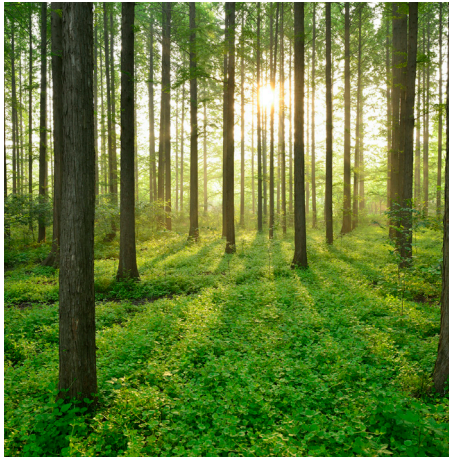
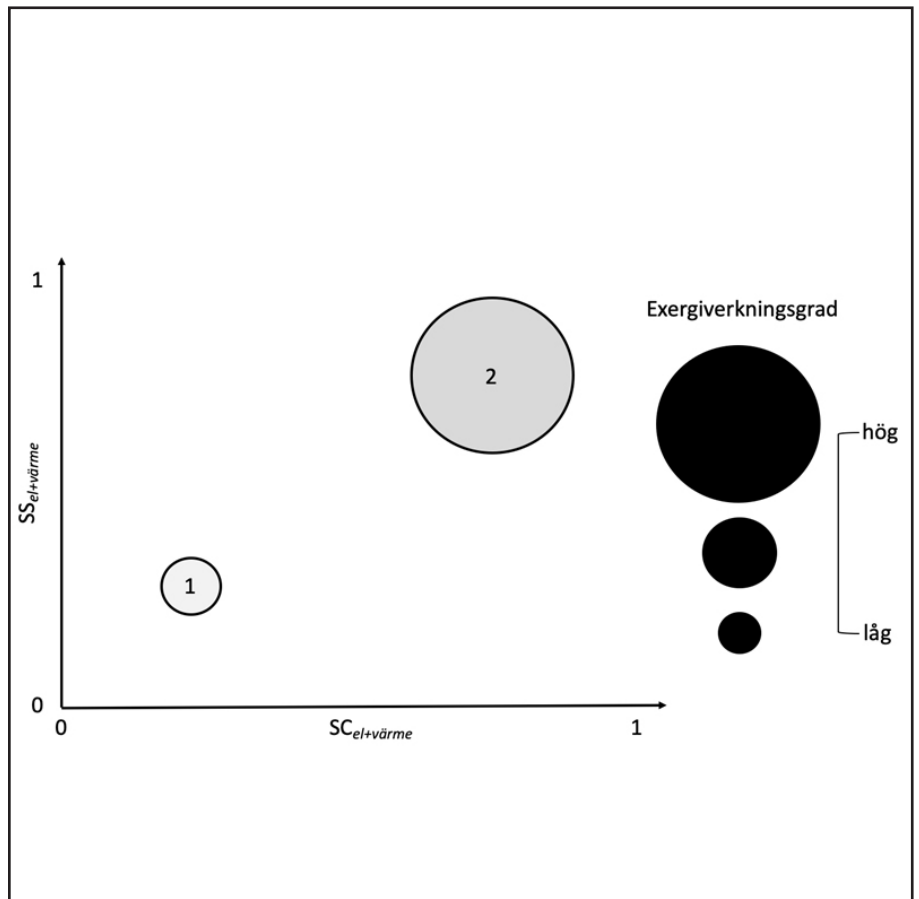


# EXERGIGEMENSKAPER – FÖR ETT RESURSEFFEKTIVT ENERGISYSTEM

RAPPORT 2024:1064



 FUTUREHEAT



# Exergigemenskaper

## För ett resurseffektivt energisystem

MAGNUS ÅBERG

ISBN 978-91-89919-64-8 | © Energiforsk mars 2025

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

## Förord

**Projektet Exergigemenskaper – för ett resurseffektivt energisystem har tagits fram för att öka kunskapen om hur komplexa och lokala energisystemlösningar med multipla komponenter och energiflöden kan analyseras för att fånga värdet energikvalitet (exergi). Projektet har tagit fram en analytisk metod för att mäta matchning mellan tillförsel och användning med hänsyn tagen till exergi, som kan användas för att på ett rättvist och teknikneutralt sätt utvärdera elektriska och termiska hybridenergislösningar för till exempel lokala energigemenskaper.**

Projektet har genomförts av Magnus Åberg från Uppsala universitet. En referensgrupp bestående av Anders Einarsen, Mälarenergi AB; Erik Dotzauer, Stockholm exergi; Niklas Olsson, Tekniska verken i Linköping; Dennis Johansson, Nässjö Affärsverk och Harald Andersson, E.ON Infrastruktur AB har följt och kvalitetssäkrat projektet.

Projektet ingår i programmet Futureheat vars långsiktiga mål är att bidra till visionen om ett hållbart uppvärmningssystem med framgångsrika företag som nyttjar nya tekniska möjligheter och där de samhällsinvesteringar som gjorts i fjärrvärme- och fjärrkyla tas till vara på bästa sätt. Detta projekt ingår i programmets tredje etapp.

Programmets leds av en styrgrupp bestående av Cecilia Bergquist, Halmstad Energi och Miljö (ordförande); Erik Axelsson, Göteborg Energi; Stefan Hjærtstam, Borås Energi och Miljö; Peter Mattsson, Södertörns Fjärrvärme; Svante Carlsson, Skellefteå Kraft; Stina Berg, Tekniska Verken i Linköping; Dado Hadziomerovic, Vattenfall; Fabian Levihn, Stockholm Exergi; Lisa Granström, Mälarenergi; Magnus Ohlsson, Öresundskraft; Magnus Revland, Finspångs Tekniska Verk; Harald Andersson, E.ON Energiinfrastruktur; Linda Östberg, Karlstads Energi; Ulf Lindqvist, Jämtkraft och Patrik Grönbeck, Norrenergi.

Författaren ansvarar för rapportens innehåll.

*Carolina Holmberg, programansvarig Futureheat*

## Sammanfattning

**Inom EU finns politisk vilja till att underlätta bildandet av energigemenskaper. Det innebär bland annat ett ökat fokus på investeringar i lokal solexproduktion som i Sverige är dåligt matchad med elanvändning. Åtgärder för förbättrad matchning kan leda till en elektrifiering av energibehov som till exempel rumsuppvärmning eller beredning av varmvatten. Det innebär i så fall att högvärdig energi i onödan används för att försörja ett lågvärdigt energibehov.**

En utveckling mot fler elbaserade energigemenskaper riskerar medföra att incitament försvinner för såväl energieffektiviseringsåtgärder som effektivt nyttjande av lågvärdiga energiresurser, till exempel spillvärme eller avfallsbaserad fjärrvärme. Detta skulle i sin tur begränsa möjligheterna till ett effektivt utnyttjande av tillgängliga energiresurser i energitillförselssystemet som helhet.

Det saknas idag utvärdering av matchning mellan energitillförsel och användning i lokala energisystemlösningar som även tar hänsyn till energins kvalitet, dvs exerginivån. Energigemenskaper där energins kvalitet beaktas skulle kunna vara en utgångspunkt för samarbeten och minskade intressekonflikter på lokala värmemarknader.

I det här projektet presenteras en analytisk metod som möjliggör utvärdering av hur energikvalitet bevaras eller inte bevaras i en lokal systemlösning. I metoden ingår mått på självförsörjande och självkonsumtion av lokal energitillförsel som inkluderar både värme och el. För att utforma och testa den analytiska metoden används en virtuell testbädd som i det här fallet utgörs av matematiska modeller av 21 byggnader i ett existerande bostadsområde i Uppsala. Elva olika beräkningsfall med olika tekniska systemlösningar har simulerats. Analyserna inkluderar energi- och exergibalanser i byggnader, el- och varmvattenbehov i hushåll, elbilsladdning, solex- och solvärmeproduktion från tillgänglig takyta, energilager för värme och el samt förluster från distribution av värme lokalt.

Resultaten visar att lokal solexproduktion som mest ger en grad av totalt självförsörjande på knappt 40% med värmepumpar, elbilsladdning och batterier. Utan värmepumpar nås som mest 24% självförsörjande med endast solex som energitillförsel. Solex i kombination med elektrifiering av värmebehov för uppvärmning och varmvatten ger även låg exergieeffektivitet. De högsta nivåerna av självkonsumtion och självförsörjning i kombination med relativt hög exergieeffektivitet erhålls med spillvärme från datacenter i kombination med ett termiskt lager.

Sammanfattningsvis visar resultaten från projektet att exergieeffektivitet tillsammans med grader av självförsörjande och självkonsumtion ger underlag för en bredare och mer balanserad analys av tekniska egenskaper i lokala energisystemlösningar. Analysen visar att det är möjligt att urskilja nivå av kvalitetsförluster i en systemlösning och att detta kan bidra med värdefull kunskap för utformning av systemlösningar för befintliga och planerade urbana miljöer.

## Nyckelord

Exergi, självförsörjandegrad, självkonsumtion, resurseffektivitet, lokala energisystemlösningar

## Summary

**Within the EU, there is political will to facilitate the formation of energy communities. This means, among other things, an increased focus on investments in local solar power production, which in Sweden is poorly matched with electricity use. Measures for improved matching can lead to an electrification of energy supply for, for example, space heating and hot water preparation. In that case, this means that high-value energy would be used unnecessarily to supply a low-value energy demand.**

A trend towards more electricity-based energy communities risks causing lost incentives for both energy efficiency measures and efficient use of low-value energy resources, such as waste heat or waste incineration-based district heating. This, in turn, would limit the possibilities for efficient utilization of available energy resources in the energy supply system as a whole.

Today, there is a lack of methods to evaluate matching between energy supply and use in local energy systems that also take into account the quality of the energy, i.e. the exergy. Energy communities where the quality of the energy is taken into account could be a starting point for collaborations and reduced conflicts of interest in local heat markets.

In this project, an analytical tool is presented that enables the evaluation of how energy quality is preserved or not preserved in a local system solution. The tool also includes measures of self-sufficiency and self-consumption of local energy supply that includes both heat and electricity. To design and test the tool, a virtual testbed is used, which in this case consists of mathematical models of 21 buildings in an existing residential area in Uppsala. 11 different cases with different technical system solutions have been studied. The analyzes include energy and exergy balances in buildings, electricity and hot water demands in households, electric vehicle charging, solar electricity generation and solar heat production from available roof areas, energy storage for heat and electricity and losses from distribution of heat locally.

The results show that local solar electricity production mostly provides a degree of total self-sufficiency of just under 40% with heat pumps, electric car charging and batteries. Without heat pumps, a maximum of 24% self-sufficiency is reached with solar cells as local energy supply. Solar cells in combination with electrification of heat demand for heating and hot water also results in low exergy efficiency. The highest levels of self-consumption and self-sufficiency, in combination with relatively high exergy efficiencies, are obtained with waste heat from data centers and a central thermal storage.

In summary, the project shows that exergy efficiency together with degrees of self-sufficiency and self-consumption provide a basis for a broader and more balanced analysis of technical characteristics in local energy system solutions. The analysis shows that it is possible to distinguish the level of quality losses in a system solution, and that this can contribute with valuable knowledge for the design of energy system solutions for both existing and planned urban environments.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Exergi – begreppet och definitionen</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Teoretiskt ramverk</b>	<b>12</b>
3.1	Konventionell självförsörjandegrad och självkonsumtion av el	12
3.2	Självkonsumtion och självförsörjning av värme och el i kombination	13
3.3	Grafisk analys av självförsörjning och exergiförluster	14
3.4	Exergiberäkningar	15
3.4.1	Exergibehov för rumsuppvärmning och beredning av tappvarmvatten	16
3.4.2	Exergitillförsel fjärrvärme	16
<b>4</b>	<b>Metod</b>	<b>18</b>
4.1	Virtuell testbädd – södra Gottsunda i Uppsala	18
4.2	Beräkning av byggnaders behov av uppvärmning	19
4.3	Solelproduktion i bebyggelsen	19
4.4	Värmepumpar	20
4.5	Solvärmeproduktion i bebyggelsen	20
4.6	Tillförsel av spillvärme från datacenter	21
4.7	Simulering av hushållsanvändning av el (inklusive elbilsladdning) och varmvatten	22
4.8	Batterilagring	23
4.9	Termisk lagring	23
4.10	Distributionstemperaturer och värmeförluster från termisk distribution	24
<b>5</b>	<b>Beräkningsfall</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>Resultat</b>	<b>29</b>
6.1	Energi- och exergibehov för uppvärmning	29
6.2	Självförsörjningsgrad, självkonsumtion och exergiverkningsgrad	30
<b>7</b>	<b>Workshop</b>	<b>33</b>
7.1	Syfte	33
7.2	Uppsala klimatprotokoll och fokusgrupp Energi	33
7.3	Inför workshop	34
7.4	Upplägg	34
7.5	Resultat från enkät	35
7.6	Sammanfattning av utfallet av workshopen	39
<b>8</b>	<b>Diskussion och reflektion</b>	<b>40</b>
<b>9</b>	<b>Slutsats och fortsatt arbete</b>	<b>43</b>
<b>10</b>	<b>Referenslista</b>	<b>44</b>
<b>Bilagor</b>		<b>47</b>
	Bilaga A – Data för termiskt distributionssystem	47

Bilaga B – Simuleringsrapporter	48
Bilaga C – infoMaterial utskickat innan workshop	59
Bilaga D – enkät för datainsamling vid workshop	63



# 1 Inledning

Inom EU finns politisk vilja till att underlätta bildandet av energigemenskaper i form av lokala medborgarinitiativ för att bidra till att ställa om samhället mot en mer hållbar energiförsörjning.<sup>1,2,3</sup> I Sverige har energigemenskaper hittills främst handlat om vindkraftskollektiv, ekobyar och av fastighetsägare eller mindre näringsaktörer som tillsammans investerar i solelproduktion.<sup>4</sup> Det vanliga för elproduktion från solceller på en byggnad eller i ett bostadsområde är att en hög lokal självkonsumtion innebär en låg självförsörjandegrad, och vice versa.<sup>5</sup> Det är således vanligt att solelproduktion är dåligt matchad med elanvändning. Detta kan delvis åtgärdas med till exempel lagring i batterier, alternativt kan styrning eller ökning av elanvändning bidra till en förbättrad matchning.<sup>6,7</sup> Det sistnämnda kan dock leda till att el används för att till exempel värma byggnader eller bereda varmvatten, trots att möjligheten finns att värma med fjärrvärme. Det innebär i så fall att högvärdig energi används i onödan för att försörja ett lågvärdigt energibehov.

