

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Termiska energilager – lösningen för ett flexibelt energisystem	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Thermal energy storage – a solution for a flexible energy system	
Universitet/högskola/företag Energiforsk	Avdelning/institution -
Adress Olof Palmes Gata 31	
Namn på projektledare Julia Kuylenstierna	
Namn på ev övriga projektdeltagare Jenny Holgersson, Håkan Sköldberg, Viktoria Martin, José Acuña	
Nyckelord: 5-7 st Termiska energilager, energilagring, kylager, borrhålslager, säsongslager, fjärrvärme	

Förord

Projektet *Termiska energilager – lösningen för ett flexibelt energisystem* har finansierats av Energimyndigheten genom programmet TERMO och i projektet deltagande energibolag: Ena Energi och Miljö, Göteborg Energi, Halmstad Energi och Miljö, Hässleholm Miljö, Jönköping Energi, Mälarenergi, Norrenergi, Tekniska verken i Linköping, Vattenfall och Öresundskraft Kraft&värme. Även teknikkonsultbolagen Bengt Dahlgren, FVB Sverige, RISE, Skövde Värmeverk, Sweco och ÅF Industry har deltagit i och finansierat projektet. Projektet har letts av en styrgrupp bestående av Ordförande Henrik Lindståhl (Tekniska verken i Linköping), Lennart Hjalmarsson (Göteborg energi), Per Haker (Hässleholm miljö), Einar Port (Mälarenergi), Morgan Romvall (Halmstads Energi och Miljö), Ted Edén (Norrenergi), Per Kallner (Vattenfall), Lina Hoffert (Öresundskraft), Erik Holmen (Ena Energi) och Patric Jönnervik (Jönköping energi). Suppleanter har bestått av Ulf Hagman (Göteborg Energi), Marianne Allmyr, (Mälarenergi AB), Mile Elez (Tekniska verken i Linköping AB), Jesper Baaring (Öresundskraft Kraft & Värme AB), Mats Svensson (Halmstad Energi och Miljö AB), Staffan Stymne (Norrenergi AB),

Energiforsk har varit huvudprojektledare och ansvarat för arbetspaket 1. *Projektledning, kommunikation och nyttiggörande*. Arbetspaket 2.1 *Jämförelse av termiska energilager* har letts av RISE genom Jenny Holgersson och utförts tillsammans med Oskar Räftegård (RISE), Saman Nimali Gunasekara (KTH) och Richard Scharff (Vattenfall). Arbetspaket 2.2 *Värdet av säsongslager* har letts av Profu och Håkan Sköldberg och utförts tillsammans med kollegorna Johan Holm och Arvid Rensfeldt. Arbetspaket 2.3 *Distribuerade kylager* har letts av KTH och Viktoria Martin och utförts tillsammans med Saman Nimali Gunasekara (KTH) och Ted Edén (Norrenergi). Arbetspaket 3 *Kraftvärme i samspel med borrhålslager* har letts av KTH genom José Acuña och genomförts tillsammans med kollegorna Alberto Lazzarotto, José Garcia, Willem Mazzotti Pallard, Monika Topel, Max Hesselbrandt, Malin Malmberg och Mohammad Abuasbeh.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
Summary	4
Inledning	5
Genomförande	6
WP 1. Projektledning, kommunikation och nyttiggörande.....	6
WP2.1. Tekno-ekonomisk jämförelse av olika tekniker för termiska energilager	6
WP2.2: Värdet av säsonglager	7
WP2.3 Distribuerade kylager	8
WP3 Kraftvärmeverk i samspel med borrhålslager	8
Resultat	9
WP2.1 Jämförelse av termiska energilager.....	9
WP2.2 Värdet av säsonglager	11
WP2.3 Distribuerade kylager.....	13
WP3 Kraftvärmeverk i samspel med borrhålslager	14
Diskussion.....	16
Publikationslista och referenser	17
Bilaga 1: Administrativ bilaga.....	19

Sammanfattning

Nedan presenteras en kort sammanställning av genomförande och resultat i projektet *Termiska energilager – lösningen för ett flexibelt energisystem*. För att ta del av de fullständiga resultaten och slutsatserna hänvisas läsaren till slutrapporterna i respektive arbetspaket, *Teknoekonomisk jämförelse av olika tekniker för termiska lager i fjärrvärmenät*, *Värdet av säsongslager i regionala energisystem – modellberäkningar av sex typsystem*, *Distributed Cold Storage in District Cooling* och *Tools for Design of High Temperature Borehole Storage in District Heating Production*. Sammanfattningen i detta dokument bygger på information från dessa rapporter.

Projektet startade för att ge större kunskap om hur, var och när termiska energilager kan utformas och användas, och vilka nyttor sådana lager kan ge och för att minska investeringsrisker i nya, innovativa lagringstekniker.

För att bidra till de övergripande målen har fem arbetspaket genomförts i projektet. Det första arbetspaketet *WP1 Projektledning, kommunikation och nyttiggöranden* har fokuserat på att sprida resultat från och information om projektet liksom verkat för utbyte och samarbete mellan akademi och industri, främst nationellt men också internationellt.

I arbetspaketet *WP2.1 Jämförelse av termiska energilager* har termiska lagringstekniker för fjärrvärmesystem kartlagts med syftet att belysa kostnader för installerade lager, dess miljöpåverkan, nyttor i fjärrvärmesystem, att identifiera utvecklingsbehov och sammanställa lärdomar från lager som byggts. Här har nyckelparametrar identifierats i samverkan med fjärrvärmebranschen som i sin tur kartläggningen utgår ifrån.

I arbetspaketet *WP2.2 Värdet av säsongslager* har den ekonomiska nyttan säsongslager kan skapa i fjärrvärmesystem kvantifierats. Även värdet av andra nyttor som ett säsongslager kan bidra med har uppskattats. Detta har utförts för sex olika typsystem, det vill säga fjärrvärmesystem med olika karaktär. Arbetet visar en metod för att bedöma vad ett säsongslager får kosta för att vara lönsamt.

I arbetspaketet *WP2.3 Distribuerade kylager* har tekniker för kylproduktion och kylager kartlagts. En fallstudie har genomförts där implementering av distribuerade kylager har analyserats genom simuleringar och tekno-ekonomiska prestandautvärderingar. Här jämförs olika alternativ för kylager i ett verkligt system. De olika alternativen utvärderas med avseende på ett antal nyckeltal och en bästa lösning presenteras. Distribuerade lager jämförs också med andra alternativ för en ökad efterfrågan på kyla som utbyggd distributions- eller produktionskapacitet.

