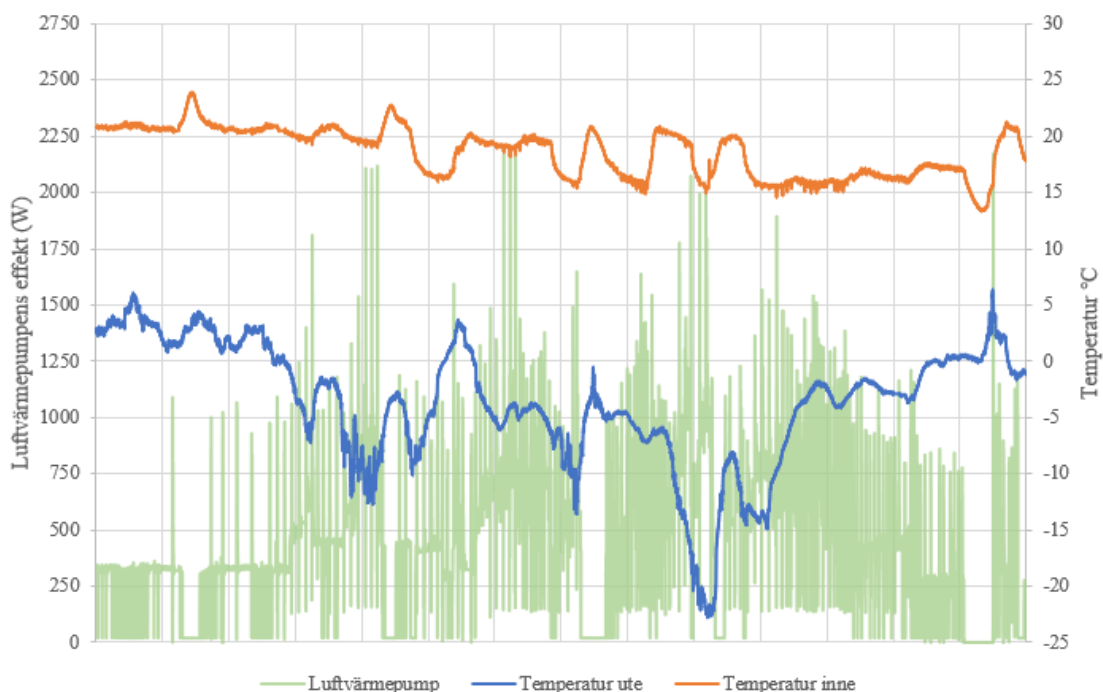


Figur 10: Den totala användbara energin samt medeltemperaturen inne i varmvattentanken per månad.

#### 4.4 Varmvattentankens bidrag till energisystemet

För att beräkna riktgivande energibehov per vecka under mer utmanande förhållanden analyserades luftvärmepumpens arbete från historiska data under två första veckorna i mars månad 2021. Figur 11 visar luftvärmepumpens effekt samt temperaturerna inne och ute för det aktuella tidsintervallet. I figuren syns även förändringar i innetemperatur som påverkas av luftvärmepumpens effekt och klimatet på utsidan. Då temperaturen ute stiger så stiger även temperaturen inne från luftvärmepumpens arbete, luftvärmepumpen ger mer värmeenergi från samma mängd arbete då temperaturen ute stiger.





Figur 11: Temperatur inne och ute samt luftvärmepumpens effekt för perioden 1–14 mars 2021. Exempel på luftvärmepumpens prestanda och förbrukning under kallare perioder.

Analysen av luftvärmepumpens utförda arbete resulterade i ett behov på 286 kWh värmeenergi för att behålla en temperatur inomhus på minst 15 °C i en vecka. Veckobehovet jämförs med varmvattentankens tillgängliga energi per månad och ger en potential till att värma byggnaden i två till tre veckor under vintern med det lagrade varmvattnet. Den beräknade verkningsgraden för denna design på varmvattentank möjliggör jämförelse med andra typer av säsongslagring. Resultat från analysen av luftvärmepumpens arbete presenteras i tabell 11 och slutgiltiga bidraget till energisystemets uppvärmningskapacitet samt varmvattentankens verkningsgrad presenteras nederst i tabell 12.

Tabell 11: Energibehov för uppvärmning av byggnaden beräknat från historiska data med komplettering för minuter pumpen inte har kunnat drivas.

Luftvärmepump, 1-14 Mars 2021		Komplettering	0,95
Elektrisk energi	9325,09 kWmin	SCOP	3,5
	155,42 kWh	Minuter av	253
Värmeenergi	543,96 kWh	Minuter tot	20111
Veckobehov	286,30 kWh	% av	1,26 %

Behovet av värmeenergi för uppvärmning av lokalen är beräknat med ett SCOP-värde från en liknande luftvärmepump och baserar sig på en kort period, vilket gör att detta värde endast är en riktgivande indikation på behovet.

*Tabell 12: Slutgiltiga värden för beräkningarna. Längst ner i tabellen är antalet veckor varmvattentanken kan värma byggnaden under den aktuella månaden samt varmvattentankens verkningsgrad.*

Dagar	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	30	31	28
Månad	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	
All uppvärmning	607,20	683,70	501,90	469,30	400,40	368,00	269,90	214,60	210,30	125,20	282,30	289,10	kWh
Luftvärmepump	262,00	198,20	93,90	149,90	183,90	122,10	124,00	182,30	207,40	125,20	227,50	224,40	kWh
Lagringsbar energi	345,20	485,50	408,00	319,40	216,50	245,90	145,90	32,30	2,90	0,00	54,80	64,70	kWh
Isoleringsförlust	75,73	117,54	153,07	166,45	176,90	184,49	175,05	164,53	142,49	131,00	122,59	106,08	kWh
Totala energin	700,17	1068,14	1323,07	1476,01	1515,62	1577,03	1547,88	1415,65	1276,05	1145,05	1077,27	1035,88	kWh
Entalpi	170,56	260,20	322,30	359,56	369,20	384,16	377,06	344,85	310,85	278,94	262,42	252,34	kJ/kg
Medeltemperatur	40,70	62,14	76,96	85,84	88,13	91,69	90,00	82,33	74,23	66,61	62,67	60,26	°C
T <sub>2</sub>	40,70	62,14	76,96	85,84	88,13	91,69	90,00	82,33	74,23	66,61	62,67	60,26	°C
Användbar energi	269,47	637,43	892,36	1045,31	1084,91	1146,32	1117,17	984,94	845,35	714,35	646,56	605,18	kWh
Veckor									2,95	2,50	2,26	2,11	
Verkningsgrad									0,38	0,32	0,29	0,26	