Det finns en risk att fortsatt ensidigt fokus på el formaliseras i incitamentsstrukturer för främjande av just elbaserade energigemenskaper. Detta skulle riskera att medföra en elektrifiering som tränger undan såväl energieffektiviseringsåtgärder som effektivt nyttjande av lågvärdiga energiresurser, till exempel spillvärme eller avfallsbaserad fjärrvärme. Detta skulle i sin tur begränsa energitillförselnsystemets möjligheter till ökad resurseffektivitet.

Det saknas idag utvärdering av matchning mellan energitillförsel och användning i lokala energisystemlösningar som även tar hänsyn till energins kvalitet, dvs exerginivån, som är ett sätt att fysikaliskt beskriva energins kvalitet. Exergiaspekten behövs för att synliggöra möjligheterna för en effektivisering av samhällets resursutnyttjande. Energigemenskaper där energins kvalitet beaktas

<sup>1</sup> European Commission. Clean energy for all Europeans. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019.

<sup>2</sup> Parliament, European. Directive (EU) 2019/944 on common rules for the internal market for electricity. Off J Eur Union. 2019.

<sup>3</sup> Parliament, European. Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources. Off J Eur Union. 2018.

<sup>4</sup> Energimyndigheten. Energigemenskaper - Förutsättningar och förslag på främjandeinsats. Rapport nr ER 2024:20.

<sup>5</sup> Luthander R, Widén J, Nilsson D, Palm J. Photovoltaic self-consumption in buildings: a review. Appl Energy 2015;142:80–94. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>.

<sup>6</sup> Luthander, R., Nilsson, A. M., Widén, J., Åberg, M. (2019) Graphical analysis of photovoltaic generation and load matching in buildings: A novel way of studying self-consumption and self-sufficiency, Applied Energy. Vol 250 pp. 748–759.

<sup>7</sup> Fachrizal, R., Lindberg, O., Kinasih, Annisa D. S., Muntean, A., Widén, J. & Munkhammar, J. (2022) Residential building with rooftop solar PV system, battery storage and electric vehicle charging: Environmental impact and energy matching assessments for a multi-family house in a Swedish city.

skulle kunna vara en utgångspunkt för samarbeten och minskade intressekonflikter på lokala värmemarknader.

Dock krävs tillgängliga och begripliga analysverktyg som kan användas för att utvärdera värdet av lokala energisystem som inkluderar exergi. Det är i detta kunskapsglapp som det här projektet fyller sitt huvudsakliga syfte. I projektet utformas och tillämpas en metod som möjliggör adekvat utvärdering av hur energikvalitet bevaras eller inte bevaras i en systemlösning, delvis genom att ett mått på exergiverkningsgrad tillämpas som möjliggör analys av integrerade termiska och elektriska system i bostadsområden, stadsdelar eller enskilda byggnader. Syftet med projektet är också att presentera detta analytiska ramverk för tilltänkta målgrupper för att få återkoppling på vilken nytta det uppfattas kunna göra och i vilken utsträckning det uppfattas som tillämpbart i målgruppernas nuvarande praktik.

I denna rapport presenteras beräkningar och resultat för självförsörjandegrad och självkonsumtion av lokalt tillförd värme och el, samt exergiverkningsgrad, för ett fiktivt bostadsområde med elva olika typer av lokala energisystemlösningar. Rapporten är upplagd enligt följande. I avsnitt 2 presenteras en kort bakgrund och definition av begreppet exergi. Avsnitt 3 ger ett teoretiskt ramverk för den analys som presenteras senare i rapporten. Här definieras de olika mått och beräkningar som ligger till grund för analysen. I avsnitt 4 beskrivs det bostadsområde som används i projektet för att utveckla det analytiska ramverket samt kortfattad beskrivning av de beräkningar och externa modeller som använts för att producera syntetiska data för områdets energiflöden. I avsnitt 5 presenteras de elva olika systemlösningarna i form av beräkningsfall. En syntes av resultaten för de beräknade fallen och analys presenteras i avsnitt 6. I avsnitt 7 beskrivs genomförandet och resultaten från en workshop som genomförts i projektet tillsammans med representanter för den tilltänkta målgruppen för projektet. I avsnitt 8 diskuteras projektets resultat och det presenterade analytiska ramverket. Avslutningsvis, i avsnitt 9 sammanfattas projektets slutsatser tillsammans med en reflektion över en möjlig fortsättning av arbetet.

## 2 Exergi – begreppet och definitionen

Vad är egentligen exergi och vad skiljer exergin i en termodynamisk process från energivärdet i samma process? I det här avsnittet förklaras principerna och definitionen av exergi kortfattat. För den intresserade av djupare förståelse för historien och den termodynamiska teori som ligger till grund för exergi som storhet hänvisas till de referenser som anges i texten samt till bilaga C i den här rapporten. I avsnittet beskrivs exergi på ett sådant sätt att relevansen i att tillämpa måttet i syfte att utvärdera lokala energisystemlösningar i bebyggelsen tydligt framgår.

Det är inte ovanligt att exergi, precis som i inledningen till den här rapporten, beskrivs som kvaliteten av energi. Vad som menas med kvalitet i det här sammanhanget är dock inte alldeles uppenbart. Det kan beskrivas som att exergi, eller som det också kallas "energis tillgänglighet" (eng. "availability") handlar om det arbete en viss mängd energi kan utföra och att kvaliteten på energin är just detta, det vill säga förmågan att utföra arbete.<sup>8</sup>

Exergi definieras numera i dessa termer som det potentiella arbete som ett termodynamiskt system  $S$  kan utföra på sin omgivning genom processen att enbart interagera med och reversibelt nå termodynamisk jämvikt med sin omgivning.<sup>9</sup>

Definitionen i sig skvallrar om att systemets omgivning har betydelse. Det innebär att exergi säger något om relationen mellan det termiska systemet och dess omgivning, inte om systemet som sådant. Det är en viktig skillnad i jämförelse med energi. Det i sig innebär också att exergin kan förändras genom att omgivningen förändras även om systemet är oförändrat.

Precis som det finns olika former av energi finns det olika former av exergi där de vanligaste är kinetisk exergi, potentiell exergi, mekanisk exergi, elektrisk exergi, kemisk exergi, strålningsexergi och termisk exergi. Skillnaden mellan energi och exergi är enkelt uttryckt att exergivärdet beskriver tillgängligheten eller "användbarheten" i energin, denna användbarhet är beroende av energin i relation till omgivningen.<sup>10</sup>

Enkelt uttryckt har kinetisk energi, mekanisk energi och elektrisk energi 100% användbarhet. Dessa är så att säga i teoretisk och fysikalisk mening möjliga att omsätta i helt och hållet i användbart arbete. Värme däremot kan inte omsättas helt och hållet i arbete. Värme är på så sätt mindre användbart för att det har en lägre andel tillgänglig energi, vilket innebär en lägre kvalitet. Exergivärdet i värme är därför generellt sett lågt. Ju högre temperatur, desto större användbarhet och därmed högre exergivärde hos värmen.<sup>11</sup>

<sup>8</sup> Wall, G. & Gong, M. On exergy and sustainable development—Part 1: Conditions and concepts. *Exergy, an International Journal. Exergy Int. J.* 1(3) (2001) 128–145

<sup>9</sup> Çengel, Yunus A. (2008). *Thermodynamics : an engineering approach*. Boston :McGraw-Hill Higher Education,

<sup>10</sup> Wall, G. & Gong, M. On exergy and sustainable development—Part 1: Conditions and concepts.

<sup>11</sup> Çengel, Yunus A. (2008). *Thermodynamics : an engineering approach*.

En stor del av den energi som används i bostäder är dock inte arbete. En byggnads energianvändning består till stor del av värme för att kompensera för värmeledning genom byggnadens klimatskal och genom ventilationssystemet. Dessa förluster drivs av en temperaturskillnad som även om den varierar beroende på temperaturen utomhus, är relativt liten. Det krävs således ingen högvärdig energi för att kompensera för dess förluster. Den arbetspotential, det vill säga energikvalitet, som krävs för att hålla en inomhustemperatur på 21 °C även när utomhustemperaturen är – 20 °C är liten. Därför är det av intresse att utgå från energins potentiella arbetsförmåga som mått på hur exergin bevaras eller inte bevaras i en lokal energisystemlösning. Ett behov av energi med litet exergivärde kan med fördel och om möjligt försörjas med energi med litet exergivärde. Det i sin tur möjliggör utnyttjande av lågvärdiga energiresurser.<sup>12</sup>

---

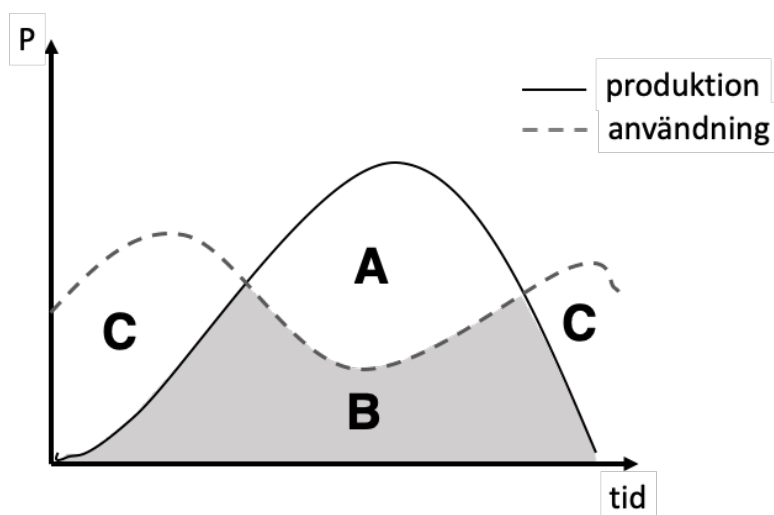
<sup>12</sup> Wall, G. (1992), Exergi, helhetssyn och intelligens – En tillämpning på Västerås.

### 3 Teoretiskt ramverk

I det här avsnittet presenteras initialt de mått på lokal tillförsel av el och värme som används i analysen. Därefter följer en kort och principiell introduktion till den grafiska analys som utgör den form för vilken resultaten i avsnitt 6 presenteras. Avslutningsvis i detta avsnitt beskrivs beräkningar för exergibehov och exergitillförsel för uppvärmning och elförsörjning av bostäder och bostadsområden.

#### 3.1 KONVENTIONELL SJÄLVFÖRSÖRJANDEGRAD OCH SJÄLVKONSUMTION AV EL

Självförsörjandegrad ( $SS$ ) och självkonsumtion ( $SC$ ) är vanliga mått på matchning mellan lokalt producerad el och elanvändning. Båda dessa mått antar ett värde mellan 0 och 1 där 1 betyder 100 % självförsörjning respektive självkonsumtion.<sup>13</sup> Det är särskilt vanligt för utvärdering av solcellssystem på byggnader eller i kluster av byggnader. Grundtanken är att stor direkt matchning av lokal produktion mot lokalt behov (fält B i figur 1) i relation till storleken på överskott (fält A) och underskott (fälten C) är fördelaktigt. Framst innebär detta ett mindre beroende av överliggande nät och extern försörjning av el.



Figur 1. Principiell bild av produktionsprofil för lokal elproduktion och lastprofil för lokal elanvändning. De angivna fälten A, B och C används i ekvationerna 1 och 2 för att definiera självkonsumtion och självförsörjandegrad.

Självförsörjandegrad definieras som

<sup>13</sup> Luthander R, Widén J, Nilsson D, Palm J. Photovoltaic self-consumption in buildings: a review.

$$SS = \frac{B}{B+C} \quad (1)$$

och självkonsumtion definieras som

$$SC = \frac{B}{B+A} \quad (2)$$

Det vanliga när självförsörjandegrad och självkonsumtion används för att utvärdera ett lokalt system med soletproduktion och elanvändning, särskilt om det rör sig om bostäder, är att en hög självkonsumtion medför en låg självförsörjningsgrad och vice versa. Detta beror i huvudsak på hur produktionssystemet är dimensionerat i förhållande till användningen. Ett system som i teorin ska kunna vara kontinuerligt självförsörjande måste ha en produktionsvolym som är lika eller större än den totala årliga lasten. Men för att systemet ska bli oberoende av sin omgivning måste produktionen även matcha lasten i tiden, inte bara i årsvolymen. Ett perfekt matchat system skulle ha  $SS = SC = 1$ , vilket när det gäller soletproduktion och bostäders generella elanvändningsmönster i ett svenskt perspektiv i det närmste bör betraktas som en utopi då säsongsvariabiliteten för soletproduktion på Sveriges breddgrader är stor och skulle kräva ellagringskapaciteter som med dagens kommersiella teknik är svåra att motivera ekonomiskt. Med hjälp av batterilager eller laststyrning kan dock matchningen mer eller mindre förbättras och därmed höja såväl självförsörjning som självkonsumtion. För system som är belägna nära ekvatorn där säsongsvariabiliteten är liten är perfekt matchning mellan soletproduktion och elanvändning ( $SS = SC = 1$ ) inte en omöjlighet med hjälp av batterilager.