I arbetspaketet *WP3 Kraftvärmeverk i samspel med borrhålslager* har ett beräkningsverktyg för design och optimering av borrhålslager kopplat till fjärrvärmeproduktionsanläggningar tagits fram. Verktyget ska kunna användas i samband med förstudier där potentialen för hög temperaturlagring i borrhål undersöks. Som ett komplement till beräkningsverktyget har en öppen källkod genererats, genom denna kan påverkan av grundvattenflöde på ett högtempererat borrhålslagers prestanda utvärderas. Både verktyget och koden är tillgängliga för användning.

Summary

This is a summary of methodology and results of the project *Thermal Energy Storage – a Solution for a Flexible Energy System*. For the complete results and conclusions, the reader is recommended to read the final reports in each work package; *Teknoekonomisk jämförelse av olika tekniker för termiska lager i fjärrvärmesät, Värdet av säsongslager i regionala energisystem – modellberäkningar av sex typsystem, Distributed Cold Storage in District Cooling and Tools for Design of High Temperature Borehole Storage in District Heating Production*.

The project was started to provide extended knowledge about how, where and when thermal energy storage can be designed and used, and what benefits such storages can provide. The project also aimed to contribute to lowering the risks when investing in new and innovative technologies.

To contribute to the overall goals, five work packages have been implemented in the project. The first work package WP1 Project management, communication and utilization has focused on disseminating results from, and information about, the project as well as contributing to knowledge transfer and collaboration between academia and industry.

In work package WP2.1 Comparison of thermal energy storages, thermal energy storage techniques have been mapped with the aim to illustrate costs for installed storages, their environmental impact and benefits in district heating systems, to identify development needs and compile lessons from storages that have been built.

In work package WP2.2 The value of seasonal storages, the economic benefit that seasonal storages can create in district heating systems has been quantified. The value of additional benefits that a seasonal storage can contribute with has also been estimated. This has been done for six district heating systems with different characteristics. The methodology developed in the project can be applied to other systems in addition to those included in the work package.

In the WP3 Borehole thermal energy storage in combined heat and power plants, a calculation tool for the design and optimization of borehole thermal energy storages connected to district heating production plants has been developed. The tool can be used during feasibility studies where the potential for high temperature storage in boreholes is investigated. As a complement to the calculation tool, a code has been generated which can be used to investigate how groundwater flow of different sizes affects the performance of a high-temperature borehole storage. Both the tool and the code are available for use.

Inledning

Termiska energilager är en familj av tekniker för lagring av termisk energi, det vill säga värme och kyla. Beroende på lagringsteknik, vilket system lagret verkar i och hur lagret används kan både rollen och nyttan ett lager bidra med skilja sig mycket. Generellt används termiska lager för att frikoppla energiproduktion från energibehov och på så sätt bidra till energisystemets flexibilitet. Med ökad flexibilitet underlättas användningen av återvunnen och förnybar energi genom att denna energi kan lagras och ersätta energiproduktion med större miljöpåverkan. Denna princip speglar också den ekonomiska nyttan som lager kan bidra till genom att energi med låg kostnad ersätter dyrare produktion. Vidare kan lager bidra med tryggare energiförsörjning genom att utgöra en reservkapacitet vid eventuella haverier och driftstörningar, bidra till jämnare drift och underlätta underhållsarbete i fjärrvärme- och kylsystem.

Även om termiska lager potentiellt kan spela många olika roller i energiomställningen är tekniker förutom centralt placerade ackumulatortankar som möter variationer på kortare sikt sällsynta i fjärrvärmeapplikationer. Därmed är lager som ska möta variationer på längre sikt samt distribuerade lager ute i nätet sällan förekommande. Med andra ord finns potentiella nyttor som inte realiserats fullt ut idag och det finns utmaningar som hindrar en omfattande implementering. Flera tekniker är omogna och obeprövade med höga investeringskostnader och höga investeringsrisker till följd och det finns behov av teknik- och kunskapsutveckling.

Projektet *Termiska lager – lösningen för ett flexibelt energisystem* startade för att bidra med kunskap i några av de mest centrala frågorna kopplat till fjärrvärme- och fjärrkylsystem. Projektet har haft två övergripande mål, nämligen att ge större kunskap om hur, var och när termiska energilager kan utformas och användas, och vilka nyttor sådana lager kan ge samt att bidra till minskad investeringsrisk i ny, innovativ lagringsteknik.

Projektet har bestått av fem arbetspaket där de specifika målen i respektive arbetspaket har bidragit till att projektets övergripande mål. Arbetspaketen har inte varit direkt sammankopplade utan syftar till att besvara olika prioriterade frågor. WP2.1 har kartlagt och jämfört olika tekniker för termisk lagring och dess nyttor i fjärrvärmesystem genom befintliga installationer utifrån tekniska och ekonomiska parametrar. Även i WP2.3 har en kartläggning av befintliga tekniker gjorts men här med fokus på kylager i fjärrkylsystem. Utöver att befintliga tekniker har kartlagts och utvärderats har specifika analyser kring distribuerade lager i fjärrkylanät gjorts. I WP2.2 undersöks värdet som säsongslager kan bidra med i fjärrvärmesystem och i WP3 utvecklas metoder och beräkningsverktyg för design och optimering av centralt placerade, högt tempererade borrhållslager i kraftvärmesystem.

Genomförande

Energiforsk har ansvarat för *WP 1. Projektledning, kommunikation och nyttiggörande* och genom detta haft det huvudsakliga ansvaret för projektet. En programstyrelse bestående av representanter från industrin har följt och kvalitetssäkrat de olika arbetspaketen (WP) och särskilda fokusgrupper har förstärkt vissa projekt ytterligare.

Arbetet i respektive arbetspaket har letts och genomförts av de utförare som ansvarat för det. Nedan presenteras respektive arbetspaket liksom ansvariga och involverade samt en mycket övergripande beskrivning av genomförandet.

WP 1. Projektledning, kommunikation och nyttiggörande

Energiforsk har ansvarat för WP1 som har handlat om projektledning, kommunikation och samverkan. Fredrik Martinsson och Julia Kuylenstierna har projektlett detta arbetspaket.