Tabell 12 visar de slutgiltiga värdena för beräkningarna i dimensioneringen av varmvattentanken. Antalet veckor energin räcker för uppvärmning av lokalen är liten. Orsaken är att verkningsgraden på den lagrade energin är låg. Resultatet speglar ett behov av en större lagringsenhet med en följd av större produktion av förnyelsebar energi under året. Antalet veckor som presenteras är veckor den lagrade energin i varmvattentanken räcker för att värma lokalen utan hjälp från luftvärmepumpen, jämfört mot det riktgivande värmebehovet per vecka. Dessa värden är därför endast presenterade under november 2021 till februari 2022 eftersom det är här som klimatet mer motsvarar perioden varifrån veckobebehovet är beräknat. Samma gäller verkningsgraden för säsongslagret, eftersom energin antagligen inte används före november visas verkningsgraden för november 2021 till februari 2022 som är jämförelsen på energi in till varmvattentanken mot energi ut ur varmvattentanken vid den aktuella månaden.

#### 4.5 Sammanfattning av resultat

Dimensioneringen av säsongslagret i form av en varmvattentank resulterade i en volym på 14 778 liter. Efter en analys av den nya varmvattentankens potential för att assistera uppvärmningen av byggnaden, konstateras att denna design av

varmvattentank är för liten för att tillfredsställa energibehovet. Den nya varmvattentankens potential för att assistera uppvärmningen i två till tre veckor är inte en tillfredsställande lösning.

Varmvattentankens potential påverkas av energiinnehållet samt det riktgivande värmebehovet. Eftersom det riktgivande behovet har en stor osäkerhet på grund av att det är beräknat utifrån ett tidsspänn på två veckor samt ett SCOP-värde, vilket är den genomsnittliga verkningsgraden för luftvärmepumpen på ett område under ett år, och inte det momentana COP-värdet, vilket är den momentana verkningsgraden. SCOP-värdet för den kallare regionen som Meteorian befinner sig på baseras på data från Helsingfors (Kowalski & Szałański, 2019). Genom användning av det momentana COP-värdet skulle värmebehovet blivit mindre, vilket i sin tur skulle ha förbättrat potentialen eftersom mindre värmeenergi erhöles från den använda elektriska energin. Den påstådda minskningen i värmebehovet baseras på temperaturers inverkan på luftvärmepumpens verkningsgrad då kallare temperaturer ute sänker COP-värdet (Hesaraki, Holmberg & Haghighat, 2015). Den genomsnittliga temperaturen ute på Meteorian under de två första veckorna i mars är  $-3,6\text{ °C}$  och under hela 2021  $+5,2\text{ °C}$  (Novia IoT, 2022b). Den genomsnittliga temperaturen i Helsingfors under ett år är  $+6,5\text{ °C}$  (Ilmatieteen laitos, 2021).

Eftersom denna storlek av säsongslager inte täcker behovet behövs ett lager med en större lagringsförmåga, vilket även innefattar större kapacitet på de förnyelsebara energikällorna för att fylla lagret.

## 5 DISKUSSION

Majoriteten av den elektriska energin som är producerad i Meteorians energisystem är erhållen under sommarhalvåret. Eftersom lokalen inte är i behov av uppvärmning sommartid resulterar detta i ett överflöd av energi under denna period. Vinterhalvårets kallare klimat utsätter energisystemet med ett stort behov av energi i form av uppvärmning av lokalen. Energin som finns tillgänglig vintertid från den förnyelsebara energiproduktionen räcker inte, vilket ger ett behov av att använda lagrad energi från sommaren. I detta arbete undersöktes möjligheten att lagra den energi som förbrukas för att förbättra statistiken för solceller och vindkraftverk. Den konsumerade energin är förbrukningen från den befintliga mindre varmvattentankens värmare och fläktarna i utställningen. Eftersom denna energi använts i analysen är resultatet av detta arbete en undersökning på potentialen för den redan existerande energin och inte en analys av energibehovet under året. Energin i fråga skulle fortfarande användas för att möta samma syfte, det vill säga tömma batterierna så att solpaneler och vindkraftverk kan fortsätta ladda, men skulle också möjliggöras att användas under vintern för uppvärmning.

Energin som analysen baserats på är avläsningar från konsumtionen hos de valda komponenterna, det vill säga att källan till energin inte är känd. Källan till den lagringsbara energin består främst av solcellerna och vindkraftverket men även dieselgeneratoren, vilket syns när figur 8 och tabell 4 jämförs. Under månader där biodieselgeneratoren inte varit aktiv är den lagringsbara energin helt förnyelsebar, men under månader där biodieselgeneratoren varit aktiv finns det inverkan från biodieselgeneratoren. Inverkan av generatoren höjer den lagringsbara energin en aning men är inte direkt märkbar eftersom mängden lagringsbar energi under dessa månader är liten.

Eftersom lagringsenheten för den nu lagrade energin är positionerad på en åker beslöts beräkningarna utgå från en nergrävd vattentank för att ytterligare skydda energin från klimatets inverkan. Valet baserades delvis på fördelarna under vinterhalvåret men även på fördelarna i utrymmesoptimering. Vid beräkningar för isoleringsförluster från varmvattentanken användes genomsnittliga utomhusluftens temperatur under året då

detta ska motsvara jordens temperatur (Pinamonti et al., 2021). Genomsnittliga utomhustemperaturen användes på grund av att det inte finns sensorer för jordens temperatur monterade i systemet. Användningen av denna temperatur leder till att resultatet grundar sig mer på en teoretisk bakgrund jämförelsevist om beräkningarna skulle baserats på en varmvattentank placerad på marknivå där sensorer för momentana utomhustemperaturen skulle kunna användas.