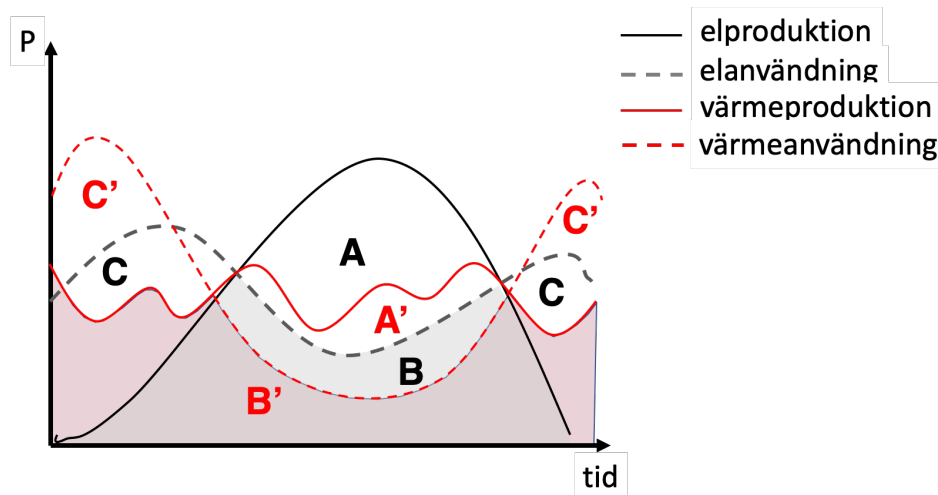
### 3.2 SJÄLVKONSUMTION OCH SJÄLVFÖRSÖRJNING AV VÄRME OCH EL I KOMBINATION

Att beskriva matchningen mellan lokalt producerad och använd el med hjälp av grader av självförsörjande och självkonsumtion är som redan sagts inget ovanligt. Däremot är det ovanligare att samma analys görs på system där lokal energianvändning och energitillförsel inkluderar multipla energibärare. Det har förvisso gjorts även sådana analyser och presenterats varianter av självförsörjande och självkonsumtion, Cao, S. (2014) är ett exempel.<sup>14</sup> Ingen av dessa har dock använts i någon större utsträckning.

För analysen i det här projektet är det av betydelse att det sätt att mäta matchning mellan lokal tillförsel och användning av energi inkluderar samt gör skillnad på värme och el. Detta är viktigt för att i just detta fall jämförs tillförsel och användning av energiflöden med signifikant olika exergivärde. Följande analys skulle även kunna tillämpas på andra energiflöden. I det här sammanhanget och tillämpligt på energianvändning i bostäder är en uppdelning av energi i el och värme adekvat och tillräcklig. Här följer en beskrivning av varianter av självförsörjandegrad och självkonsumtionsgrad där matchning mellan lokal tillförsel och användning av el respektive värme beräknas separat. Därefter

<sup>14</sup> Cao, S. (2014) Matching analysis for on-site building energy systems involving energy conversion, storage and hybrid grid connections. PhD thesis, Aalto University, Finland.

divideras summan av dessa matchningar med summan av det totala el- och värmebehovet. På så sätt erhålls ett mått på den övergripande självkonsumtionen och självförsörjandegraden utan att riskera att värme antas täcka ett behov av el och tvärtom. Figur 2 visar på motsvarande sätt som i figur 1 på ett grafiskt sätt hur matchning mellan de olika behovs- och tillförselflödena definieras.



Figur 2. Principiell beskrivning av matchningen mellan lokala el- och värmebehov samt lokal tillförsel av el och värme. Notera att röda respektive svarta bokstäver och linjer ska betraktas var för sig i bilden. Det innebär till exempel att fältet B' avser hela det överlappande fältet mellan värmeproduktion och värmeanvändning (röda linjer).

Ekvationerna 3 och 4 beskriver definitionen av självförsörjandegrad med avseende på el i kombination med värme ( $SS_{el+värme}$ ) och motsvarande självkonsumtion ( $SC_{el+värme}$ ).

$$SS_{el+värme} = \frac{B+B'}{B+C+B'+C'} \quad (3)$$

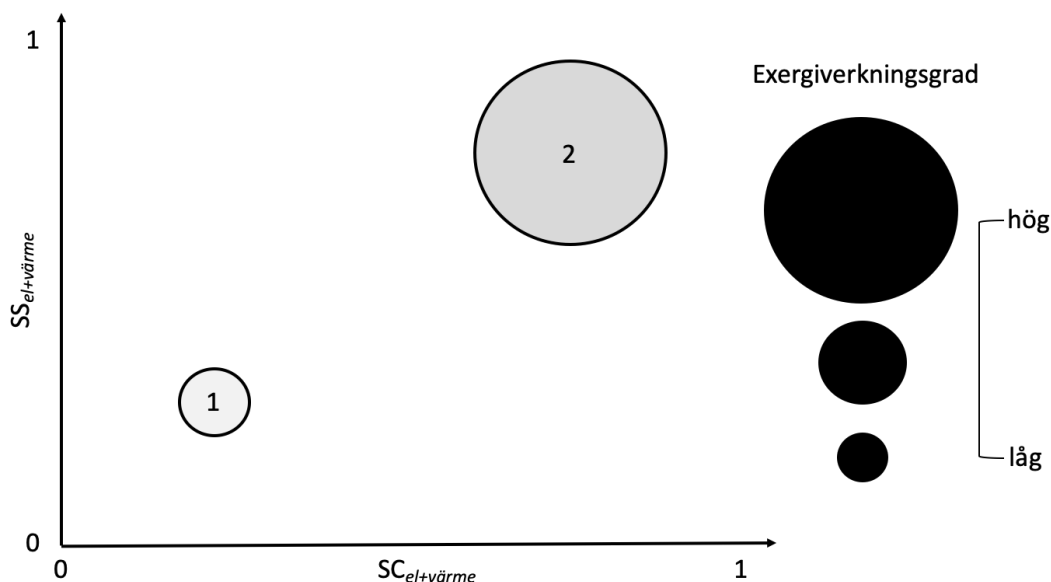
$$SC_{el+värme} = \frac{B+B'}{B+A+B'+A'} \quad (4)$$

### 3.3 GRAFISK ANALYS AV SJÄLVFÖRSÖRJNING OCH EXERGIFÖRLUSTER

En viktig del av detta projekt är att presentera ett sätt att analysera egenskaper hos olika tekniska lokala systemlösningar för energiförsörjning där exergiförluster är inkluderat som en central parameter. Beskrivning av hur dessa exergiförluster beräknas presenteras i nästkommande delavsnitt. En grafisk analys som den som visas i figur 3 där en lokal energisystemlösning självförsörjandegrad, självkonsumtionsgrad och exergiverkningsgrad visas erbjuder en möjlighet att utvärdera och jämföra olika systemlösningar utifrån alla dessa tre parametrar tillsammans, istället för en parameter i taget.

Diagrammet i figur 3 ska tolkas så att ett system med god matchning mellan lokal tillförsel av värme och el, samt små energikvalitetsförluster kommer att resultera i

en stor cirkel i den övre högra halvan av diagrammet (se exempel nr 2 i diagrammet). Ett system med dålig matchning mellan tillförsel och användning av värme samt el i kombination med stora energikvalitetsförluster resulterar i en liten cirkel i det nedre vänstra hörnet i diagrammet (se exempel 1 i diagrammet).



Figur 3. Principiell illustration av diagram med självkonsumtion, självförsörjande och exergiverkningsgrad

Diagrammet i figur 3 är en utvecklad variant av en grafisk analys av matchning mellan lokalproducerad solex och lokal elanvändning för enskilda byggnader som presenteras av Luthander et al 2019.<sup>15</sup>

### 3.4 EXERGIBERÄKNINGAR

Exergivärdet av energi som behövs för att tillgodose uppvärmningsbehov för rumsuppvärmning och tappvarmvatten i byggnader, samt exergivärdet av tillförd energi av fjärrvärme har beräknats med hjälp av ekvationer i rapporten *Exergi, helhetssyn och intelligens – En tillämpning på Västerås*.<sup>16</sup> I följande sektioner presenteras ekvationer som använts för detta ändamål. All tillförsel och användning av el antas ha exergivärde 1.

Exergiverkningsgraden ( $\eta_{exergi}$ ) definieras på samma sätt som konventionell energiverkningsgrad och beräknas enligt

$$\eta_{exergi} = \frac{\text{Exergibehov}}{\text{Tillförd exergi}} \quad (5)$$

<sup>15</sup> Luthander, R., Nilsson, A. M., Widén, J., Åberg, M. (2019) Graphical analysis of photovoltaic generation and load matching in buildings: A novel way of studying self-consumption and self-sufficiency.

<sup>16</sup> Wall, G. (1992), Exergi, helhetssyn och intelligens – En tillämpning på Västerås.

<sup>17</sup> Wall, G. (1992), Exergi, helhetssyn och intelligens – En tillämpning på Västerås.



### 3.4.1 Exergibehov för rumsuppvärmning och beredning av tappvarmvatten

Värmeförluster från byggnaderna beräknas separat för transmissionsförluster genom klimatskal och förluster genom ventilation. Exergivärdet ( $E_{tr}$ ) för transmissionsförluster beräknas för klimatskalets ytterväggar, tak, och fönster enligt följande

$$E_{tr} = \frac{(\sum_i U_i A_i) \cdot (T_{balans} - T_{ute})^2 \cdot t}{T_{balans}}, \quad (6)$$

där  $U_i$  är värmegenomgångstalet [W/m<sup>2</sup> K] för klimatskaldel  $i$ ,  $A_i$  är arean för motsvarande klimatskaldel,  $T_{balans}$  är byggnadens balanstemperatur,  $T_{ute}$  är utomhustemperaturen och  $t$  är tiden. Transmissionsförluster genom platta på mark eller källargolv beräknas på samma sätt men med marktemperaturen  $T_{mark}$  istället för utomhustemperatur. Exergivärdet för energiförluster via ventilation beräknas enligt

$$E_{vent} = \dot{m} c_p (T_{balans} - T_{ute} - T_{balans} \ln \frac{T_{balans}}{T_{ute}}), \quad (7)$$

där  $\dot{m}$  är ventilationsluftflödet och  $c_p$  är värmekapaciteten för luft vid 20 °C. Exergivärdet för tappvarmvatten beräknas enligt

$$E_{vv} = \frac{T_{vv} - T_{kv}}{T_{vv}} Q_{vv}. \quad (8)$$

$T_{vv}$  är temperaturen på varmvattnet och  $T_{kv}$  är temperaturen på inkommande kallvatten.  $Q_{vv}$  är energibehovet för tappvarmvatten genererat från hushållsenergi behovssimuleringarna.

Exergibehovet för uppvärmning av byggnader och beredning av tappvarmvatten har beräknats och används i samtliga av de 11 beräkningsfallen som beskrivs i avsnitt 5. Värmegenomgångstal för byggnadernas komponenter bestämdes genom kalibrering där energianvändningen jämfördes med vad som angivits i energideklarationer för byggnaderna. Balanstemperaturen ( $T_{balans}$ ) har antagits till 17 °C. Tappvarmvattenexergibehovet är beräknat enligt ekvation 8 där  $Q_{vv}$  på timbasis kommer från stokastiska simuleringar av hushållens energianvändning (se delavsnitt 4.7). Temperaturer på varmvatten och inkommande kallvatten har antagits enligt gällande normer och baserat på konventionell statistik till 60 °C respektive 10 °C.

### 3.4.2 Exergitillförsel fjärrvärme

Exergivärdet för tillförd fjärrvärme beror av skillnaden mellan temperaturerna på framledningen ( $T_{fram}$ ) och returreturledningen ( $T_{retur}$ ) till området, samt utomhustemperaturen, och beräknas enligt

$$E_{fjv} = \left(1 - \frac{T_{ute}}{T_{fram} - T_{retur}} \ln \frac{T_{fram}}{T_{retur}}\right) Q_{vb}. \quad (9)$$

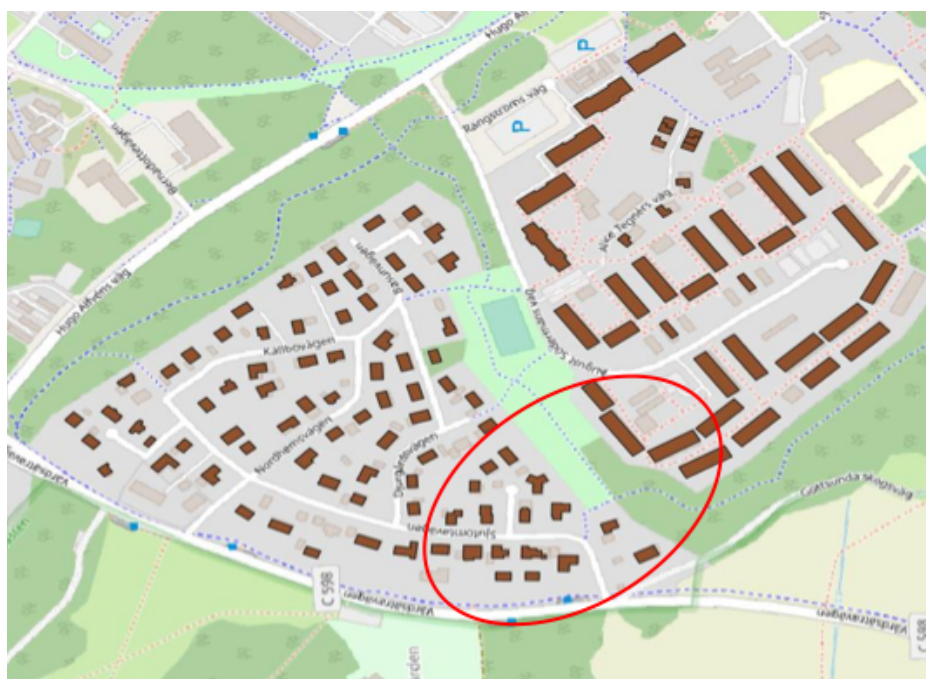
Fjärrvärmens framledningstemperatur varierar över året och olika fjärrvärmesystem har olika sk temperaturprogram. Det finns i regel ett beroende av utomhustemperaturen där låga utomhustemperaturer kräver höga framledningstemperaturer. Dock finns även andra faktorer som också påverkar när framledningstemperaturen regleras, som till exempel temperaturkrav hos specifika användare eller så kallad nätladdning då temperaturen i nätet höjs för att hantera en prognosticerad lasttopp. Framledningstemperaturer i det termiska distributionssystemet beräknas med hjälp av en modell för termisk värmedistribution enligt beskrivning i avsnitt 4.10.