I WP1 har regelbundna möten hållits inom projektets styrgrupp. Under projektets gång har delresultat från arbetspaketen presenterats på webinarium, konferenser och workshops. Bilaterala kontakter eller kontakt inom fokusgrupper har skett mellan arbetspaketledare och industrirepresentanter. I arbetspaketet har också lärdomar och inspiration inhämtats från projekt utanför programmet, inom Sverige och internationellt genom konferenser, studiebesök och presentationer.

WP2.1. Tekno-ekonomisk jämförelse av olika tekniker för termiska energilagring

Research Institutes of Sweden, RISE, har varit ansvariga för WP2.1 och Jenny Holgersson har varit projektledare för arbetet. Arbetet har utförts av Jenny Holgersson, Oskar Räftegård (RISE), Saman Nimali Gunasekara (KTH) och Richard Scharff (Vattenfall). En fokusgrupp, tillika programmets styrgrupp, har följt och granskat projektet, denna presenteras i rapportens förord.

Syftet med WP2.1 har varit att belysa potentialen för termisk lagring i energiomställningen. Här har kostnader och lärdomar för installerade lager kartlagts liksom dess miljöpåverkan och nyttor i fjärrvärmenät. Utifrån detta har också studien belyst vilken utveckling som krävs. Studien har avgränsats till lager där fjärrvärme kan användas som energibärare vid inladdning och/eller urladdning. I den litteraturstudie som gjorts av verkliga lager i drift i fjärrvärmenät ingår även lager där värmepumpande teknik används för att uppgradera den lagrade värmen till användbar temperatur. I litteraturstudien utgör varmvattenackumuleringstankar för korttidslagring en referens.

Resultaten har tagits fram genom sex steg som presenteras nedan:

1. Workshops där representanter från energibolag, konsulter och akademi inom fjärrvärmesektorn tagit fram parametrar och egenskaper/aspekter för lager som de anser är viktiga
2. Litteraturstudie av verklig prestanda för driftsatta lager i fjärrvärmenät samt studiebesök, där värden för parametrarna under punkt 1 eftersökts
3. Kompletterande arbetsmöten där nyttor, nackdelar och hur gapet mellan nuvarande teknikmognad och en framtida implementering ska fyllas diskuterats

4. Nyttöanalys där funna lagertyper ha matchats mot de nyttor som framkommit under workshopen med avseende på effekt, energi och arbetstemperaturer
5. Gap-analys. Där gapet mellan behov och tekniskt/ekonomiskt/miljömässigt möjligt genomförbara tillämpningar har undersökts. Gap-analysen ligger till grund för forsknings- och utvecklingspotential för lagren
6. Slutligen har en kompletterande litteratursökning gjorts kring den akademiska teoribildning som finns kring kategorisering av lager och deras värdeskapande.

WP2.2: Värdet av säsonglager

Profu har genomfört och ansvarat för WP2.2 och Håkan Sköldberg har varit projektledare för arbetet. Arbetet har utförts av Håkan tillsammans med Johan Holm och Arvid Rensfeldt från Profu.

En fokusgrupp bestående av Morgan Romvall (Halmstad Energi och Miljö AB), Per Haker (Hässleholm Miljö AB), Patric Jönnervik (Jönköping Energi AB), Petra Nilsson (Växjö Energi), Filip Trotz (Hässleholm Miljö), David Lander (Växjö Energi AB), Mutaz Alkiswani (Öresundskraft Kraft & Värme AB) och Joacim Cederwall (Jönköping Energi) har följt och kvalitetssäkrat projektet.

I arbetspaketet har målet varit att beräkna värdet av ett säsonglager sett ur fjärrvärmesystemets perspektiv. Värdet består av att lagret skapar en driftnytta genom att billig värme under sommarhalvåret kan sparas för att ersätta dyrare värmeproduktion vintertid. Men också andra nyttor som ett säsonglager kan bidra med har analyserats.

För att få en uppfattning om hur olika fjärrvärmesystems förutsättningar påverkar driftnyttan som ett säsonglager tillför har totalt sex olika system modellerats och analyserats. En modell har erhållits från varje fjärrvärmebolag och denna har sedan utvecklats för att representera den undersökta tidsperioden med energipriser, anläggningar samt parametrar för säsongslagret. Utvecklingen av dessa system har stämts av med representanter från respektive bolag där synpunkter och kommentarer om modell och preliminära resultat har tagits emot och diskuterats för att säkerställa en så korrekt bild av systemen och lagrets förutsättningar som möjligt.

Beräknings- och modelleringsarbetet har huvudsakligen utförts med programvaran Martes som utvecklats av Profu för simulering och strategisk analys av fjärrvärmeproduktion. För vart och ett av systemen identifieras den årliga driftnytta som lagret skapar. Värdet av lagret beräknas för varje fjärrvärmesystem samt för olika energimängd och effekt på in- och urladdning. Baserat på beräkningarna av typsystemen görs betraktelser av skillnader och likheter och generella resultat identifieras. År 2030 har bedömts vara ett representativt år för den tid då ett lager skulle vara i drift och antaganden om relevanta omvärldsfaktorer, exempelvis bränsle- och elpriser, har gjorts för det året och de ligger alltså till grund för de beräkningar som genomförts. För säsongslagret har projektutförarna valt ett antal egenskaper, dessa beskrivs i arbetspaketets rapport *”Värdet av säsonglager i regionala energisystem – modellberäkningar av sex typsystem”*. Det handlar till exempel om lagrets temperatur- och energiförluster och driftstrategier.

Resultatens robusthet har undersökts genom känslighetsanalyser för nivån på mottagningsavgift på avfall, elpris och pris på biobränslen eftersom dessa parametrar påverkar lagrets driftnytta.

WP2.3 Distribuerade kylager

Kungliga Tekniska Högskolan, KTH, har ansvarat för arbetspaketet genom Viktoria Martin. Projektet har genomförts av Saman Nimali Gunasekara (KTH), tillsammans med Viktoria Martin och Ted Edén (Norrenergi). En fokusgrupp, tillika programmets styrgrupp, har följt och granskat projektet, denna presenteras i rapportens förord.

Arbetspaketet har undersökt hur distribuerade kylager, det vill säga kylager placerade ute i nätet, kan integreras i fjärrkylasystem och vilken nytta de kan bidra med. Detta är gjort främst genom en kartläggning där olika tekniker för kylproduktion och kylager har sammanställts och en fallstudie där implementering av kylager i Norrenergis fjärrkylanät har analyserats genom simuleringar och utvärderingar av tekno-ekonomisk prestanda.