Isoleringsförlusterna påverkas av varmvattentankens dimensioner. I detta arbete valdes dimensioneringen av varmvattentanken att främja temperaturskiktning för att få tillgång till diverse temperaturer. Förhållandet mellan höjd och diameter valdes enligt rekommendationer från Cruickshank & Baldwin (2016) som presenterade en lösning där ekonomin inte försämras alltför mycket. Eftersom denna lösning resulterade i en långsmal vattentank blir kontaktarean till omgivningen större, som i sin tur resulterar i större förluster på energi från isoleringen. I detta fall skulle isoleringsförlusterna minskas genom användning av en mer sfärisk varmvattentank som har ett lägre förhållande på höjd till diameter för att minska mantelarean. Dock skulle temperaturskiktningen lida i detta fall vilket resulterar i en mer jämn varm vattenmassa inne i vattentanken, vilket i sin tur kan störa användningen av vattenburen värme till lokalen eftersom önskade temperaturskiktet inte finns. En annan fördel med en mer sfärisk design som stör temperaturskiktningen är den jämnare temperaturen, som resulterar i att vattenmassan inte har de varmare områdena som en vattentank med temperaturskiktning. I tabell 9 syns vattenmassans temperaturs inverkan på isoleringsförlusterna, där varmare temperaturer resulterar i större förluster. Förlusterna skulle minskas vid användning av varmvattentank med en lägre intern temperatur.

Varmvattentankens volym beräknades från den tillgängliga lagringsbara energin. Denna beräkning och analys resulterar därefter i potentialen i den redan existerande energin som finns tillgänglig i energisystemet och inte i energibehovet för ett säsongslager. Denna infallsvinkel användes eftersom data för byggnadens behov av värme samt isoleringsförluster inte fanns. Den beräknade varmvattentankens energiinnehåll jämförs med ett exempel på byggnadens värmebehov under mars månad 2021. Resultatet av analysen visar att en varmvattentank inte är en heltäckande lösning på bristen av energi under vintern, med den energimängd som energisystemet

idag omsätter.

Exemplet på värmebehovet som används som riktgivande energibehov för uppvärmning är tagen ur historiska data som analyserats och beräknats. Detta värde är beräknat från luftvärmepumpens förbrukning med ett SCOP-värde för kallare regioner, som är det genomsnittliga COP-värdet för luftvärmepumpen under året. Värdet på detta behov är nödvändigtvis inte helt tillförlitligt eftersom det beräknade veckobehovet härstammar från två veckor av data. Problemet i detta skede var att hitta en period där temperaturen ute var kallare samtidigt som luftvärmepumpen hade använts under så stor del av tiden som möjligt. Försökets syfte var att hitta ett riktgivande värde på byggnadens värmebehov under vintern. För att åstadkomma mer exakta resultat kan ett test under kontrollerade förutsättningar göras. Testet skulle förslagsvis göras under olika perioder där utetemperaturen är stabil med en extern värmare inne i byggnaden som får hålla en jämn temperatur. Detta tar bort problemet med det osäkra momentära COP-värdet för luftvärmepumpen.

Energimängden som varmvattentanken kan hålla till kommande vinter är för liten för att täcka det beräknade behovet, vilket syns i presentationen av resultatet i tabell 12. Den lagrade energin klarar av att assistera uppvärmningen av lokalen i två veckor under vintern. Efter att denna energi är förbrukad ligger ansvaret på luftvärmepumpen igen. Tiden den lagrade energin räcker tyder på att produktionen av elektricitet är för liten under året. För att möta behovet under vintern krävs utökning av produktion under hela året samt ett säsongslager för lagring av energi från sommar till vinter.

Energisystemet borde i detta fall gynnas mera av ett lager av energi som har kapaciteten att hålla energin från hög- till lågsäsong i samband med ökad produktion av elektricitet under året. Ett termiskt lager i form av en varmvattentank kan fungera för detta ändamål men skulle dessvärre behöva vara större än den beräknade volymen i detta arbete. För att utnyttja en större volym krävs även utvidgning av solceller och vindkraftverk. Varmvattentankens isolering är lika tjock över hela mantelarean, även om den översta delen av vattentanken håller vätskan med högst energidensitet på grund av temperaturskiktningen som uppstår. Därav kunde tankens övre del med fördel isoleras med dubbla lager för att ytterligare motverka energiförluster (Ghaddar, 1994).

Energiförluster genom isolering går inte helt att motverka och de är speciellt stora hos mindre vattentankar i proportion till den lagrade energin, vilket även syns i detta arbete. Isoleringen skulle kunna förbättras för att minska de stora energiförlusterna. Den procentuella isoleringsförlusten minskas även vid ökad volym på en vattentank i samma proportioner och genom en lägre temperaturskillnad. Genom att sänka temperaturen i vattentanken krävs en betydligt större lagringsenhet som resulterar i att bristen på utrymme kommer emot och att kostnaderna ökar drastiskt.

Energilagring genom att öka batterikapaciteten skulle vara kostsamt för att nå en heltäckande lösning för energitillförsel året runt och skulle även gå emot rekommendationerna från Cruickshank och Baldwin (2016), eftersom batterier oftast används för kortvarig lagring som betyder lagring från några dagar upp till maximalt några veckor. Även Puranen, Kosonen och Ahola (2021) beskriver att batterier inte är en lönsam investering för säsongslagring av rent praktiska och ekonomiska skäl.

Vid analys av figur 8 fås uppfattningen att batterierna är väl dimensionerade för systemet, eftersom biodieselgeneratoren inte behöver användas utanför vintern. Enda undantaget är i september under vecka 36 och 37 där solcellerna och vindkraftverket genererat mindre energi än det normala under två dygn före generatorns start. Denna händelse är ett tecken på att utvidgning av batterikapaciteten kan motiveras för kortvarig lagring, eftersom den kortvariga lagringen ska fungera som en buffert för den momentana varierande produktionen och konsumtionen av elektricitet. Utvidgning av batterier i detta scenario skulle förlänga tiden energisystemet klarar sig utan biodieselgeneratorns hjälp. Bilaga 1 visar noggrannare analys av lagringsbar energi under augusti och september månad. Under denna period finns det kapacitet till att lagra mer energi i batterierna med de existerande solpanelerna och vindkraftverket.