## 4 Metod

För att simulera energibalans i byggnader, el- och värmebehov i hushåll, solexproduktion från takmonterade solcellspaneler, samt effekterna av lokal energidelning med och utan energilager har ett antal modeller, dataset och metoder tillämpats. Dessa beskrivs i följande kapitel.

### 4.1 VIRTUELL TESTBÄDD – SÖDRA GOTTSUNDA I UPPSALA

För att utforma analysen och testa exergieffektiviteten i lokala urbana energisystemlösningar har en virtuell testbädd skapats. Virtuell testbädd i det här fallet innebär en matematisk modell av byggnaderna i en del av ett existerande bostadsområde i södra Gottsunda i Uppsala. Området har modellerats och studerats med hjälp av en UBEM (Urban Building Energy Model).<sup>18</sup> Testbädden inkluderar 17 enfamiljshus och 4 flerbostadshus som tillsammans består av 73 hushåll. Figur 4 visar en karta över området och de byggnader som ingår i testbädden är inringade i rött.



Figur 4. Området i södra Gottsunda i Uppsala med de inkluderade byggnaderna inringade.

För byggnaderna i testbädden har simuleringar gjorts med olika modellverktyg för att ge syntetiska men realistiska energi- och exergiflöden på timbasis för uppvärmningsbehov, tappvarmvattenbehov, fjärrvärmeförsel, varmvattenberedning, hushållselanvändning, solexproduktion från takmonterade

<sup>18</sup> Johari, F., Shadram, F., Widén, J. Urban building energy modeling from geo-referenced energy performance certificate data: Development, calibration, and validation. Sustainable Cities and Society. Volume 96, September 2023, 104664.

solceller, elbehov för hemmaladdning av elbilar, samt in- och urladdning av ett för området gemensamt batteripaket. Dessutom har enklare beräkningar använts för att beskriva elbehovet för uppvärmning med hjälp av värmepumpar och fjärrvärmeförsel vid konventionella och även låga distributionstemperaturer.

## 4.2 BERÄKNING AV BYGGNADERS BEHOV AV UPPVÄRMNING

Behovet av energi för rumsuppvärmning ( $Q_{vb}$ ) beräknades timvis för varje byggnad enligt

$$Q_{vb} = Q_{vägg+tak} + Q_{mark} + Q_{ventilation}, \quad (10)$$

där  $Q_{vägg+tak}$  är transmissionsförluster av värme genom tak och ytterväggar,  $Q_{mark}$  är transmissionsförluster genom platta på mark och  $Q_{ventilation}$  är värmeförluster via ventilationsluften. Transmissionsförlust beräknas med hjälp av värmeförlusttal (U-värde) för väggar, tak, platta-på-mark och fönster, multiplicerat med arean för respektive del av klimatskalet,  $i$ . De absoluta förlusterna beräknas således enligt

$$Q_{trans,i} = U_i A_i (T_{balans} - T_{ute/mark}), \quad (11)$$

där balanstemperatur och utomhustemperatur eller marktemperatur är samma som användes för exergiberäkningarna (se avsnitt 3.4.1). Ventilationsförlust beräknas för varje enskild byggnad utifrån utgående ventilationslufts flöde, luftens värmekapacitet och balanstemperaturen i förhållande till utomhustemperaturen enligt

$$Q_{ventilation} = \dot{m} \rho c_p (T_{balans} - T_{ute/mark}). \quad (12)$$

Ventilationsflödet baseras på kravet i Boverkets byggregler om totalt ventilationsflöde för bostäder på 0.35 l/s,m<sup>2</sup>.<sup>19</sup>

## 4.3 SOLELPRODUKTION I BEBYGGELSEN

Simuleringarna för solelproduktion beskrivs i detalj i Johari et al (2024).<sup>20</sup> Solelproduktionen från byggnadernas tak simulerades utifrån antagandena om att halva takarean kan utnyttjas för elproduktion, 6 m<sup>2</sup> solcellsmoduler motsvara en installerad effekt om 1 kW, lutningen på solcellerna är 30° vilket motsvarar den genomsnittliga taklutningen för området. Azimuth-vinkeln för solcellerna angavs som azimuth-vinkeln för den längsta sidan på respektive byggnad.

<sup>19</sup> Boverkets byggregler (BBR). <https://www.boverket.se/sv/byggande/halsa-och-inomhusmiljo/ventilation/luft-och-ventilation-i-bostader/> (2024-10-15)

<sup>20</sup> F. Johari, O. Lindberg, U.H. Ramadhani, F. Shadram, J. Munkhammar, J. Widén. Analysis of large-scale energy retrofit of residential buildings and their impact on the electricity grid using a validated UBEM. Applied Energy. Volume 361, 1 May 2024, 122937.

#### 4.4 VÄRMEPUMPAR

För att simulera att värmebehovet i testbädden försörjs av individuella värmepumpar har ett genomsnittligt COP antagits till 3,5. Detta motsvarar värmepumpar med betydligt stabilare temperaturkälla än utomhusluft, dvs berg-, jord-, eller sjövärmepumpar. Värmepumparna antas vara dimensionerade för 70% av maxeffektbehovet av värme. Den del av värmebehovet som överstiger denna nivå antas täckas av direktverkande el. Antagandena som ligger till grund för värmepumpsberäkningarna är baserade på rapporten *Bergvärme på djupet: boken för dig som vill veta mer om bergvärmepumpar*.<sup>21</sup>

#### 4.5 SOLVÄRMEPRODUKTION I BEBYGGELSEN

Lokal tillförsel av solvärme beräknades under antagandet av att takytan som antagits tillgänglig för solelproduktion istället används för produktion av solvärme. Verkningsgraden för värmeproduktion från takmonterade värmemoduler ( $\eta_{sv}$ ) beräknades enligt

$$\eta_{sv} = \eta_0 - \frac{a_1(\vartheta_m - \vartheta_L)}{E_e} - \frac{a_2(\vartheta_m - \vartheta_L)^2}{E_e}, \text{ där } \eta_0 = \alpha\tau F'.^{22} \quad (13)$$

$\eta_0$  är en optisk eller en s k "nollförlust"-verkningsgrad med där temperaturskillnaden mellan omgivning och kollektorns genomsnittstemperatur är lika med noll.  $a_1$  och  $a_2$  är linjär respektive kvadratisk värmeöverföringskoefficient.  $\vartheta_m$  är kollektorns genomsnittstemperatur och  $\vartheta_L$  är omgivningens temperatur.  $E_e$  är solinstrålningen i  $W/m^2$ .  $\alpha$  är en absorptionsfaktor för absorbatoren,  $\tau$  är en transmissionsfaktor för absorbatoren och  $F'$  är absorbatorns effektivitetsfaktor. De konstanter som används i simuleringarna är listade i tabell 1 nedan.

Tabell 1. Konstanter använda för simulering av solvärmeproduktion.<sup>23</sup>

parameter	värde	enhet
$a_1$	3.5	$W/m^2K$
$a_2$	0.01	$W/m^2K^2$
$\alpha$	0.93	-
$\tau$	0.9	-
$F'$	0.95	-

Produktionstemperatur antas vara samma som distributionstemperaturer i framledningen i det termiska distributionsnätet. Dessa simuleras i studien (se avsnitt 4.10). Omgivningstemperatur och solinstrålning antas vara samma som som använts i solelsimuleringarna (se avsnitt 4.4).

<sup>21</sup> Björk, E., Acuña, J., Granryd, E., Mogensen, P., Nowacki, J.-E., Palm, B., Weber, K., 2013. Bergvärme På Djupet: Boken För Dig Som Vill Veta Mer Om Bergvärmepumpar.

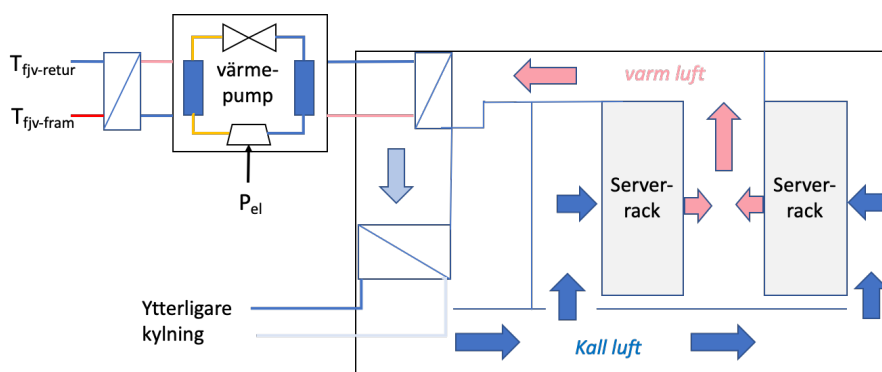
<sup>22</sup> Peuser, Dr. F A., Remmers, K-H., Schnauss, M. (2002) Solar Thermal Systems – Successful Planning and Construction, Solar praxis, Berlin, Germany.

<sup>23</sup> Peuser, Dr. F A., Remmers, K-H., Schnauss, M. (2002) Solar Thermal Systems – Successful Planning and Construction.

#### 4.6 TILLFÖRSEL AV SPILLVÄRME FRÅN DATACENTER

Lokal tillförsel av spillvärme från ett datacenter har beräknats för ett fall med luftkylning av ett datacenter med totalt 5000 servrar. Detta ger ett maximalt värmetillskott till värmenätet ca 350 kW samt en maximal elanvändning i värmepumpen på 116 kW. Värmeåtervinningen från kylningen av datacentret antas vara via en CRAH(Computer Room Air Handling)-enhet, dvs konventionellt system där servrar kyls med luftflöde.<sup>24</sup> Värmeåtervinningen beskrivs schematiskt i figur 5.

Beräkningar för spillvärmeförsel till värmesystemet och elanvändning i värmepump baseras delvis på motsvarande beräkningar i existerande litteratur.<sup>25,26,27</sup> För värmepumpen har ett konstant COP-värde på 3.0 antagits i enlighet med de simulerade COP-värden för samma typ av värmeåtervinningssystem som avses i den här studien.<sup>28</sup>



Figur 5. Schematisk beskrivning av värmeåtervinning från kylsystemet i ett datacenter.

Arbetsprofilen för datacentret är en timprofil för en typisk vecka.<sup>29</sup> Profilen visas i figur 6.

<sup>24</sup> Ham, S-W., Kim, M-H., Choi, B-N., Jeong, J-W. (2015) Simplified server model to simulate data center cooling energy consumption. Energy and Buildings 86 (2015) 328-339.

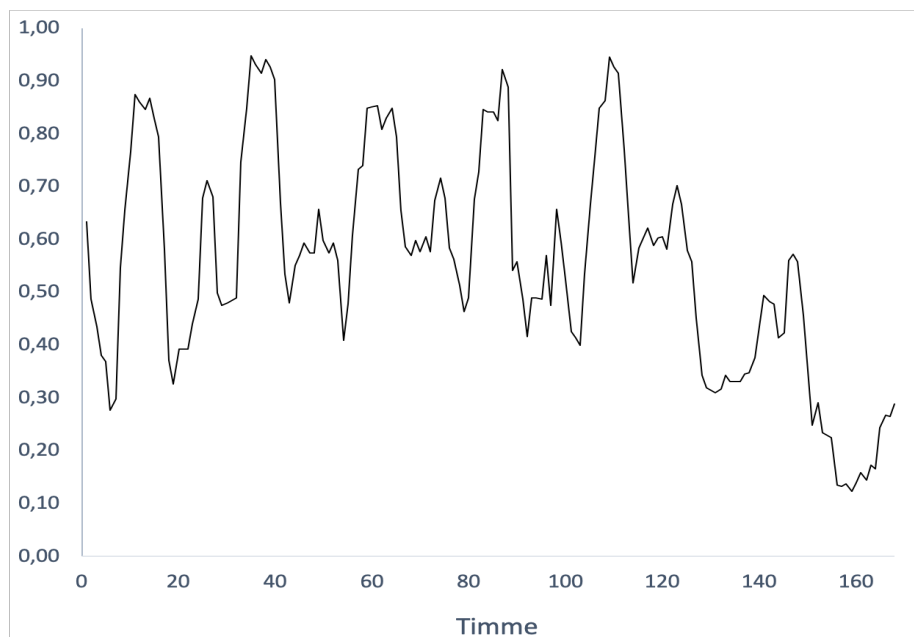
<sup>25</sup> Ericsson-Sintong, J. (2023) Data Centres as Prosumers: A Techno- Economic Analysis. Master of Science in Energy Technologies (ENTECH). Thesis, Uppsala universitet.

<sup>26</sup> Oró, E., Taddeo, P., Salom, J. (2019) Waste heat recovery from urban air cooled data centres to increase energy efficiency of district heating networks, Sustainable Cities and Society 45 (2019) 522-542.