Den första delen av arbetet bestod av en systembeskrivning där nuvarande kunskapsläge och status för användningen av distribuerade och centrala kylager i fjärrkylasystem sammanställdes liksom tekniker för fjärrkylaproduktion. Detta gjordes genom en litteraturgenomgång som kompletterades med detaljerade sökningar för befintliga kylager som installerats och en sammanställning av erfarenheter, bland annat genom kontakt med anläggningsägare.

Med den första genomgången som grund fortsatte den andra delen av arbetet, att utvärdera teknoekonomisk prestanda och driftstrategier för olika kylagerlösningar. Här jämfördes först olika alternativa kylagerlösningar genom en litteraturgenomgång. Det visade sig att information om andra tekniker än kallvattenlager var begränsad men några viktiga jämförelser kunde ändå göras. Litteraturgenomgången följdes av analyser av olika alternativ för distribuerade kylager. För dessa analyser studerades Norrenergis system som en fallstudie där produktionsoptimeringsverktyget BoFit och det dynamiska nätsimuleringsverktyget Netsim användes. Olika scenarion där kylager adderades till Norrenergis befintliga system (som utgjorde basfallet) modellerades och utvärderades varpå det bästa scenariot utifrån ett antal nyckelparametrar valdes. Detta scenario ställdes sedan mot basfallet och ytterligare två alternativa investeringar (utbyggnad av distributionsnätet och investering i en kylmaskin) för en ökad efterfråga på 10 %. Kostnader för drift och investering jämförs för de olika alternativen.

För att undersöka resultatens robusthet genomfördes en känslighetsanalys där marktemperatur och elpris varierades.

WP3 Kraftvärmeverk i samspel med borrhålslager

WP3 har letts av José Acuña på Kungliga Tekniska Högskolan, KTH och genomförts tillsammans med kollegorna Alberto Lazzarotto, José Garcia, Willem Mazzotti Pallard, Monika Topel, Max Hesselbrandt, Malin Malmberg och Mohammad Abuasbeh. Arbetspaketet har följts och granskats av programmets styrgrupp, denna presenteras i rapportens förord.

I arbetspaketet har målet varit att utveckla en modell för att dimensionera och optimera ett borrhålslager i ett fjärrvärmesystem med hänsyn till grundvattenflöden. I applikationer med hög temperatur kan ett eventuellt grundvattenflöde runt borrhålen påverka lagrets prestanda negativt. Vanligtvis beaktas inte grundvattenströmningar kring borrhål vid modellering av system med borrhålslager då värmetransport genom värmeledning ofta antas vara den enda dominerande värmeöverföringsmekanismen. Men i det här arbetspaketet har också påverkan av grundvattenflöde undersökts.

Arbetet har bestått av tre delar där den första delen har handlat om att utveckla ett fristående beräkningsverktyg för design av borrhålslager. Den andra delen har fokuserat på att utveckla modeller för grundvattenflödets påverkan på borrhålslagets prestanda och den tredje delen på metoder för optimering av prestanda i högtempererade borrhålslager.

För att ta fram det fristående beräkningsverktyget utvecklades en statisk dimensioneringsmodell av verktygets huvudsakliga komponenter följt av utvecklingen av en dynamisk modell i programmet TRNSYS. Beräkningsverktyget har utvecklats iterativt med hjälp av en befintlig modell för borrhålens interaktion med berggrunden liksom implementering av anpassade ekvationer och komponenter. Ett antal versioner av verktyget har delats med representanter från projektets styrgrupp.

I arbetets andra del har en metod för att kvantifiera grundvattenflödets påverkan på borrhålslagets prestanda tagits fram. Detta genom utveckling av en analytisk och en numerisk modelleringsmetod där effekten av grundvattenflöde har undersökts genom energi- och exergianalyser för olika scenarier med grundvattenflöde. Modellen har validerats genom jämförelse med verkliga data från ett existerande lager.

I arbetspaketets tredje del har metoder för optimering av prestanda i högtempererade borrhålslager föreslagits. Här har ett stort antal simuleringar genomförts för att illustrera hur det fristående beräkningsverktyget kan användas och vilka effekterna av olika inputs och systemkrav blir.

Beräkningsresultaten i samtliga delar av arbetet presenteras i termer av exergiprestanda, eftersom exergi tar hänsyn till mängden värme som utbyts men även till temperaturen vid vilken denna värme utbyts.

Resultat

För arbetspaket 2.1 *Jämförelse av termiska energilager*, 2.2 *Värdet av säsongslager*, 2.3 *Distribuerade kyllager* och 3 *Kraftvärmeverk i samspel med borrhålslager* finns fullständiga slutrapporter publicerade. Inom projektet har också ett flertal publikationer gjorts, dessa finns sammanställda i respektive rapport. För att förstå resultaten i sitt sammanhang rekommenderas att läsa de fullständiga rapporterna. Den resultatpresentation som följer är en sammanfattning av resultat som framkommit i projektens arbetspaket.

WP2.1 Jämförelse av termiska energilager

I arbetspaketet 2.1 *Jämförelse av termiska energilager* konstateras att det är svårt att utvärdera potentialen för termisk lagring i energiomställningen utan heltäckande jämförande studier av olika termiska lagringstekniker för fjärrvärme. Därför har

arbetspaketets mål varit att belysa frågeställningar om kostanden för installerade lager, vilken miljöpåverkan lagren har, vilka nyttor ett lager skapar i ett fjärrvärmenät, liksom lärdomarna från de lager som har byggts och identifiering av vilken utveckling behövs. I arbetet presenteras parametrar som är viktiga för att avgöra prestanda och lämplighet hos termiska lager i fjärrvärmesystem. Dessa har tagits fram tillsammans med representanter från energibranschen och visas i tabell 1 nedan.

Tabell 1. Viktiga parametrar för termiska lager för fjärrvärmesystem som kartläggningen baseras på

Parameter	Förklaring	Enhet
Energitäthet	Energimängd per massenhet	[MWh/m ³]
Effekttäthet	Effekt per massenhet	[kW/m ³]
Kostnad/MWh Kostnad/MW	Kostnad med avseende på lagrets installerade kapacitet och effekt	[SEK/MWh], [SEK/kW]
Laddningstemperatur	Temperatur vid laddning	[°C]
Urladdningstemperatur	Temperatur vid urladdning	[°C]
Returtemperatur vid laddning	Temperatur på återvändande värmebärare vid uppladdning av lagret	[°C]
Verkningsgrad	Utvunnen energi per inlagrad energi	[%]
Systemintegration	Placering i systemet	
Drifttillgänglighet	Förekomst av störningar och stopp	[-]
Implementering	Möjlighet att installera i ett nät	[-]
Miljö/Utsläpp	Påverkan på närmiljö och klimat	[-]

Som tabellen visar är energi- och effekttäthet viktiga parametrar för lager i fjärrvärmesystem liksom kostnader med avseende på energi och effekt samt temperaturer och verkningsgrad. De mer kvantitativa parametrarna systemintegration, drifttillgänglighet, implementering och påverkan på miljö och klimat anses också viktiga att ta hänsyn till för termiska lager i fjärrvärmesystem.