Batterierna blir ofta fulladdade utan biodieselgeneratorns hjälp, vilket betyder att energi förbrukas av den befintliga varmvattentankens värmare samt av fläktarna i utställningen. Denna energi skulle kunna lagras i en utvidgad batteribank för att senare nyttjas under månaden, i detta fall september, och minska antalet starter för biodieselgeneratoren. De använda batteriernas laddningsgrad och lagringsbara energin påverkas dock också av att algoritmen för urladdning av batterierna inte är som den

ska, urladdning av batterierna för att solpaneler och vindkraft ska fortsätta att ladda batterierna, som gör att batterierna börjar laddas ur innan de är helt fulla (Lindén, 2021). Starterna av biodieselgeneratoren i september orsakas trots detta av för låg spänning i batterierna, vilket motiverar en utökning av batterikapaciteten för kortvarig lagring. Spänningen i batteripaketet på 48 V presenteras i bilaga 2 under september månad 2021. I grafen syns att spänningen gått under 46 V före biodieselgeneratoren startats samt att spänningen ofta går upp mot och över 56 V, vilket tyder på att batteripaketet var urladdat före start respektive fulladdat under flera tillfällen (PVEDucation, 2022). Dessa värden är dock aningen missvisande eftersom batterierna inte varit fränkopplade från belastning och laddning under den aktuella tiden.



## 6 SAMMANFATTNING OCH REKOMMENDATIONER

I dagens läge grundar sig utmaningarna i Meteorians off grid-system på bristfällande produktion av elektricitet och avsaknaden av säsongslagring vid Meteorian. Med en omfattande säsongslagring skulle Meteorian kunna fungera på egenproducerad elektricitet året runt, vilket dock är en kostnadsfråga. För att klara av vinterns energibehov krävs en utökning av produktion sommar- och vintertid. Sommarens produktion bör möjliggöra säsongslagring av en stor mängd energi som därefter kan användas under vintern för att möta energibehovet. Förbättringar i konsumtionen av energi är även en central del i arbetet. Uppgraderingen till en jord- eller bergsvärmepump skulle underlätta uppvärmningen av lokalen. Energikällan för den använda värmepumpen som i dagsläget är utomhusluften kyls snabbt ner under höst och tidig vinter. Energikällans snabba förändringar i temperatur skulle undvikas om denna var jordmånen på området. Användningen av en jordvärmepump skulle spara energi och ge energisystemet potentialen att hålla bygganden varm under en större del av året med samma mängd tillgänglig energi.

Genom att utöka produktionen av förnyelsebar energi samt montera dessa nya komponenter på ett sätt som passar vinterns förhållanden ökas produktionen under de mer krävande månaderna. Eftersom snö lägger sig på solpanelerna vintertid fås inte den fulla potentialen av panelerna. Detta syns tydligt i solpanelernas effekt 1.12.2021 då panelerna borstades av. Efter avlägsnande av snö gavs en större effekt i jämförelse med tidigare närliggande datum. Solpanelernas effekt 1.12.2021 presenteras i bilaga 3. Vertikalt monterade solpaneler är i detta fall att föredra för att främja tillgänglig energi under vinterns förhållanden, om inte annan lösning på att avlägsna snö hittas. Eftersom vindkraftverkets bidrag till systemets energisättning är enligt statistiken dominerande under månaderna november till februari gynnas systemet under denna period mera från utvidgning av vindkraftverk. Vindkraftverket påverkas inte av snö som solpanelerna gör, vilket är en del i den bättre statistiken. Eftersom snö vid olika tillfällen har täckt solpanelerna under vintern är jämförelsen mellan produktionen från sol och vind baserad på data som inte är helt täckande. Detta på grund av att solpanelerna skulle ha haft en högre effekt om de varit helt rena från snö hela vintern.

En vattentank för säsongslagring skulle kunna vara ett alternativ för att assistera uppvärmningen av byggnaden under en del av vinterhalvåret. För att få ett säsongslager i form av en varmvattentank att vara gynnsam för den tilltänkta byggnaden krävs en större volym att lagra i. Energiförlusterna utgör en för stor procent av den totala lagrade energin, vilket är resultatet av ett för stort förhållande mellan mantelarea och volym samt den stora temperaturskillnaden mellan varmvattnet och det omgivande mediet. Genom ökning av volymen och sänkning av temperaturen minskas förhållandet på mantelarea till volym och temperaturdifferensen mellan varmvattnet och det omgivande mediet, vilket leder till procentuellt mindre förluster i isolering. Den totala tillgängliga energin, som den är idag, räcker dock inte till för att få en heltäckande lösning med enbart varmvattentank och luftvärmepump. Orsaken till detta är främst COP-värdet för luftvärmepumpen vintertid och mängden lagringsbar energi under året kombinerat med den tillgängliga förnyelsebara energimängden vintertid. Detta resulterar i att dieselgeneratoren behöver tillföra större mängder energi för att hålla värmen i byggnaden. Eftersom dieselgeneratoren högst sannolikt kommer att behövas som säkerhet under denna period, oavsett vilka optimeringar och förbättringar som görs, kunde dennas lägre verkningsgrad ökas genom att ta tillvara kylvattnets värme, som idag ses som spillvärme. Genom att använda en värmeväxlare kunde denna spillvärme tas tillvara i kollektorslangen för en jordvärmepump eller i varmvattentanken.

För att vidareutveckla energisystemet är förbättringar i produktionen och konsumtionen av energi av nytta. En kombination med en varmvattentank som säsongslager och en vatten- eller jordvärmepump skulle höja potentialen för den lagrade energin. Vattenvärmepumpen kan utnyttja värmen från varmvattentanken som energikälla för att höja COP-värdet under de kallare perioderna. COP-värdet förbättras med 2–4 % för varje grad varmare värmepumpens energikälla är och 1–2 % för varje grad kallare byggnadens temperatur är (Hesaraki, Holmberg & Haghghat, 2015). En sänkning av byggnadens grundvärme bidrar till en ytterligare förhöjning av COP-värdet. Om byggnadens grundvärme bestäms till 10 °C skulle COP-värdet höjas med 10–20 %, jämfört med de nuvarande temperaturer som oftast rör sig till en innetemperatur på 20 °C. Då lokalen ska användas ställs pumpen om till en önskad temperatur. Kombinationen av en vattentank och en vattenvärmepump räcker dock

inte till för hela vinterhalvåret, eftersom summan av energin i tanken och den tillgängliga elektriska energin inte klarar av att möta energibehovet baserat på det beräknade veckobehovet. Som lösning på uppvärmningsproblemen kan jordvärmepump vara ett mer kostnadseffektivt alternativ, eftersom energikällan för värmepumpen i detta fall är ett lager som inte direkt tar slut. Jordvärmepumpen tar energin från cirkulerande vätska i de nergrävda kollektorslangarna, vilket håller en högre temperatur under vintern än utomhusluften.