<sup>27</sup> Ham, S-W., Kim, M-H., Choi, B-N., Jeong, J-W. (2015) Simplified server model to simulate data center cooling energy consumption.

<sup>28</sup> Oró, E., Taddeo, P., Salom, J. (2019) Waste heat recovery from urban air cooled data centres to increase energy efficiency of district heating networks.

<sup>29</sup> Liu, Z. (2011) Greening Geographical Load Balancing. California Institute of Technology. Pasadena, California.



Figur 6. Timvis arbetsprofil för datacenter under en vecka.

#### 4.7 SIMULERING AV HUSHÅLLSANVÄNDNING AV EL (INKLUSIVE ELBILSLADDNING) OCH VARMVATTEN

Elbehov för hushållsel och elbilsaddning är beroende av människors aktiviteter. Människors olika preferenser och arbetstider, samt antalet personer i ett hushåll har stor påverkan på användningen av hushållsel och varmvatten i en byggnad. Detta gäller även behovet av att ladda en eventuell elbil. För att simulera elanvändning i hushåll och för hemmaladdning av elbilar har därför en stokastisk simuleringsmodell använts. Modellen bygger på en markovkedja där varje tillstånd representerar en hushållsaktivitet (sova, duscha, städa, diska, titta på TV, åka till jobbet, etc.). Med hjälp av tidsdagböcker insamlade av SCB från drygt 400 hushåll för en veckodag och en helgdag har sannolikheter skattats för att en person "rör sig" mellan olika tillstånd vid olika tidpunkter på dygnet.<sup>30 31</sup> I en utvecklad version av samma modell inkluderas även hemmaladdning av elbilar<sup>32</sup>.

För att bestämma hushållens storlek i termer av antal personer har simuleringarna kalibrerats för att representera de genomsnittliga hushållsstorlekar för olika typer av bostäder i Sverige som tagits fram av SVEBY.<sup>33</sup>

<sup>30</sup> Widén, J., et al. (2009), A combined Markov-chain and bottom-up approach to modelling of domestic lighting demand, *Energy and Buildings* 41: 1001-1012.

<sup>31</sup> Widén, J. & Wäckelgård, E. (2010), A high-resolution stochastic model of domestic activity pattern and electricity demand, *Applied Energy* 87: 1880-1892.

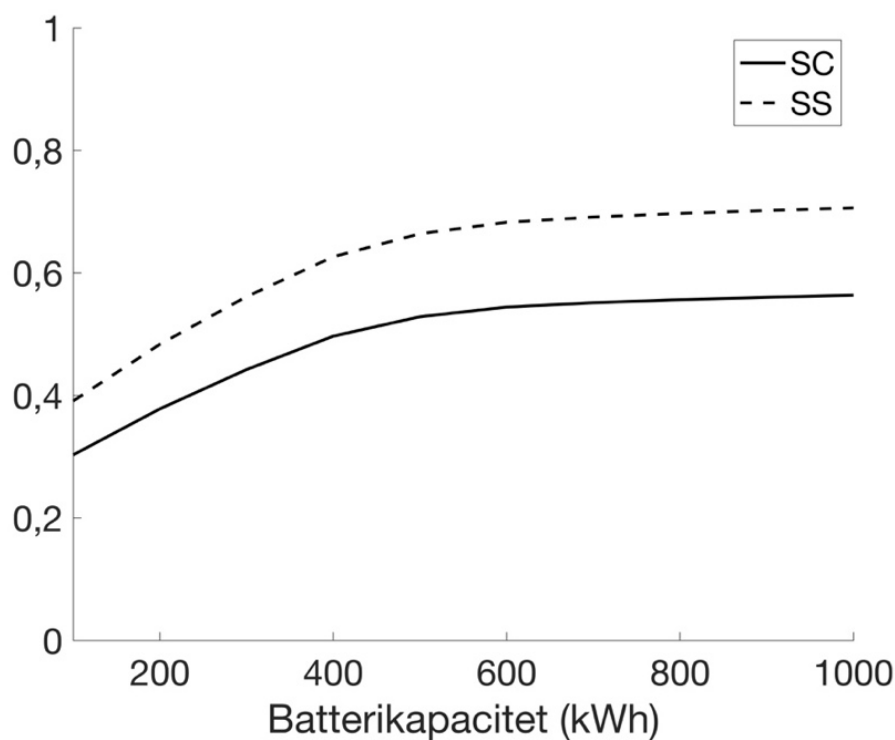
<sup>32</sup> Grahn P, Munkhammar J., Widén J., Alvehag K., Söder L., PHEV Home-Charging Model Based on Residential Activity Patterns, *IEEE Transactions on Power Systems* 28: 2507-2515, 2013.

<sup>33</sup> SVEBY (2012), Brukarindata bostäder – Version 1.0 1012-10-10. Svebyprogrammet. Stockholm.

#### 4.8 BATTERILAGRING

Ett batteri som delas av fler byggnader simuleras med hjälp av en batterialgoritm.<sup>34</sup> Algoritmen följer den relativt okomplicerade principen att inladdning sker om den lokala produktionen överstiger det lokala behovet samt att det finns ledig kapacitet i batteriet. Urladdning sker på motsvarande sätt om den lokala produktionen understiger det lokala behovet samt att det finns el lagrat i batteriet. In- och urladdningsförluster antas vara 10% av den aktuella in- och urladdningseffekten. Dessa kapaciteter antas i sin tur motsvara 80% av batteriets lagringskapacitet.

Batteriets kapacitet bestäms av en iterativ simulering för vilka systemets självförsörjandegrad och självkonsumtion beräknas. När ökningen av dessa mellan två simuleringar närmar sig noll antas en större batterikapacitet vara onödig. Ett exempel på detta viss i figur 7 där batterikapaciteten bestämdes till 500 kWh.



Figur 7. Självförsörjandegrad och självkonsumtion för olika batterikapaciteter för hela området försett med solceller och gemensamt batterilager.

#### 4.9 TERMISK LAGRING

För att illustrera lagring av värme i ett för området centralt termiskt lager så har en principiell och förenklad modell använts. Utformningen av modellen liknar det

<sup>34</sup> Fachrizal, R., Lindberg, O., Kinasih, Annisa D. S., Muntean, A., Widén, J. & Munkhammar, J. (2022) Residential building with rooftop solar PV system, battery storage and electric vehicle charging: Environmental impact and energy matching assessments for a multi-family house in a Swedish city.



som använts i Åberg et al. (2019)<sup>35</sup> om än förenklat. Lagret som modellerats är cylindriskt till formen och med en stratifiering som ger ett övre varmare skikt och ett undre kallare skikt. Lagret antas vara en tank med 0.5 meter tjock isolering med lambdavärde 0.03 W/mK. Temperaturerna i lagret har antagits vara 70 °C i det övre skiktet och 40 °C i det undre skiktet. Temperaturnivåerna är anpassade för att vara i nivå med de distributionstemperaturer som beräknats för det lokala distributionsnätet, samt är samma temperaturer som antagits för beräkning av solvärmeproduktion och spillvärmeutnyttjande från datacenter.

Storleken på lagret varierar mellan olika beräkningsfall. Detta för att lagerkapaciteten dimensionerats för så stor andel självkonsumerad värme som möjligt. Lagerstorleken blir således en del av resultatet från beräkningarna och redovisas tillsammans med fallbeskrivningarna i nästa kapitel.

Lagerförluster har beräknats som en konstant förlust per timme (kWh/h) baserat på temperaturdifferensen mellan genomsnittlig omgivningstemperatur på 5 °C och den genomsnittliga temperaturen i lagrets vattenvolym vid halvfullt lager, det vill säga 55 °C. Detta är en förenkling då lagrets förluster i realiteten påverkas av såväl variationer i omgivningstemperatur som av energiinnehåll i lagret. Förlusternas variabilitet är dock inte av sådan signifikans att en konstant och genomsnittlig förlustfaktor påverkar slutresultatet i det här projektet på ett avgörande sätt. Lagerförlusters eventuella påverkan på tillgänglig temperatur och därmed exergiinnehållet i den lagrade värmen bedöms vara begränsade och har här bortsetts ifrån.

Lagringstrategin är kriteriestyrd och bygger på att i den mån det finns ledig kapacitet i lagret så laddas momentant överskott av solvärme eller spillvärme in i lagret. När den lokala tillförseln av värme understiger behovet laddas lagret ur och täcker om möjligt skillnaden mellan behov och tillförsel. Inga begränsningar har satts på in- och urladdningskapacitet.

#### 4.10 DISTRIBUTIONSTEMPERATURER OCH VÄRMEFÖRLUSTER FRÅN TERMISK DISTRIBUTION

Temperaturnivåer och förluster i det lokala termiska distributionsnätet har beräknats med hjälp av en grafteoretisk modell för att i matrisform beskriva ett distributionsnät i trädstruktur med förgreningar och anslutningspunkter som noder. Modellen är implementerad i Python.<sup>36 37</sup>

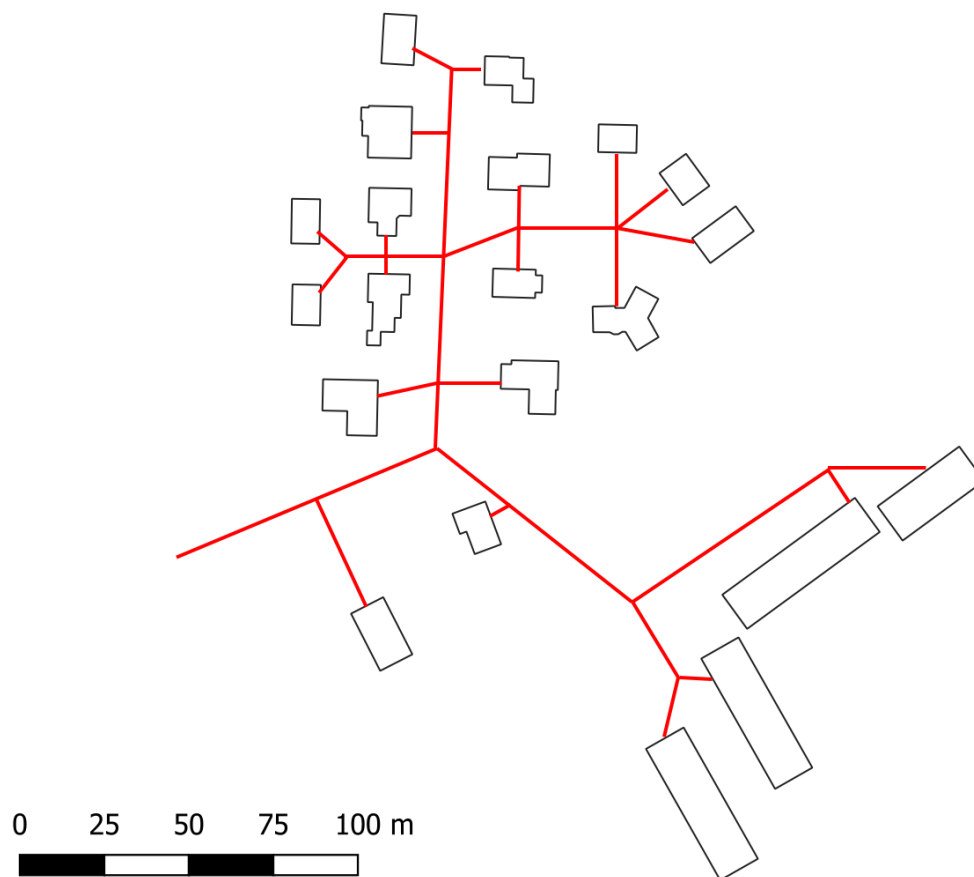
För distributionsberäkningarna i det här projektet har ett fiktivt termiskt distributionsnät utformats där alla rörledningar antas utgöras av två ledningar, fram- och returledning. Nätets struktur visas i figur 8. Totalt består systemet av 35

<sup>35</sup> Åberg, M., Lingfors, D., Olauson, J., Widén, J. (2019) Can electricity market prices control power-to-heat production for peak shaving of renewable power generation? The case of Sweden, Energy. Vol 176, pp. 1-14.

<sup>36</sup> Press, A. (2022) Utformning av modell för simulering av distributionsnät för fjärrvärme. Examensarbete 30 hp, Civilingenjörsprogrammet i energisystem, Uppsala universitet.

<sup>37</sup> Olsson, O. (2023) Distributionssystem för lågtempererad fjärrvärme i framtida bostadsområden – Fallstudie för stadsomvandlingsprojektet Näringen i Gävle. Examensarbete 30 hp, Civilingenjörsprogrammet i energisystem, Uppsala universitet.

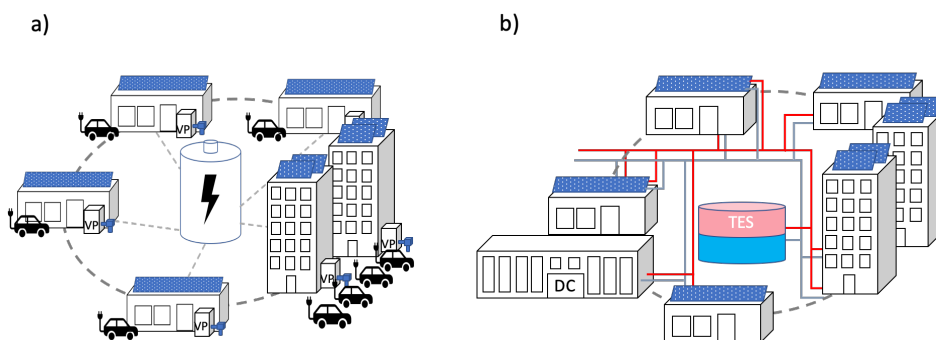
rörsträckor om sammanlagt 731 meter som försörjer de 21 byggnaderna.  
Rördimensioner och rörlängder presenteras i tabell A1 i Bilaga A.