I arbetspaketet har ett 70-tal driftsatta termiska lager, förutom ackumulatortankar, som kan fungera i fjärrvärmenät kartlagts. De kartlagda lagren återfinns framför allt i norra Europa men även Kanada och Turkiet.

För de olika lagringsteknikerna har parametrarna i tabellen ovan eftersökts. De lagringstekniker som nått sådan mognad att de demonstrerats i fjärrvärmenät eller snarlika miljöer, i relevant skala är främst sensibla ackumuleringslager med varmvatten i form av gropar, berggrum, cisterner, eller i form av marklager där kombination av grundvatten och berg/grus används, t.ex. borrhålslager och akviferlager. Till de omogna lagringsteknikerna, d.v.s. de som ännu inte demonstrerats i relevant skala hör generellt

latenta lager (fasändring) och termokemiska reaktioner inkluderande absorption och adsorption.

Viktig utveckling för de tekniskmogna lagren handlar om att sänka anläggningskostnaden vid byggnation, öka prestanda, främst att tåla högre temperatur och att minska temperaturförluster och öka och sprida kunskap om lager i drift, inte minst gällande dimensionering och konstruktion. För de omogna teknikerna sträcker sig utmaningarna från kvarstående grundforskning till att attrahera intresse och kapital till demonstration i industriellt relevant (fjärrvärme-) miljö.

På en övergripande nivå visar kartläggningen att borrhålslagren har lägst investeringskostnad sett till lagrad energi, likaså några av groplagren. Grop- och berggrumslagren har låga kostnader i förhållande till levererad effekt, till skillnad mot borrhålslagren, men det kan konstateras att effekt inte är dimensionerande (och därmed inte kostnadsdrivande) för investeringskostnaden för flera lagertyper och blir därmed svår att jämföra. Förutom ovan nämnda tre lagertyper som är relativt tekniskt mogna, har lager med fasändringsmaterial och termokemiska lager potential att i framtiden kunna användas för fjärrvärmertilämpningar, men detta kräver mycket utveckling. Kartläggningen visar att energitätheten är lägst för akviferlager (6,5 kWh/m³), följt av borrhålslager (14 kWh/m³) och högst för de termokemiska lagren som bygger på sorption (120 kWh/m³). Lager som använder vatten som lagringsmedium ligger mellan dessa extremvärden men här visar kartläggningen att värdet mellan olika installationer varierar beroende på lagrets arbetstemperaturer som i sin tur påverkas av systemspecifika förutsättningar som t.ex. nyttjande av värmepump. Den negativa miljöpåverkan är begränsad och består främst av effekt av läckage av vatten så väl som kemikalier.

Projektet omfattade även att genomföra en nyttoanalys. Resultatet från denna var bland annat att lager möjliggör ökad produktion från billiga värmekällor och att de kan användas till att lagra billig överskottsel. Effekterna på energisystemet blev flera, till exempel att mer förnybar produktion kan installeras i elsystemet, investeringar i nya pannor kan undvikas och mer restvärme kan nyttjas.

I arbetspaketet konstateras att idag används termiska lager inom fjärrvärmebranschen som korttidslagring i centralt placerade ackumulatortankar och att det inte finns något som tyder på att någon annan teknik för centralt placerad korttidslagring kommer att bli konkurrenskraftig i närtid. För långtidslagring konstateras att investering i ett marklager kan vara en kostnadsbesparing redan idag, till exempel om produktionen i nätet behöver utökas och lagret ersätter investering i panna. Grundläggande förutsättningar för långtidslagers lönsamhet är tillgång till billig värmeproduktion för laddning av lagret, att framledningstemperaturen vid urladdning är lågtempererad och att nätets returtemperatur i sig är låg.

WP2.2 Värdet av säsongslager

I arbetspaketet har målet varit att beräkna värdet av ett säsongslager sett ur fjärrvärmesystemets perspektiv. Lagret skapar en driftnytta genom att billig värme under sommarhalvåret kan sparas för att ersätta dyrare värmeproduktion vintertid. Vidare har andra nyttor som ett säsongslager kan bidra med analyserats.

Bäst förutsättningar för ett säsongslager har man naturligtvis om det finns utnyttjade tillgångar av billig värme att ladda lagret med och dyr värme att ersätta då lagret laddas ur. För att skapa lönsamhet bör lagret kunna laddas med värme som har nära nollkostnad. Det kan då exempelvis handla om industriell restvärme eller värme från energiåtervinning av avfall. Om lagret gör det möjligt att utnyttja utnyttjad kapacitet för avfallsförbränning och därmed ta emot mer avfall för energiåtervinning kan kostnaden för värmen som lagras till och med bli negativ genom de ökade intäkterna för avfallets mottagningsavgift. Då lagret laddas ur vill man naturligtvis ersätta den dyraste topplastproduktionen. Det finns alltid en avtagande nytta av storleken på lagret. I takt med att den billigaste värmen att lagra utnyttjats fullt och den dyraste topplastproduktionen ersatts vid urladdning så minskar den tillkommande nyttan av större lager, både med avseende på energi och effekt. Samtidigt som mycket talar för att det finns skalfördelar för lagret.

Som förväntat skiljer sig utfallet avsevärt mellan de olika systemen. Den årliga driftnyttan av säsongslagret per lagerstorlek varierar för typsystemen mellan 0,1 och 0,6 Mkr/GWh. En tillkommande nytta som ett lager erbjuder är att det helt eller delvis kan eliminera behovet av viss utbyggnad av annan värmeproduktion. Här har uppskattningar gjorts som bygger på att lagret ersätter utbyggnad av en pelletsbrennpanna. Typiskt ökar då lagrets ekonomiska nytta med storleksordningen 50 %, även om variationerna även här är stora.