En jord- eller bergvärmepump är en dyrare investering och en del markarbete krävs för den installationen. Fördelarna med en jord- eller bergvärmepump är att den förnyelsebara energin som produceras i systemet tillåts ge mera värme genom det högre COP-värde som dessa kan leverera jämfört med luftvärmepumpen. Jord- eller bergvärmepumpar anses även vara ett mer pålitligt val för kallare klimat (Naranjo-Mendoza et al., 2019). Beroende på sammansättningen i marken på området kan den även användas som ett termiskt lager från sommar till vinter. Värmepumpen kyler byggnaden under sommartid, vilket samtidigt kör ner värmen i marken genom kollektorslangen. Utöver detta finns möjlighet att lagra större mängder energi i kollektorslangens område genom att pumpa ner varmt vatten. Detta kräver dock ytterligare markarbete, vilket höjer kostnaderna, och en eventuell avgränsande isolering till området för att hålla den höga energidensiteten på ett önskat område.

Batterierna utgör kärnan i energilagringen och samtidigt också den enda energilagringen i dagens läge. Nyttan med batterierna är att få lagra energin i den form den behövs. En utökning av batterikapaciteten för den kortvariga lagringen skulle främja energisystemets funktion. Den existerande batteribanken laddas ofta till nära maximal kapacitet ända in till mitten av november utan direkt hjälp från biodieselgeneratoren. Biodieselgeneratoren körs fem gånger under perioden september till mitten av november. Bilaga 4 visar generatorns inverkan under perioden september till november 2021. En utökning av kapaciteten skulle här leda till att en större del av förnyelsebara energin skulle brukas av konsumenter som ger en direkt nytta för området och på så sätt förlänga tiden energisystemet klarar sig. Lagringsbara energin under augusti till september, som visas i bilaga 1, kan användas till att fylla det expanderade batteripaketet.

Vid expanderings av batteripaket bör valet av batterityp göras. Blysyrbatterier är det billigare alternativet sett från mängden lagringsbar energi och litiumbatterier är det bättre alternativet sett från ett utrymmesmässigt samt miljöns perspektiv. Eftersom litiumbatterier är betydligt dyrare blir en investering av denna typ svårare att motivera. Litiumbatterier erbjuder dock en miljövänligare lösning med högre energidensitet jämfört med blysyrbatterier, som kan ses attraktivt samt praktiskt genom att få en större lagringskapacitet i samma volym. Utöver detta är även litiumbatterier mindre känsliga att bruka, eftersom blysyrbatterier försämras vid utnyttjande av hela batteriets kapacitet.

Batterierna erbjuder en flexibel källa för energilagring men är inte enligt Puranen, Kosonen och Ahola (2021) en passande lösning för säsongslagring. Produktionen under vinterhalvåret är för liten för att möta energibehovet med hjälp av batterier. Som lösning för energibehovet vintertid behövs ett säsongslager i form av ett termiskt lager eller vätgasslager. Det termiska lagret, så som en varmvattentank, är det förmånligare alternativet och ger i stora drag samma verkningsgrad men med ett smalare användningsområde. Varmvattentanken bör dock vara större än den beräknade i detta arbete, vilket även innebär behov av ökad energiproduktion under hela året. Verkningsgraden för elektricitet i ett vätgassystem är enligt Barbir (2005), Lagorse et al. (2008) samt Puranen, Kosonen och Ahola (2021) runt 30–35%, vilket är i samma storlek som för varmvattentanken i detta arbete. Däremot fås energin i elektrisk form från vätgassystemet vilket ger ett betydligt bredare användningsområde än värmeenergin från varmvattentanken. Vätgassystemets verkningsgrad stiger ytterligare om värmen från elektrolysen samt från bränslecellen tas tillvara.

För att uppnå ökad förståelse för energisystemets funktion samt hur behovet energimässigt ser ut är det nyttigt att undersöka nyckelområden djupare genom olika tester. Testerna skulle förslagsvis kunna innehålla en elektrisk värmare som låts hålla fast temperatur inomhus vid olika temperaturer utomhus. Genom att hålla en innetemperatur i byggnaden med ett externt värmebatteri skulle ett kontrollerat försök nås där data som den krävda energimängden för att hålla önskad temperatur kan analyseras. Från värmebatteriets förbrukning fås energibehovet för att hålla en temperatur, vilket därefter ger möjlighet att beräkna byggnadens värmeförluster. Detta

skulle leda till möjligheten att dimensionera expanderingen av utrustning till att bättre samspela med konsumenterna i systemet. Genom detta skulle även en beräkning av COP-värdet för den använda luftvärmepumpen förenklas. Eftersom produktionen av elektrisk energi under året är för liten för att tillfredsställa behovet fås genom beräknat energibehov en klarare väg till ett bättre samspelade off grid-system.

## LITTERATURFÖRTECKNING

20grader, 2011. *20grader*. [Online]

Hämtat från: <https://20grader.se/mitsubishi-msz-fh35ve>

[Använd Februari 2022].

Aktaş, A. & Kirçiçek, Y., 2021. Chapter 6 - Solar Thermal Systems and Thermal Storage. i: *Solar Hybrid Systems*. Turkiet: Academic Press, s. 127-137.

Barbir, F., 2005. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Solar Energy*, Volym 78, s. 661-669.

Bhattarai, P. R. & Thompson, S., 2016. Optimizing an off-grid electrical system in Brochet, Manitoba, Canada. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volym 53, s. 709-719.

Bisaga, I., Puźniak-Holford, N., Grealish, A., Baker-Brian, C. & Parikh, P., 2017. Scalable off-grid energy services enabled by IoT: A case study of BBOX SMART Solar. *Energy Policy*, Volym 109, s. 199-207.

Cho, D. & Valenzuela, J., 2022. A scenario-based optimization model for determining the capacity of a residential off-grid PV-battery system. *Solar Energy*, Volym 233, s. 478-488.

CoolProp, 2020. *CoolProp*. [Online]

Hämtat från: <http://www.coolprop.org/>

[Använd Februari 2022].

Cruickshank, C. A. & Baldwin, C., 2016. Sensible Thermal Energy Storage: Diurnal and Seasonal. i: *Storing energy*. Ottawa: Department of Mechanical and Aerospace Engineering, s. 291-311.

Dahash, A., Ochs, F., Janetti, M. B. & Streicher, W., 2019. Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems. *Applied Energy*, Volym 239, s. 296-315.

Emmi, G., Zarrella, A., De Carli, M. & Galgaro, A., 2015. An analysis of solar assisted ground source heat pumps in cold climates. *Energy Conversions and Management*, Volym 106, s. 660-675.