Figur 8. Utformning av termiskt distributionsnät för värmeförsörjning. Röda linjer representerar rörledningar och de vita boxarna är byggnaderna.

## 5 Beräkningsfall

Energibalanser för värme och el beräknas för 11 hypotetiska men realistiska Energigemenskapstyper. Dessa är utformade för att illustrera de principiella energikvalitetsförluster som blir effekten av olika typer av teknisk systemutformning med avseende på matchning av lokal el- och värmeförsörjning mot lokalt el- och värmebehov. Exergiverkningsgraden som senare presenteras i resultatdelen för dessa energigemenskapstyper visar hur systemutformningen kan bidra till ökad resurseffektivitet via lokala energilösningar. Figur 9 visar exempel på schematiska illustrationer av de olika tekniska lösningar som skiljer de olika fallen åt. Bilden visar två olika systemutformningar med solceller/solvärme, elbilsaddning, fjärrvärme, värmepumpar, centralt batterilager och centralt termiskt lager. De 11 beräkningsfallen är sammansättningar av två eller fler av dessa olika tekniker. Nedan följer kortfattade beskrivningar av respektive beräkningsfall och en översikt över de tekniska komponenter som definierar respektive fall ges i tabell 2.



Figur 9. Två principiella illustrationer av de tekniker som i olika kombinationer ingår i de 11 olika beräkningsfallen: a) – elbilsaddning, batteri, solex och värmepumpar, b) – termiskt lager, solvärme, spillvärme, termisk distribution och solex.

Tabell 2. Översikt över teknikkombinationer för olika beräkningsfall. I alla fall förutom 2 och 5 försörjs värmebehovet helt eller delvis via extern fjärrvärme.

	Beräkningsfall										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
fjärrvärme	x		x	x		x	x	x	x	x	x
solex	x	x	x	x	x					x	x
värmepump		x			x						
elbilsaddning			x	x	x						
batterilager				x	x					x	x
solvärme						x		x		x	
spillvärme DC							x		x		x
värmelager								x	x	x	x

Fall 1: Solex och fjärrvärme

Beräkningsfall 1 är vad som skulle kunna liknas vid ett referensfall. Behovet av värme för uppvärmning och tappvarmvatten i de inkluderade byggnaderna är i detta fall försörjda med fjärrvärme från stadens fjärrvärmesystem. Ingen lokal tillförsel av värme ingår i detta fall. Solelproduktionen för fallet har simulerats för alla 21 byggnader enligt beskrivningen i sektion 4.3.

*Fall 2: Värmepumpar i kombination med solel*

Ett sätt att öka självkonsumtion av egenproducerad solel är att på olika sätt öka elanvändningen. Ett sätt att göra det i byggnader är att göra uppvärmning och tappvarmvattenberedning elbaserad. Beräkningsfall 2 syftar till att påvisa hur självförsörjandegrad, självkonsumtion och exergiverkningsgrad i området påverkas av att fjärrvärme ersätts med värmepumpar.

*Fall 3: Solel, fjärrvärme och elbilsladdning*

Elektrifiering av personbilsflottan är en utveckling som pågått ett par decennier. Laddning av elbilar i anslutning till bostäder ökar i omfattning och påverkar därmed bostadsområdets lokala elanvändning. På samma sätt som i värmepumpsfallet ökar det elanvändningen och kan därmed bidra till en ökad självkonsumtion av egenproducerad solel. Skillnaden är att det påverkar den sammanlagda volymen av de lokala energiflödena till skillnad från värmepumparna i fall 2. I beräkningarna antas att varje enfamiljshus har en elbil och varje hushåll i flerbostadshuset har varsin elbil som laddas i huvudsak när människor befinner sig hemma. Det finns ingen algoritm för s k "smart" laddning utan principen är att när de boende kommer hem från jobb kopplas elbilen in och laddas till dess att batteriet är fullt.

*Fall 4: Solel, fjärrvärme, elbilsladdning och batterilager*

I detta beräkningsfall har ett batterilager inkluderats i det lokala energisystemet tillsammans med solel och elbilsladdning. Batterier bidrar med lagringskapacitet som i huvudsak gör att överskott på lokal solel i viss utsträckning kan sparas till timmar med underskott. Därav förväntas självkonsumtion och självförsörjandegrad av lokalt producerad solel vara signifikant högre för dessa fall i jämförelse med exempelvis fall 1. Batterikapaciteten för fallet bestämdes till 700 kWh enligt tillvägagångssättet som är beskrivet i avsnitt 4.8.

*Fall 5: Solel, värmepumpar, elbilsladdning och batterilager*

I beräkningsfall 5 kombineras laddning av elbilar och batterilager med värmepumpar istället för fjärrvärme. Här väntas självkonsumtionen av lokalt producerad solel att öka som både genom elanvändning i värmepump, elbil och genom att batterilagret ger en möjlighet att bättre matcha produktion mot användning. Batteriets kapacitet dimensionerades till 1200 kWh.

*Fall 6: Fjärrvärme och solvärme*

I detta fall är det fokus på lokal värmeförsel istället för el och all tillgänglig takyta antas användas för produktion av solvärme istället för solel. Det innebär att matchning mellan lokal energitillförsel och lokal energianvändning enbart utgörs

av solvärme som täcker en del av behoven för uppvärmning och tappvarmvatten. Solvärmeproduktionen har beräknats enligt beskrivning i avsnitt 4.5.

*Fall 7: Fjärrvärme och Spillvärme från datacenter*

Beräkningsfall 7 liknar fall 6 med den skillnaden att den lokala värmeförseln antas vara uppgraderad spillvärme från ett datacenter med 5000 servrar istället för solvärmepaneler. Spillvärmen kommer med en elanvändning i värmepumpar för att höja temperaturnivån. Den extra elanvändningen påverkar systemets självförsörjandegrad och exergiverkningsgrad negativt.

*Fall 8: Fjärrvärme, solvärme och värmelager*

I detta beräkningsfall kompletteras beräkningsfall 6 med ett centralt termiskt lager. Detta förväntas öka den lokala matchningen mellan solvärmeproduktion och behov av värme för uppvärmning och tappvarmvatten. Lagrets volym har i enlighet med dimensionering av batterier bestämts genom att analysera relationen mellan lagerstorlek och självförsörjandegrad samt självkonsumtionsgrad. Vilket innebär att lagrets storlek avgörs av tillförselmönstret av den lokala värmeförsörjningen. Lagervolymen i det här beräkningsfallet bestämdes till 21 206 m<sup>3</sup> och värmeförlusterna är beräknade till att vara i genomsnitt 3,1809 kWh/h.

*Fall 9: Fjärrvärme, spillvärme och värmelager*

Beräkningsfall 9 motsvarar fall 8 men med spillvärme från datacenter istället för solvärme.

Det termiska lagrets volym bestämdes här till 6 283 m<sup>3</sup> och förlusterna beräknas i genomsnitt vara ca 1,4137 kWh/h året runt. Den mindre lagerstorleken har främst att göra med att variabiliteten i spillvärmeförsörjning är på dygns- och veckobas. Solvärme som har en tydlig säsongsvariation kräver större lagervolymer för att kunna hantera en tidsmässigt högre produktionskoncentration under sommaren.

*Fall 10: Solel, fjärrvärme, solvärme, batterilager och värmelager*

Det sista två beräkningsfallen (10 och 11) är kombinationer av lokal tillförsel av el och värme. I fall 10 delas den tillgängliga takytan så att hälften används för produktion av solel och den andra hälften för solvärme. Den mindre mängde solvärme gör att ett mindre termiskt lager med en volym på 6 283 m<sup>3</sup> passar systemet bäst och med genomsnittliga lagerförluster som beräknats till 1,4137 kWh/h. Systemet har även ett batterilager med en kapacitet om 600 kWh.

*Fall 11: Solel, fjärrvärme, spillvärme, batterilager och värmelager*

Det sista beräkningsfallet liknar fall 10 men med spillvärme från datacenter istället för solvärme. Det innebär att solelproduktion kommer från hela den tillgängliga takytan. Den termiska lagerstorleken och förlusterna från lagret blir samma som för fall 9 och batterilagrets kapacitet är 800 kWh.

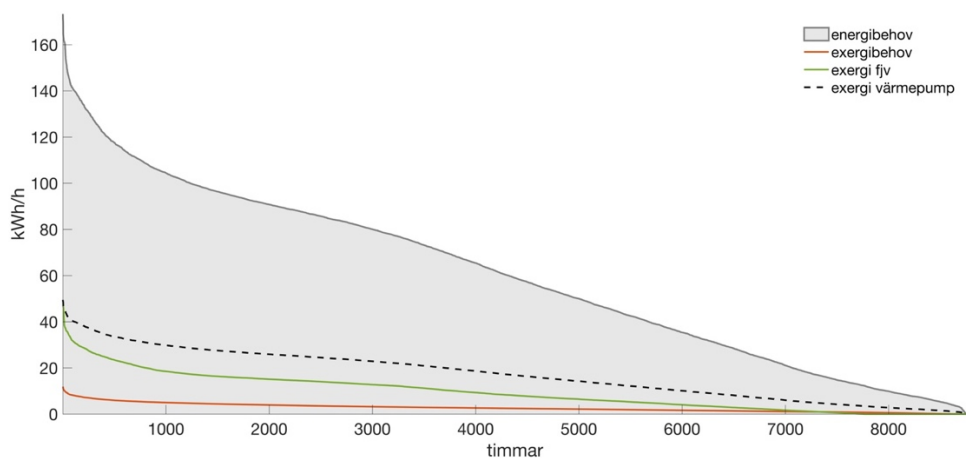
## 6 Resultat

I följande avsnitt presenteras resultat från beräkningarna av självförsörjning och självkonsumtion av lokalproducerad solex, samt exergiverkningsgraderna för de olika fallen. Inledningsvis i 6.1 presenteras skillnaden mellan värmebehov och exergibehov samt exerginivåer för olika värmeförsörjningssystem. Dessa resultat visar tydligt skillnaden mellan om uppvärmningsbehov beskrivs i termer av energi eller exergi, dvs med eller utan hänsyn tagen till energikvalitet. I avsnitt 6.2 visas resultat som beskriver och möjliggör jämförelser i matchning och energikvalitetsförluster för de olika beräkningsfallen. Resultaten som presenteras i detta avsnitt är de som i huvudsak är tänkta att ligga till grund för ett analytiskt ramverk för utvärdering av lokala energisystem där energikvalitet utgör en av grundpelarna.

Mer detaljerade resultat och nyckeltal för respektive beräkningsfall finns i form av simuleringsrapporter i bilaga 1.

### 6.1 ENERGI- OCH EXERGIBEHOV FÖR UPPVÄRMNING

Figur 10 visar i form av ett varaktighetsdiagram värme- och exergiflöden per timme för uppvärmning och beredning av tappvarmvatten. Det grå fältet i figur 10 är det samlade timvisa behovet av värme för rumsuppvärmning och tappvarmvattenberedning i de inkluderade byggnaderna. De timvisa värmebehoven är sorterade i storleksordning där timmen med den högsta värmebehovsnivån återfinns längst till vänster i diagrammet och timmen med det lägsta värmebehovet längst till höger. Den röda linjen visar motsvarande exergibehov för samma användning beräknat enligt ekvationerna 6 - 8. Skillnaden mellan dessa är stor och beror på att de energiförluster en byggnad har genom klimatskal och via ventilationsluften har låg energikvalitet då temperaturdifferenserna mellan inomhus och utomhus är relativt små.



Figur10. Varaktighetsdiagram för energi- och exergibehov för uppvärmning och beredning av tappvarmvatten. Figuren visar även exergivärdet för tillförsel av värme med fjärrvärme och med värmepump

Den svarta streckade linjen och den heldragna gröna linjen i figur 10 beskriver exergivärdet för den energin som tillförs för att försörja behovet av uppvärmning med värmepump respektive konventionell fjärrvärme. Det är tydligt att exergivärdet för att försörja värmebehovet med eldrivna kompressorvärmepumpar är högre än med konventionell fjärrvärme. Skillnaden mellan dessa linjer (svartstreckad och grön) och den röda linjen beskriver kvalitetsförlusten i respektive värmeförsörjningssystem. Notera att om värmebehovet hade försörjts med direktverkande el eller en elpanna så hade exergivärdet på tillförseln i princip varit detsamma som energibehovet, dvs det gråa fältet, och därmed inneburit en betydande kvalitetsförlust.

## 6.2 SJÄLVFÖRSÖRJNINGSGRAD, SJÄLVKONSUMTION OCH EXERGIVERKNINGSGRAD

Resultaten som visar självförsörjandegrad, självkonsumtion och exergiverkningsgrad för de 11 beräkningsfallen presenteras i tabell 3 och i figur 11. Resultaten i tabellen är samma som i figuren. I tabellen presenteras självförsörjandegrad, självkonsumtion och exergiverkningsgrad separat i olika kolumner. I figuren visas istället ett bubbeldiagram där självförsörjandegrad och självkonsumtion representeras på y- respektive x-axeln. Exergiverkningsgraden i diagrammet representeras av bubblornas storlek. En stor bubbla betyder hög exergieffektivitet, dvs små kvalitetsförluster, medan en liten indikerar det motsatta.