I fjärrvärmedistributionen och i överföringsledningar mellan olika fjärrvärmesystem finns ofta kapacitetsbegränsningar, "flaskhalsar". Det innebär att lokaliseringen av säsongslagret får betydelse för den driftnytta som lagret kan skapa. Flaskhalsar kan innebära att lagret vid urladdning inte förmår ersätta den dyraste värmeproduktionen om värmetransporten till det delsystem där den värme-produktionen är lokaliserad omöjliggörs av flaskhalsar. För att komma ifrån detta kan överförings-förbindelserna byggas ut eller lagret lokaliseras på annan plats. Ett lager placerat på rätt plats kan minska de ekonomiska konsekvenserna av flaskhalsar.

I modellberäkningarna har man utgått från en omsättning av lagervolymen per år. I verkligheten kan ett säsongslager även utnyttjas för korttidslagring och återladdning under vintersäsongen. Grova uppskattningar antyder att lageromsättningen skulle kunna öka till säg 1,8. Det finns också indikationer på att driftnyttan skulle kunna öka ungefär proportionellt mot detta. Möjligheterna till realisering i verkligheten begränsas dock delvis av svårigheterna att förutse de framtida värmebehovsvariationerna. I många svenska fjärrvärmesystem finns dessutom redan korttidslagring i form av ackumulatörer.

Den känslighetsanalys som genomförts med avseende på några viktiga omvärldsförutsättningar antyder att de beräknade driftnyttorna med säsongslagret är robust och alltså inte påverkas signifikant av parametervariationerna.

De genomförda beräkningarna kan sägas ge en uppskattning av hur mycket ett säsongslager skulle få kosta för att vara lönsamt. Med de beräkningsförutsättningar som utnyttjats och för de typsystemen som studerats så kan man som ett exempel säga att ett lager på 50 GWh maximalt får kosta 250 - 1000 Mkr, beroende på bland annat fjärrvärmesystemets förutsättningar, lagrets urladdningseffekt, vilket värde man tillmäter undvikna investeringar i annan värmeproduktion och möjligheterna att använda lagret för

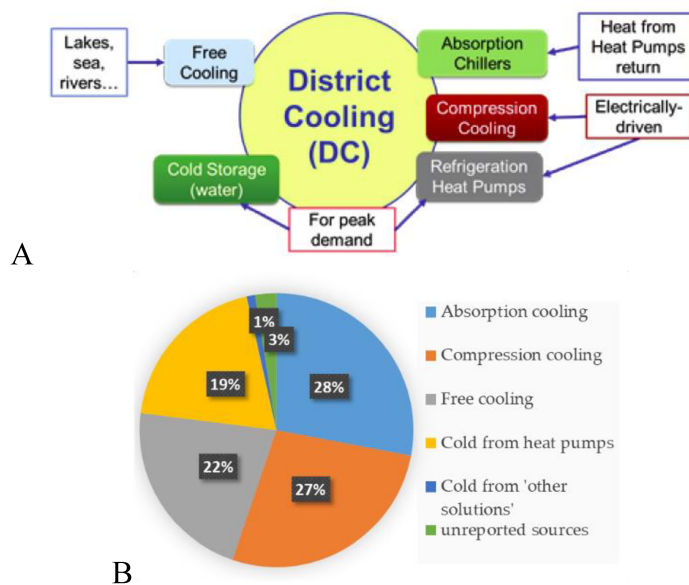
korttidslagring, m.m. Variationen är alltså stor och de specifika förutsättningarna i respektive fjärrvärmesystem är avgörande.

Även om kostnadsberäkningar för olika säsongslager inte ingick i arbetspaketet lyfts ett exempel där investeringskostnad för ett möjligt stort säsongslager har identifierats. Denna kostnad ställs i relation till de nyttor som identifierat för ett säsongslager. Även om osäkerheterna är stora och underlaget begränsat indikerar exemplet att den direkta driftnyttan inte är tillräcklig för att ”räkna hem” ett säsongslager, men om tillkommande värden adderas och om övriga förutsättningar är gynnsamma så kan det vara möjligt att finna lönsamhet med ett säsongslager.

WP2.3 Distribuerade kylager

Arbetspaketet har undersökt hur distribuerade kylager kan integreras i fjärrkylasystem och vilken nytta de kan bidra med.

Den genomförda litteraturstudien visar att den svenska fjärrkylproduktionen till stora delar består av absorptionskylare, kompressionskylare, frikylning och värmepumpar. I Figur 1 visas fördelning mellan olika tekniker för kylproduktion och för fjärrkylproduktion i Sverige.



**Figur 1. A) Presentation av tekniker för fjärrkylproduktion i Sverige
B) Fördelning av tekniker för kylproduktion i Sverige**

Den kartläggning av kylager som gjorts i projektet visar att kylager i svenska fjärrvärmesystem nästan uteslutande är kallvattenlager med undantag för ett kylager i Sundsvall där snö lagras säsongsvis för att kyla ett sjukhus. Internationella exempel av kylager utöver kallvattenlager visar att snö och is som fasändringsmaterial är fördelaktigt i tätbebyggda områden eftersom de är mer kompakta än vattenlager. Fasändringsmaterial förutom snö och is samt termokemiska lager har låg teknisk mognadsgrad och är sällsynta inom kommersiella tillämpningar i fjärrkylasystem. Men det finns exempel på framför allt pilot- och demonstrationsnivå även om dessa främst förekommer i andra system. Sammanfattningsvis har kartläggningen av befintliga kylager i fjärrkylanät visat att mer

kompakta och flexibla tekniker för lagring av kyla kan komplettera de befintliga lager som finns idag. Dock behövs teknikutveckling och kostnadsreduktion för att förverkliga denna potential.

Resultaten från den fallstudie som utförts i projektet visar att det finns potentiella kostnadsbesparingar att göra genom att implementera kylager i fjärrkylasystemens distributionsnät. Besparingarna består främst av ett minskat elbehov under topplasttimmarna. I stället kan energi från de distribuerade lagren användas under timmar med höga elpriser, dessa laddas nattetid eller under andra tider på dygnet då elpriserna är låga.

I arbetspaketet har olika storlekar och placeringar av kylager i Norrenergis system undersökts med hjälp av verktygen Bofit för produktionsoptimering och Netsim för dynamisk nätsimulering. Av de scenarion som jämförts framgår det att två stycken kylager (centralt respektive distribuerat placerade) med effekter på 7,5 MW vardera, leder till de största besparingarna jämfört med basfallet. Scenariot innebär energikostnader på 99 SEK/MWhkyla och på 589 SEK/MWhel, jämfört med basfallet där dessa kostnader är 105 SEK/MWhkyla och 608 SEK/MWhel.