Energimyndigheten, 2021. *Energimyndigheten*. [Online]  
Hämtat från: <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2021/22-000-nya-natanslutna-solcellsanlaggningar-under-2020/>  
[Använd Januari 2022].

Fan, J. & Furbo, S., 2012. Thermal stratification in a hot water tank established by heat loss from tank. *Solar Energy*, Volym 86, s. 3460-3469.

Ghaddar, N. K., 1994. Stratified storage tank influence on performance of solar water heating system tested in Beirut. *Renewable Energy*, Volym 4, s. 911-925.

Hesaraki, A., Holmberg, S. & Haghghat, F., 2015. Seasonal thermal energy storage with heat pumps and low temperatures in building projects - A comparative review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volym 43, s. 1199-1213.

Ilmatieteen laitos, 2021. *Ilmatieteen laitos*. [Online]  
Hämtat från: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot>  
[Använd Maj 2022].

Jossen, A., Garche, J. & Sauer, D. U., 2004. Operation conditions of batteries in PV applications. *Solar Energy*, Volym 76, s. 759-769.

Kebede, A. A., Coosemans, T., Messagie, M., Jemal, T., Behabtu, H. A., Mierlo, J.

V. & Berecibar, M., 2021. Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application. *Journal of Energy Storage*, Volym 40.

Kiran, D. R., 2019. Chapter 35 - Internet of Things. i: M. Deans, red. *Production Planning and Control*. United States: Elsevier, s. 495-513.

Kowalski, P. & Szałański, P., 2019. Seasonal coefficient of performance of air-to-air heat pump and energy performance of a building in Poland. *E3S Web of Conferences*.

Lagorse, J., Simões, M. G., Miraoui, A. & Costerg, P., 2008. Energy cost analysis of a solar-hydrogen hybrid energy system for stand-alone applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volym 33, s. 2871-2879.

Lee, M., Lee, D., Park, M. H., Kang, Y. T. & Yongchan, T., 2022. Performance improvement of solar-assisted ground-source heat pumps with parallelly connected heat sources in heating-dominated areas. *Energy*, Volym 240.

Lindén, H., 2021. *Meteoria visitor center - Off-grid and IoT system* [Intervju] 2021.

Marocco, P., Ferrero, D., Lanzini, A. & Santarelli, M., 2022. The role of hydrogen in the optimal design of off-grid hybrid renewable energy system. *Journal of Energy Storage*, Volym 46.

Meteoria, 2021. *Meteoria*. [Online]

Hämtat från: <https://meteoria.fi/sv>

[Använd December 2021].

Modbus, 2022. *Modbus*. [Online]

Hämtat från: <https://modbus.org/faq.php>

[Använd April 2022].



MQTT, 2022. *MQTT*. [Online]

Hämtat från: <https://www.mqtt.org>

[Använd April 2022].

Mudaliar, M. D. & Sivakumar, N., 2020. IoT based real time energy monitoring system using Raspberry Pi. *Internet of Things*, Volym 12.

Mussard, M., 2017. Solar energy under cold climatic conditions: A review.

*Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volym 74, s. 733-745.

Naranjo-Mendoza, C., Oyinlola, M. A., Wright, A. J. & Greenough, R. M., 2019. Experimental study of a domestic solar-assisted ground source heat pump with seasonal underground thermal energy storage through shallow boreholes. *Applied Thermal Engineering*, Volym 162.

Novia IoT, 2022a. *IoT Data Presentation - Energy*. [Online]

Hämtat från: [https://iot.novia.fi/data/meteorica\\_energy.html](https://iot.novia.fi/data/meteorica_energy.html)

[Använd Mars 2022].

Novia IoT, 2022b. *IoT Data Presentation - Barn*. [Online]

Hämtat från: [https://iot.novia.fi/data/meteorica\\_barn.html](https://iot.novia.fi/data/meteorica_barn.html)

[Använd Mars 2022].

Novia IoT, 2022c. *IoT Data Presentation - Weather*. [Online]

Hämtat från: [https://iot.novia.fi/data/meteorica\\_weather.html](https://iot.novia.fi/data/meteorica_weather.html)

[Använd Mars 2022].

Olabi, A. G., Wilberforce, T., Sayed, E. T., Abo-Khalil, A. G., Maghrabie, H. M., Elsaid, K. & Abdelkareem, M. A., 2022. Battery energy storage systems and SWOT (strengths, weakness, opportunities, and threats) analysis of batteries in power transmission. *Energy*.

Pantic, L. S., Pavlović, T. M., Milosavljević, D. D., Radonjic, I. S., Radovic, M. K. & Sazhko, G., 2016. The assessment of different models to predict solar module temperature, output power and efficiency for Nis, Serbia. *Energy*, Volym 109, s. 38-48.

Pinamonti, M., Beausoleil-Morrison, I., Prada, A. & Baggio, P., 2021. Water-to-water heat pump integration in a solar seasonal storage system for space heating and domestic hot water production of a single-family house in a cold climate. *Solar Energy*, Volym 213, s. 300-311.

Puranen, P., Kosonen, A. & Ahola, J., 2021. Technical feasibility evaluation of a solar PV based off-grid domestic energy system with battery and hydrogen energy storage in northern climates. *Solar Energy*, s. 246-259.

PVEducation, 2022. *PVEducation*. [Online]

Hämtat från: <https://pveducation.com/solar-concepts/battery-state-of-charge-vs-open-circuit-battery-voltage/>

[Använd April 2022].

Qin, P., Liu, M., Su, L. & Tan-Soo, J.-S., 2022. Electricity consumption in the digital era: Micro evidence from Chinese households. *Resources, Conservation and Recycling*, Volym 182.

Raspberry Pi, 2022. *Raspberry Pi*. [Online]

Hämtat från: <https://www.raspberrypi.com>

[Använd April 2022].

Roberge, P., Lemay, J., Ruel, J. & Bégin-Drolet, A., 2022. Towards standards in the analysis of wind turbines operating in cold climate – Part A: Power curve modeling and rotor icing detection. *Cold Regions Science and Technology*, Volym 196.

Scanoffice, 2022. *Scanoffice*. [Online]

Hämtat från: <https://www.scanoffice.fi/tuote/mitsubishi-electric-ft-hyper-heating->

[ilmalampopumppu-viilennykseen-ja-lammitykseen/](#)

[Använd Februari 2022].