Figur 11 och tabell 3 visar att endast lokal solelproduktion från tillgänglig takyta inte klarar att ge en högre grad av totalt självförsörjande på mer än knappt 40% och det är med fallet med värmepumpar, elbilsladdning och batterier. Man kan anta att  $SC_{\text{värmee+el}}$  varit kanske något högre utan elbilarna i detta fall då dessa bidrar till ett större elbehov relativt jämnt fördelat över året. Även om skillnaden troligtvis inte varit avgörande. Utan värmepumparna når området endast självförsörjandenivåer på som mest 24% om endast soleden utgör den lokala energitillförseln. Det är också tydligt att batterier är nödvändigt för att nå höga nivåer av självkonsumtion för de fall som enbart har soled som lokal energitillförsel. De soledbaserade fallen (fall 1 till 5) ger exergieffektiviteter mellan knappt 38% till som mest drygt 42%. De lägsta exergieffektiviteterna återfinns dock i fallen med Spillvärme (fall 7, 9 och 11) av den anledningen att det krävs värmepumpar för att höja temperaturen på spillvärmen till vad som krävs i byggnadernas värmesystem. Det är en viktig insikt att spillvärme vid låga temperaturer inte nödvändigtvis ger låga kvalitetsförluster. Om spillvärmen varit tillräckligt hög temperatur för att direkt kunna användas i byggnaderna hade exergieffektiviteten varit betydligt högre. Detta förklarar även de tydligt mindre cirkelarna i diagrammet för dessa fall i figur 11.

I beräkningsfall 6 med solvärme utan termiskt lager och ingen lokal elproduktion så är såväl självförsörjning som självkonsumtion låga. Detta beror på solvärmeproduktionens starka negativa korrelation med värmebehovet. Mycket värme spills bort i detta fall. Betydligt högre grader av självkonsumtion och

självförsörjning nås med lokal spillvärmertilgång från datacenter som har en jämnare produktionsprofil över året. Det är också fallen med spillvärme i kombination med termiskt lager (fallen 9 och 11) som ger de högsta kombinerade nivåerna av självkonsumtion och självförsörjning. De fall som ger högst självkonsumtion i kombination med acceptabel självförsörjning och hög exergieffektivitet är fall 8 där solvärme i kombination med ett termiskt lager bidrar till värmeförsörjningen. Framförallt beror det på att solvärmen bidrar med lågkvalitativ men direkt användbar värme (dvs att ingen värmepump behövs) för att försörja byggnadernas värmebehov.

På det sätt som självkonsumtion och självförsörjande beräknas här så är värmedelen betydande, vilket förklaras av dess relativa storlek i jämförelse med behovet av el i byggnader. Det innebär att det är viktigare att ha en hög självförsörjning av värmebehovet än elbehovet, oavsett om det är via solvärme, spillvärme eller el genom värmepumpar.

Tabell 3. Självförsörjandegrad, självkonsumtion och exergiverkningsgrader för de olika beräkningsfallen. (PV = solexel, VP = värmepump, fjv = fjärrvärme, EV = elbilsladdning, Batt. = batterilager, TES = termiskt lager)

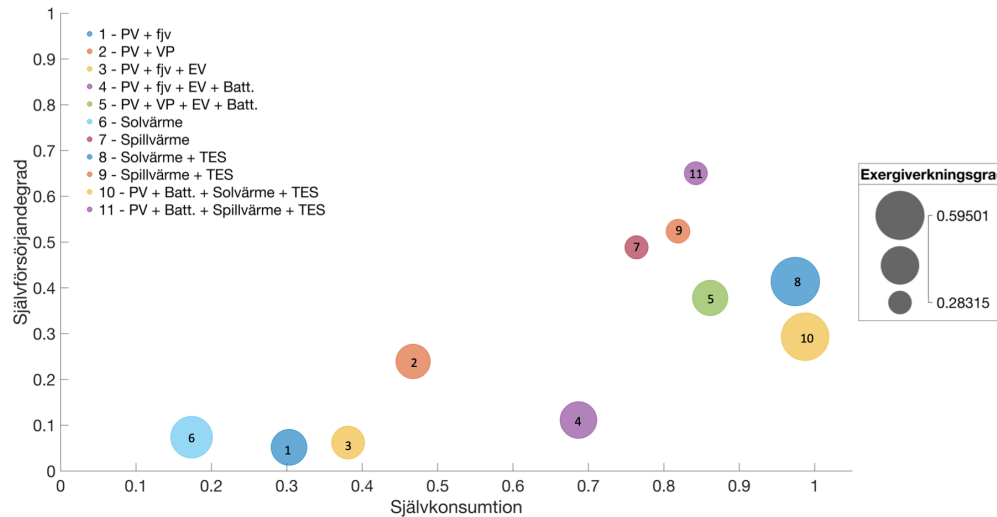
Simuleringsfall	SC <sub>värme+el</sub>	SS <sub>värme+el</sub>	$\eta_{exergi}^*$	$\eta_{exergi}$
1. PV + fjv	0,303	0,052	0,412	0,581
2. PV + VP	0,467	0,240	0,395	0,502
3. PV + fjv + EV	0,381	0,062	0,378	0,495
4. PV + fjv + EV + Batt.	0,687	0,111	0,422	0,488
5. PV + VP + EV + Batt.	0,861	0,378	0,406	0,431
6. Solvärme	0,174	0,074	0,490	0,581
7. Spillvärme	0,764	0,489	0,284	0,300
8. Solvärme + TES	0,974	0,414	0,595	0,581
9. Spillvärme + TES	0,819	0,524	0,289	0,300
10. PV + Batt. + Solvärme + TES	0,987	0,293	0,586	0,576
11. PV + Batt. + Spillvärme + TES	0,842	0,650	0,283	0,298

\*Med hänsyn tagen till exergiförlust via curtailing/bortkylning

Det är värt att notera den signifikanta "förflyttning" som sker i diagrammet i figur 11 mellan fall 6 och fall 8. I båda fallen är det solvärme som tillförs lokalt men i fall 8 har även ett centralt termiskt lager adderats till systemet vilket ger en signifikant förbättring av prestandan för parametrarna i analysen. En annan intressant iakttagelse är att fall 10 ger en lägre självförsörjandegrad jämfört med exempelvis fall 8. Detta beror på att halva takytan som är tillgänglig för solenergi används för solexproduktion och därmed blir mindre solvärme tillfört till systemet för försörjning av värmebehovet.



En mindre men inte mindre tydlig är skillnaden mellan fall 3 och 4 som likt skillnaden mellan 6 och 8 beror av att fall 4 innefattar ett batterilager vilket fall 3 inte gör. Diagrammet och analysen visar tydligt vilken effekt lagringsfunktionen har på systemets prestanda.



Figur 11. Självförsörjning och självkonsumtion av lokal tillförsel av värme och el, samt exergiverkningsgrad för de 11 beräkningsfallen.

## 7 Workshop

I projektet genomfördes en workshop för att utvärdera hur föreslagen exergianalys för lokala energisystem uppfattas av den målgrupp som är tilltänkta användare av analysmetoden. Denna målgrupp utgörs huvudsakligen av stadsplanerare, utformare av infrastruktur och utvecklingsledare inom såväl privata som offentliga bolag vars verksamhet på olika sätt berör eller berörs av hur energisystem utformas i urban bebyggelse. I följande avsnitt beskrivs genomförandet av projektets workshop följt av en redogörelse för utfallet av den.

Workshopen genomfördes på Ångströmlaboratoriet, Uppsala universitet i Uppsala den 13:e maj 2024 klockan 10.00 till 12.00. Totalt deltog 27 personer vid workshopen.

### 7.1 SYFTE

Syftet med workshopen i forskningsprojektet "Exergigemenskaper - att analysera energikvalitetsförluster i lokala energisystemlösningar" är att undersöka hur relevanta målgrupper för projektet uppfattar den potentiella nyttan av användning av exergivärdet vid analyser av lokala energisystemutformningar. Mer specifikt utvärderades deltagarnas förkunskaper om exergibegreppet, hur de uppfattade workshopen som sådan, om deltagarna uppfattar att exergi som mått är användbart i den presenterade kontexten, samt på vilket sätt de anser att exergianalys skulle kunna göra nytta i arbetet med att utforma lokala energisystem.

### 7.2 UPPSALA KLIMATPROTOKOLL OCH FOKUSGRUPP ENERGI

Workshopen genomfördes i samarbete med Uppsala klimatprotokolls Energifokusgrupp. Uppsala klimatprotokoll är ett Samverkansprojektsamverkansnätverk i Uppsala med omnejd som i dagsläget samlar 45 medlemsorganisationer. Klimatprotokollet har funnits sedan 2010 och arbetar enligt egen utsago genom dialog, gemensamma mål och samarbetsprojekt för att minska utsläpp från Uppsalaregionen.<sup>38</sup>

Klimatprotokollet har tre fokusområden och varav energiomställning är ett och de övriga två är transport och byggnation/anläggning. Klimatprotokollets fokusgrupp för energiomställning beskrivs på klimatprotokollets hemsida på följande sätt:

*"Fokusgrupp Energi arbetar för att reducera växthusgasutsläpp genom att minska energianvändningen, driva på omställningen till förnybara energislag samt minska medlemmarnas effektbehov."<sup>39</sup>*

I fokusgrupp Energi medverkar följande organisationer: Akademiska hus, Besqab, Cytiva, Energikontoret Mälardalen, Fresenius Kabi, Galderma, Klimataktion,

<sup>38</sup> Uppsala klimatprotokoll. <https://klimatprotokollet.uppsala.se> (2024-06-07)

<sup>39</sup> Uppsala klimatprotokoll. <https://klimatprotokollet.uppsala.se> (2024-06-07)

Länsstyrelsen, Region Uppsala, Semcon, Serneke, Skolfastigheter, STUNS, Sweco, Uppsala Arenor och Fastigheter, Uppsala kommun, Uppsala Parkering, Uppsala universitet, Uppsala Vatten & Avfall, Uppsalahem, Vattenfall Värme.

Vid workshopen var 15 av dessa organisationer representerade. Deltagarna vid workshopen företrädde olika roller inom sina respektive organisationer. Ett större antal hade någon form av energi- eller klimatrelaterad rollbeskrivning (exempelvis energistrateg, hållbarhetsstrateg, miljöspecialist, energikartläggare och energisamordnare) men även andra roller som till exempel projektledare, processingenjör och utvecklingsledare var representerade.

### 7.3 INFÖR WORKSHOP

En vecka innan workshopen fick deltagarna ta del av ett kortare inläsningsmaterial (se bilaga 1) som sammanfattat introducerade till begreppen exergi, självförsörjandegrad och självkonsumtion.

### 7.4 UPPLÄGG

Workshopen inleddes med en kort introduktion där upplägget presenterades följt av en kort redogörelse för forskningsprojektet och de forskningsmål som workshopen bidrar till att nå. Därefter gavs en kortfattad och översiktlig introduktion till exergibegreppet och exergiverkningsgrad, samt begreppen självförsörjandegrad och självkonsumtion för att utvärdera matchning av lokalt tillförd energi och lokal energianvändning. Fokus i denna introduktion var på vad exergi mäter och skillnaden mellan energi och exergi, samt vad exergiverkningsgraden för ett system visar och inte visar.

I den andra delen av workshopen inleddes med en genomgång av den virtuella testbädden som använts för en proof-of-concept studie i det här projektet samt bubbeldiagrammet (Se avsnitt 3.3) där självförsörjandegrad, självkonsumtion och energiverkningsgrad presenterades presenteras. Därefter följde diskussioner kring ett antal fall med olika energisystemutformningar. Fallen diskuterades ett i taget och kombinerades med diskussioner i mindre grupper. Diskussionerna syftade till att gruppen skulle komma överens om var i diagrammet respektive fall förväntades hamna (dvs förväntad grad av självförsörjande och självkonsumtion) och storleken på cirkeln (dvs exergiverkningsgraden). Totalt diskuterades 5 olika fall. Dessa fem fall var en del av projektets preliminära resultat och är inte en del av de resultat som presenteras i avsnitt 6.

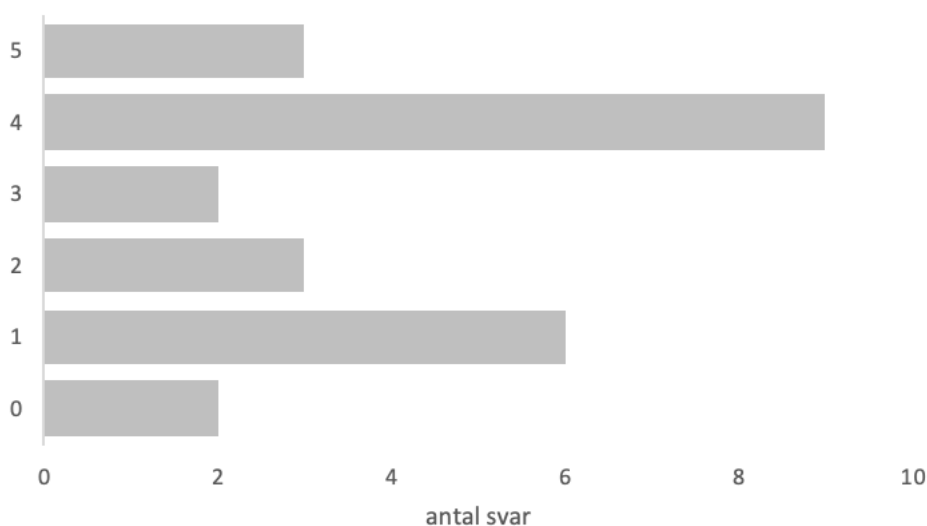
Workshopen avslutades med att alla som ville fick fylla i en enkät (se bilaga 2) med sammanlagt 5 frågor som rörde förkunskaper, upplevelsen av workshopen och hur deltagarna uppfattar att exergi skulle kunna vara användbart som parameter vid utformning av lokala energisystem. Samtliga frågor var i formen av ett påstående där respondenterna fick ange i vilken grad på en sexgradig skala (0 till 5) som de ställde sig bakom påståendet. För varje fråga fanns även möjlighet att utveckla sitt svar i fri text.