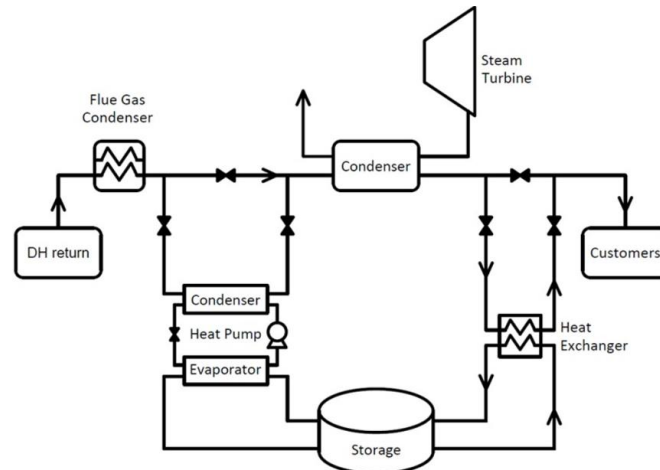
Denna lösning jämfördes med andra alternativ för en efterfrågan på kyla som ökar med 10 %. Den ena lösningen var att en ny röranslutning på ca 420 meter byggs i ett område med låga differenstryck och den andra är att en ny kylmaskin med en kapacitet på 6 MW installeras. Då driftkostnader och investeringskostnader för dessa tre alternativ beräknades per år visar sig lösningen med distribuerade kylager var mest kostnadseffektiv. Detta alternativ medför 3% årliga totala kostnadsbesparingar jämfört med basfallet samtidigt som 16% och 4,5% av investerings- och driftkostnaderna i en ny kylare eller en ny rörförlängning kan undvikas.

I arbetspaketets slutrapport kan läsaren ta del av den fullständiga kartläggningen av nuläget för kylager i svenska fjärrkylanät liksom utvärderingen som gjorts mellan olika scenarion av distribuerade nät i ett verkligt system samt generella slutsatser kring distribuerade lager i fjärrkylanät.

WP3 Kraftvärmeverk i samspel med borrhålslager

Värmeöverföringen i borrhålslager är beroende av markens termiska egenskaper, men också av eventuella grundvattenströmningar genom sprickor i bergmassan som omger borrhålen. I *Kraftvärmeverk i samspel med borrhålslager* har ett fristående beräkningsverktyg för design, simulering och optimering av högtemperaturborrhålslager i kraftvärmeverk utvecklats. Projektet har också inkluderat modellutveckling för att kvantifiera det inflytande som grundvattenrörelsen kan ha på högtemperaturborrhålslager, vilket vanligtvis inte beaktas vid utformningen av dessa system.

Arbetspaketet har resulterat i ett fristående verktyg för beräkning och optimering av borrhålslager kopplat till en fjärrvärmeproduktionsanläggning. Beräkningsverktyget hjälper användaren att bestämma, för givna begränsningar och användarkrav, en preliminär storlek på ett borrhålslager och värmepumpsystem. Beräkningsverktyget kan exempelvis användas i samband med förstudier där potentialen för högtempererad lagring i borrhål undersöks. Systemet som simuleras visas i ett förenklat diagram i Figur 2.



Figur 2. Schematisk bild som illustrerar systemet som simulerats i projektet.

Det finns två driftfall i beräkningsverktyget, sommar och vinter. Under sommaren laddas borrhåslagret med varmt vatten från kraftvärmeanläggningens kondensorn. Urladdningen sker med hjälp av en värmepump under vintern där värmen används för att förvärma inloppet till kondensorn.

Beräkningarna utförs i två steg, där det första steget består av statistiska beräkningar för att snabbt erhålla en systemstorlek för de tre huvudkomponenterna; värmeväxlare, värmepump och borrhåslagret. Borrhåslagrets erforderliga effekt, temperaturer och flöden utgör input till beräkningsverktyget. Komponenterna är dimensionerade för effekter mellan 10 och 50 MW och temperaturen i slutet av valfri urladdningsperiod används som ett kriterium för att tillgodose användarnas krav. Antalet borrhål justeras iterativt. När preliminära designkriterier är uppfyllda används resultaten som indata till det andra beräkningssteget som består av dynamiska simuleringar. I detta steg simuleras systemet under ett antal år som användaren väljer varpå användaren kan erhålla simuleringsresultaten för samtliga simulerade år i både grafisk format och i tabellform.

Förutsatt att inte all indata måste hållas konstant kan användaren nyttja de optimeringskartor som tagits fram i arbetspaketet. Optimeringskartorna visar de bästa lösningarna som kan erhållas för borrhåslager med olika egenskaper.

Arbetspaketet har också tagit fram en analytisk och en numerisk modelleringsmetod för att undersöka påverkan av grundvattenflöde i system med högt tempererade borrhåslager. Effekterna har undersökt genom att påverkan på energi och exergi analyserats. Dessa modeller är inte direkt kopplade till det fristående beräkningsverktyget som tagits fram inom projektet men kan utgöra ett komplement. Här kan den öppna källkod som tagits fram användas för generella beräkningar av grundvattenflödets påverkan i högt temperaturlager. Som förväntat är effekter av grundvattenflöde svåra att generalisera, varje borrhåslager kräver sin egen specifika modell. Även om det finns situationer där effekten av grundvattenflödet är försumbar (eller positiv), visar modellerna som utvecklats i detta arbete att grundvattenflöden av rimlig storlek har en negativ inverkan på prestandan i högt temperaturlager. Beräkningsverktygen kan laddas ned här: <https://energiforsk.se/program/termiska-energilager/rapporter/tools-for-design-of-high-temperature-borehole-storage-in-dhp-2021-770/>

Diskussion

Projektet *Termiska lager – lösningen för ett flexibelt energisystem* startade för att ge större kunskap om hur, var och när termiska energilager kan utformas och användas, och vilka nyttor sådana lager kan ge.

Beroende på vilken roll ett lager ska uppfylla och vilket system det verkar i finns många olika svar på denna frågeställning. Det som blivit allt tydligare i projektet är att lager i många fall är unika. Dels är prestanda för flera tekniker platsspecifik och beror på lokala förutsättningar, t.ex. marklager där berggrundens beskaffenheter eller tillgängliga kaviteter påverkar kostnader och prestanda. Dels är det svårt att lyfta ut prestandan för ett visst lager utan att ta hänsyn till det systemet lagret verkar i. Men det finns så klart generella fakta och metoder att ta fasta på där några lärdomar från projektet lyfts nedan.