Shah, L. J., Andersen, E. & Furbo, S., 2005. Theoretical and experimental investigations of inlet stratifiers for solar storage tanks. *Applied Thermal Engineering*, Volym 25, s. 2086-2099.

Shamshiri, M., Gan, C. K., Baharin, K. A. & Azman, M. A., 2019. IoT-based electricity energy monitoring system at University Teknikal Malaysia Melaka. *Bulletin of Electrical Engineering and Infomratics*, Volym 8, s. 683-689.

Sohoni, V., Gupta, S. C. & Nema, R. K., 2016. A Critical Review on Wind Turbine Power Curve Modelling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems. *Journal of Energy*, Volym 2016, s. 18.

SunOn Battery, 2021. *Sunon Battery*. [Online]

Hämtat från: <https://sunonbattery.com/agm-battery-voltage-capacity/>

[Använd April 2022].

Thermia, 2022. *Thermia Värmepumpar*. [Online]

Hämtat från: <https://www.thermia.se/bergvarme-jordvarme/>

[Använd Mars 2022].

U.S. Department of Energy, 2014. *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy*.

[Online]

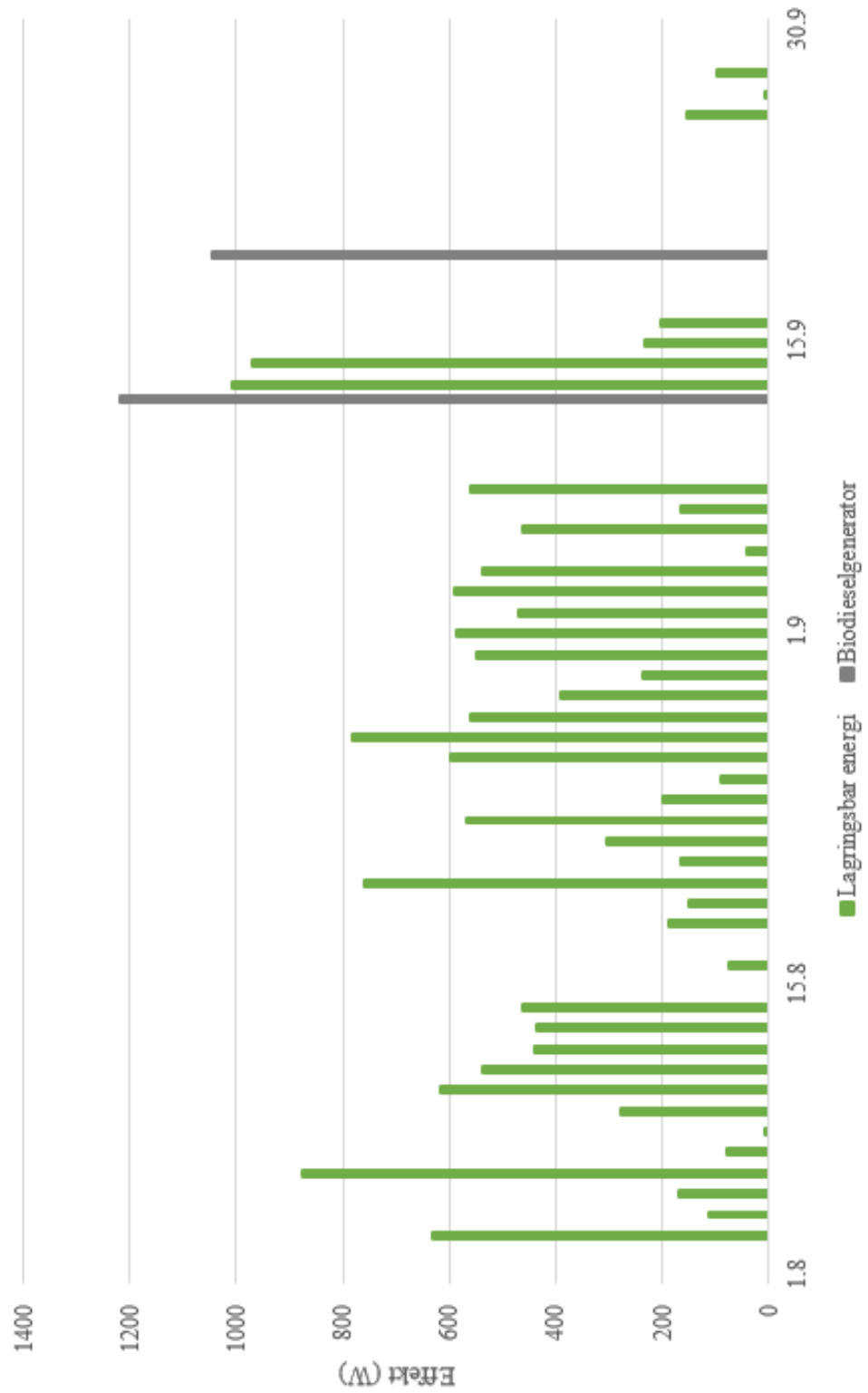
Hämtat från: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-hydrogen-production-electrolysis>

[Använd Mars 2022].

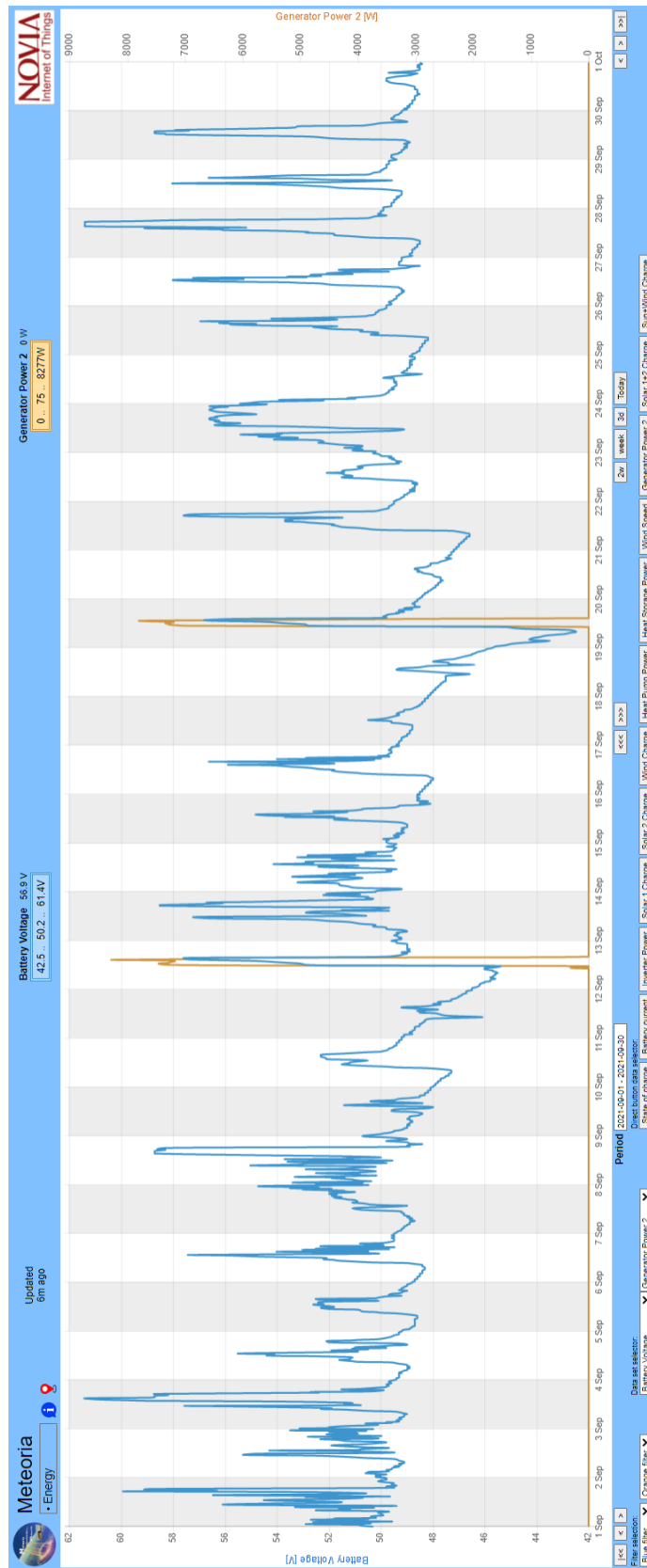
Wang, Y., Wang, J., Yang, L., Ma, B., Sun, G. & Youssefi, N., 2022. Optimal designing of a hybrid renewable energy system connected to an unreliable grid based on enhanced African vulture optimizer. *ISA Transactions*.

## BILAGOR

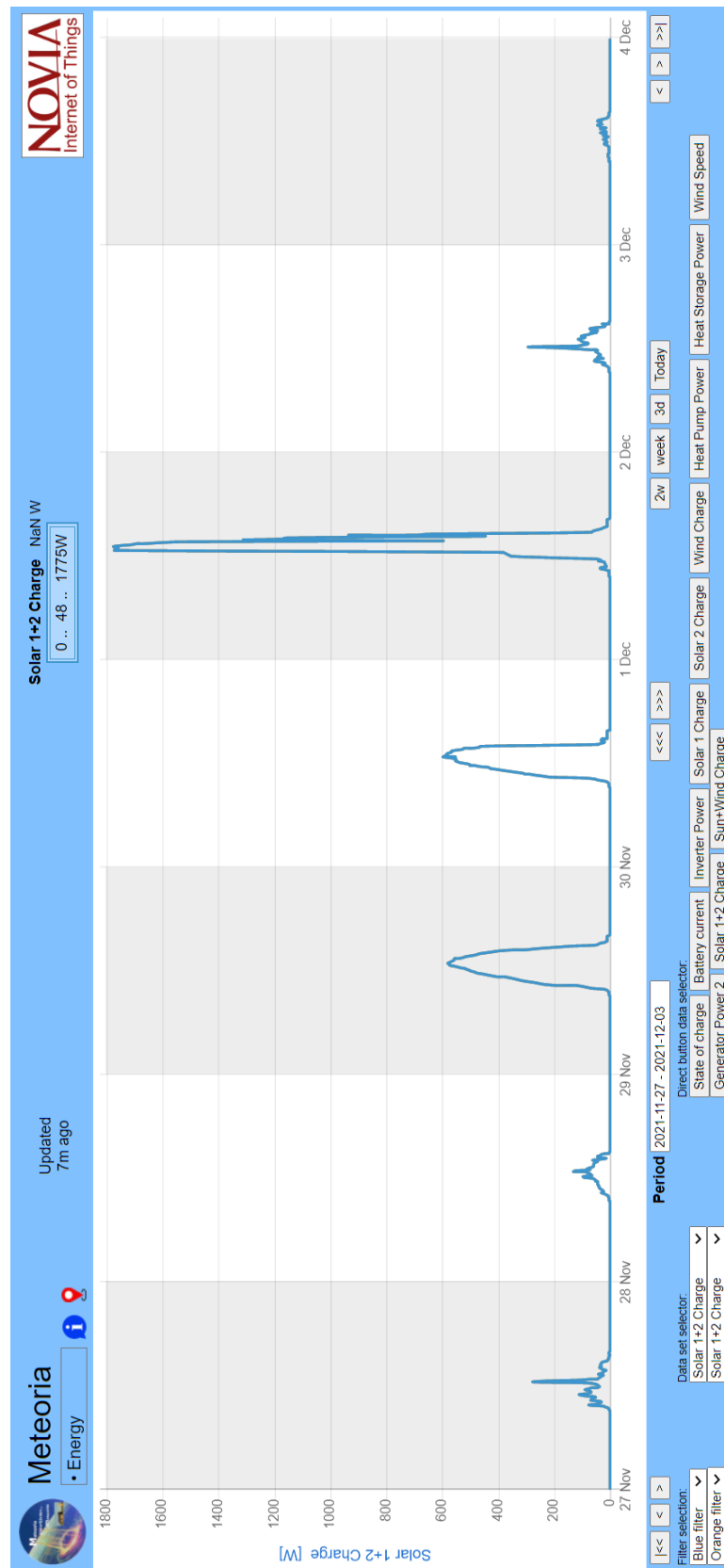
Bilaga 1: Effekten för den befintliga varmvattentankens värmare, fläktarna i utställningen och biodieselgeneratorn under augusti och september 2021.



Bilaga 2: Batteriernas spänning och generatorns inverkan i september 2021 (Novia IoT, 2022a).



Bilaga 3: Solpanelernas effekt november och december 2021 vid Meteorian (Novia IoT, 2022a).



Bilaga 4: Batteriernas spänning och generatorns inverkan under september till november 2021 (Novia IoT, 2022a).