För säsongsvärmelager konstateras att laddning bör ske med värme som har nära noll-kostnad för att skapa lönsamhet. Här finns de bästa förutsättningarna i system med outnyttjade tillgångar av billig värme att ladda lagret med och dyr värme att ersätta då lagret laddas ur (se WP2.2). Ett liknande konstaterade görs i WP2.1 där man skriver att grundläggande förutsättningar för lönsamhet vid långtidslagring är tillgång till billig värmeproduktion för laddning av lagret och att framledningstemperaturen vid urladdning och nätets returtemperatur är låga. I samma arbetspaket konstateras att investering i ett marklager kan vara en kostnadsbesparing redan idag om förutsättningarna är rätt. Men värdet av ett lager har visats variera stort mellan olika fjärrvärmesystem (se WP2.2).

Projektet belyser också olika placeringar som termiska lager kan ha. I WP2.1 presenteras temperaturnivåer för potentiella placeringar så som centrala lager, distribuerade lager och fastighetsnära lager. Samtidigt konstateras att annat än centrala lager är sällsynta idag. I WP2.3 görs en omfattande analys av distribuerade kylager och här visas att dessa bland annat kan vara ett mer kostnadseffektivt sätt att möta en ökad efterfrågan på kyla än utbyggnad av distributionsnätet eller investering i produktionskapacitet. Även i WP2.2 belyses placeringens vikt och här konstateras att lokaliseringen av ett säsongslager får betydelse för den driftnytta som lagret kan skapa - ett lager placerat på rätt plats kan minska de ekonomiska konsekvenserna av flaskhalsar.

Projektet har också haft som mål att bidra till minskad investeringsrisk i ny innovativ teknik. Här har exempelvis kartläggningar av olika tekniker genom befintliga installationer i WP2.1 och WP2.3 bidragit till att öka kunskapen om verkliga lager i drift liksom lager under utveckling och deras kostnader. Den som är intresserad av säsongslager kan för aktuellt system beräkna värdet för ett sådant med vägledning av den beräkningsmetodik som tagits fram i WP2.2. På liknande vis kan den som vill jämföra alternativa placeringar och resulterande ekonomiska effekter för kylager i fjärrkylanät ta hjälp av metodiken som använts i WP2.3. För design och optimering samt erhållande av nuvärde för ett centralt borrhålslager i ett kraftvärmesystem kan det beräkningsverktyg som tagits fram i WP3 användas och för att ta reda på inverkan av eventuellt grundvattenflöde kan även den öppna källkoden användas.

Projektet har utgjort en arena för erfarenhetsutbyte och dialog inom energibranschen och mellan industri och akademi liksom med internationella organisationer, främst i Norden,

som arbetar med termisk energilagring. Inom denna arena har de projektspecifika resultaten diskuterats och lyfts tillsammans med resultat från andra initiativ och projekt.

Publikationslista och referenser

Den här sammanställningen bygger på de publikationer som tagits fram i projektet och listas nedan.

A. Yevalkar “Integrated Combined Heat and Power Plant with Borehole Thermal Energy Storage”, KTH Royal Institute of Technology, 2019

B. Yifru Woldemariam ” Optimization of Distributed Cooling and Cold Storage in Sweden: Case Study - Norrenergi AB”, KTH Royal Institute of Technology 2019

H. Sköldberg, J. Holm, A. Rensfeldt ”Värdet av säsongslager i regionala energisystem – modellberäkningar av sex typs-system” Energiforsk 2019:624, ISBN 978-91-7673-624-1, oktober 2019.

J. Acuña, A. Lazzarotto, J. Garcia, W. Mazzotti Pallard, M. Topel, M. Hesselbrandt, M. Malmberg, M. Abuasbeh “Tools For Design of High Temperature Borehole Storage In District Heating” Energiforsk 2021:770, ISBN 978-91-7673-770-5, april 2021.

J. Holgersson, O. Räftegård, S. N. Gunasekara, R. Scharff ”Teknoekonomisk jämförelse av olika tekniker för termiska lager i fjärrvärmenät” Energiforsk 2019:598, ISBN 978-91-7673-598-5, augusti 2019.

J. Kuylenstierna “Termisk energilagring i fjärrvärmenät”, Kungliga tekniska högskolan 2019.

M. Hesselbrandt ”Performance analysis of a high temperature borehole thermal energy storage under influence of groundwater flow”, KTH Royal Institute of Technology, 2020

M. Malmberg, W. Mazzotti Pallard, J. Acuna, H. Lindstahl, and A. Lazzarotto “High Temperature Borehole Thermal Energy Storage - A Case Study” In Research Conference Proceedings, s.380-388, 2018

S.N. Gunasekara et al.,” Distributed cold storages for district cooling in Sweden- The current context and opportunities for the cold supply expansion”, Eurotherm Seminar #112 Advances in Thermal Energy Storage, artikel-id Y129, 2019.

S. N. Gunasekara, V. Martin, T. Edén “Distributed Cold Storage in District Cooling” Energiforsk 2021:751, ISBN 978-91-7673-751-4, mars 2021.

W. Mazzotti Pallard, A. Lazzarotto, J. Acuna, B. Palm ”Design methodology for laboratory scale borehole storage: an approach based on analytically-derived scaling laws and numerical simulations” Geothermics Vol. 87, artikel-id 101856, 2020.

Z. Bilek ”Performance assessment in district cooling networks using distributed cold storages: A case study”, KTH Royal Institute of Technology 2020

I WP3 har också en sammanfattning lämnats in till World Geothermal Congress, A. Lazzarotto, W. Mazzotti Pallard, M. Abuasbeh, J. Acuna. 2021, “Performance evaluation of borehole thermal energy storage through energy and exergy analysis”.

I WP2.3 kommer också en publikation av S.N. Gunasekara, T. Edén och V. Martin skickas in för granskning till sommaren. Artikelns arbetsnamn är “Grid dynamics of integrating distributed cold storage – A Swedish Case Study”. I arbetspaketet kommer ytterligare två konferensbidrag publiceras under året (2021). Sammanfattningar har skickats till Enerstock2021 15th International Energy Storage Conference och DHC2021 17th International Symposium on District Heating and Cooling.

Bilaga 1: Administrativ bilaga