## 7.5 RESULTAT FRÅN ENKÄT

Totalt fylldes enkäten i av 25 deltagare, av vilka 4 fyllde i anonymt. Resultaten presenteras separat för varje enkätfråga med ett diagram och med en kort redogörelse för vad som angivits i fritextsvaren. Avslutningsvis ges en kort övergripande reflektion om utfallet av workshopen och betydelsen av resultaten.

*Fråga 1: Hur väl kände du till begreppet Exergi innan workshopen? (Skala från 0 till 5 där 0 innebär "inte alls" och 5 innebär "kände väl till")*

Resultatet för fråga 1 (se figur 12) visar att deltagarna är relativt uppdelade. En grupp anser sig ha haft god kännedom om begreppet exergi innan workshopen (9 respondenter angav en 4:a på den femgradiga skalan och totalt 14 angav en 3:a eller högre). Av resterande respondenter angav 6 en 1:a och totalt 11 angav en 2:a eller lägre. Vilket innebär att det är en relativt stor andel av deltagarna som anser sig ha liten kännedom om exergibegreppet innan workshopen. I genomsnitt gav svaren en kännedom om 2.76.

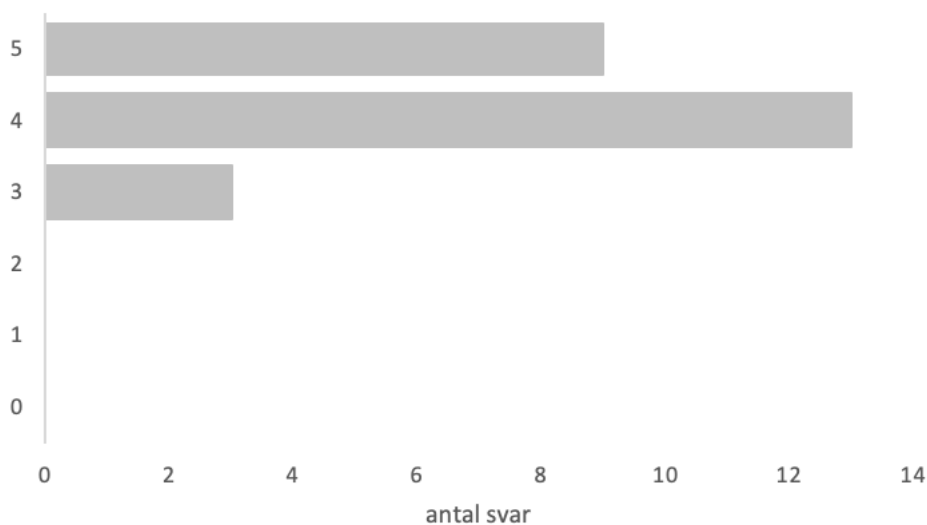


Figur 12. Enkät svar för fråga 1 om hur väl respondenten kände till begreppet exergi innan workshopen.

Fritextsvaren för fråga 1 ger en mer nyanserad bild. 3 respondenter känner till begreppet från studier samt har använt eller använder det i sin yrkesroll. 8 respondenter känner till begreppet från studier men har inte tillämpat eller stött på begreppet i yrkeslivet. Några har stött på det i yrkeslivet och en större andel har inte stött på begreppet alls. Notera att alla respondenter inte givit fritextsvar.

*Fråga 2: Upplever du att workshopen gav en djupare förståelse för vad exergi är? (Skala från 0 till 5 där 0 innebär "inte alls" och 5 innebär "i stor utsträckning")*

Resultaten för fråga 2 visar att deltagarna i huvudsak uppfattade att workshopen gav dem en djupare förståelse för begreppet (se figur 13). I genomsnitt svarade deltagarna 4.24 på den sexgradiga skalan där en 5:a innebar att man i stor utsträckning upplevde att workshopen fördjupade förståelsen för exergibegreppet. Ingen respondent svarade med en siffra lägre än 3 och 13 stycken angav en 4:a.

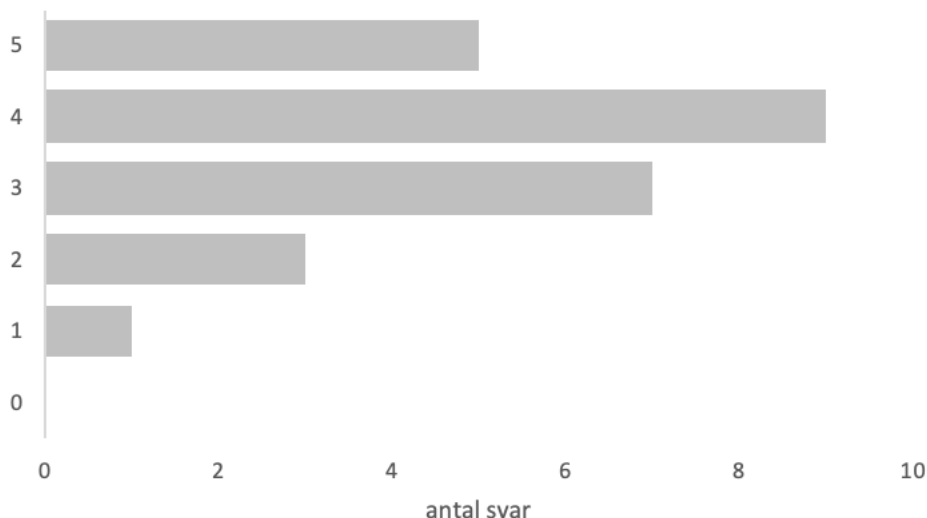


Figur 13. Enkät svar för fråga 2 om respondenten upplevde att workshopen gav en djupare förståelse för exergi än vad dom hade innan.

Fritextsvaren för fråga 2 bekräftar bilden att deltagarna upplevde en ökad förståelse för exergibegreppet till följd av workshopdeltagandet. Flera deltagare uppgav att det var nyttigt att få "friska upp minnet" när det gällde exergi. Ett antal uppgav att upplägget med exempel och diskussioner var särskilt givande. Någon hade uppskattat om förutsättningarna för det olika fallen hade varit tydligare. Ytterligare någon upplevde att det var en kort men givande summering som gav upphov till en ambition att lära sig mer.

Fråga 3: Anser du att exergi skulle kunna vara användbart i din yrkesroll? (Skala från 0 till 5 där 0 innebär "inte alls" och 5 innebär "i stor utsträckning")

I genomsnitt svarade deltagarna 3.56 på frågan om exergi skulle kunna vara ett användbart begrepp i deras yrkesroll. Figur 14 visar att 21 av 25 deltagare besvarade fråga 3 med en 3:a eller högre och 14 deltagare svarade med en 4:a eller en 5:a. Detta bör kunna tolkas som att den generella uppfattningen hos deltagarna vid workshopen var att exergi skulle kunna vara användbart för dem i deras yrkesroll. För vissa av dem är det självklart eftersom att det redan enligt fritextsvaren på fråga 1 använder exergibegreppet i sitt arbete. Men det är en stor andel som idag inte använder begreppet och som uppfattar det som användbart efter att ha deltagit på workshopen.



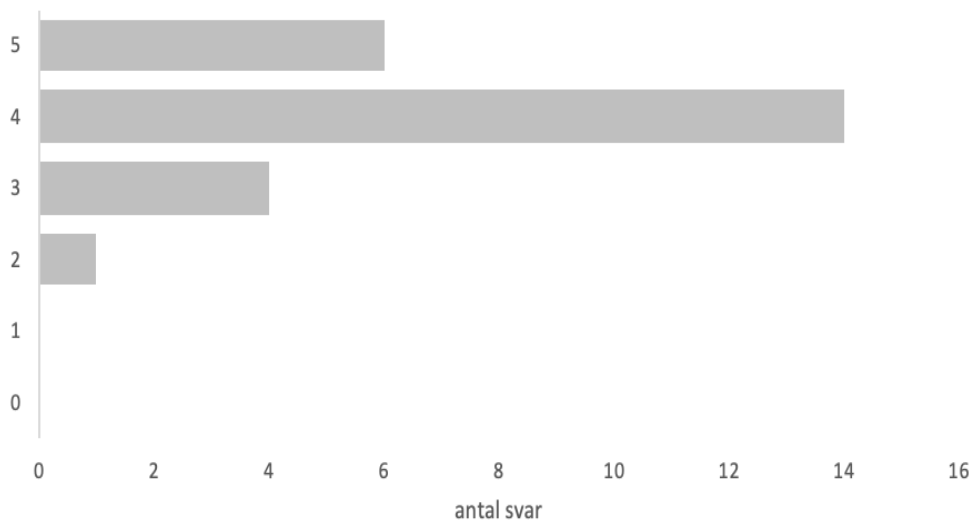
Figur 14. Enkät svar för fråga 3 om huruvida exergi anses vara användbart i respondentens yrkesroll.

Fritextsvaren för fråga 3 visar att många deltagare lyfter att exergi skulle kunna vara ett komplement till dagens mått i analyser och måldefinitioner, men att det behöver kombineras med ekonomi och/eller koldioxidberäkningar. Det nämns också att det kan fördjupa analyser och diskussioner om systemnytta samt underlätta i kommunikation till allmänheten. Det nämns också av någon deltagare att tillämpningen av exergibegreppet kan vara begränsad då det kräver en grundförståelse som vanligtvis inte finns hos deltagarna i olika projekt.

*Fråga 4: Uppfattar du att exergi är användbart för utvärdering av lokala energisystem? (Skala från 0 till 5 där 0 innebär "inte alls" och 5 innebär "i stor utsträckning")*

I genomsnitt svarade deltagarna 4.0 på fråga 4 i enkäten. Figur 15 visar tydligt att den generella uppfattningen är att exergibegreppet är användbart för utvärdering av lokala energisystem. 20 av 25 deltagare svarade med en 4:a eller en 5:a på just den frågan.

Ingen deltagare anser att exergi inte alls är användbart för utvärderingar av lokala energisystemutformningar. Detta är ett viktigt resultat från den här workshopen som indikerar att kvalitetsförluster är viktiga och att det vore önskvärt att mäta dessa och inkludera kvalitetsaspekten i systemutformningsarbete.

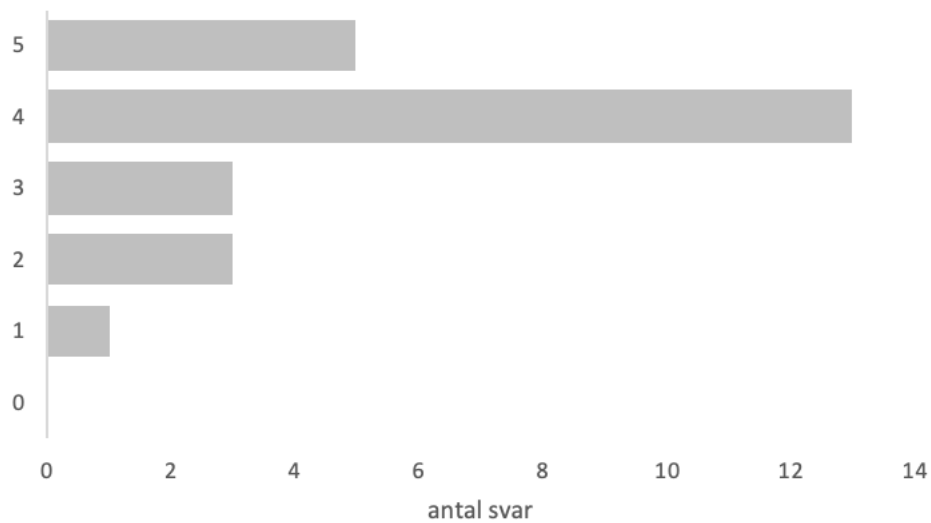


Figur 15. Enkät svar för fråga 4 om huruvida exergi anses vara användbart för utvärdering av lokala energisystem.

I fritextsvaren till fråga 4 lyfts precis som för fråga 3 vikten av att kombinera exergianalys med andra mått, främst ekonomi. Men kvalitetsaspekten anses av workshopdeltagarna vara viktig och önskvärd att inkludera i större utsträckning. Kommunikerbarheten av exergi som begrepp lyfts som en utmaning, samt behovet av grundförståelse hos inblandade aktörer.

*Fråga 5: Anser du att exergi skulle kunna underlätta i kommunikation med allmänheten? (Skala från 0 till 5 där 0 innebär "inte alls" och 5 innebär "i stor utsträckning")*

På frågan om exergi skulle underlätta i kommunikation med allmänheten (se figur 16) svarade workshopdeltagarna i genomsnitt 3.72. Något lägre alltså än uppfattningen om hur användbart begreppet skulle vara för systemutvärdering. 18 deltagare svarar dock med en 4:A eller en 5:a och anser därmed att begreppet skulle kunna underlätta i kommunikation med allmänheten.



Figur 16. Enkät svar för fråga 5 om huruvida exergi anses vara användbart för kommunikation med allmänheten.

## 7.6 SAMMANFATTNING AV UTFALLET AV WORKSHOPEN

Sammanfattningsvis har workshopen upplevts som givande och lärorik av de 25 deltagare som valde att fylla i enkäten. Begreppet exergi var inte helt obekant för en del av deltagarna men desto ovanligare är det att exergi används i yrkesutövningen. Det var dock en andel svarande för vilka begrepp var helt obekant sedan tidigare. Överlag uppfattades exergibegreppet och det presenterade analytiska tillvägagångssättet som potentiellt användbart under förutsättning att det kompletterades med aspekter som ekonomi och koldioxidutsläpp. I viss utsträckning lyftes begreppets uppfattade komplexitet som en potentiell utmaning när det gäller att kommunicera såväl mellan planerare som till allmänheten.



## 8 Diskussion och reflektion

I denna rapport har resultat presenterats som understryker betydelsen av att inkludera energikvalitetsaspekten vid utvärdering av lokala energisystem. Det finns klara fördelar med att göra det möjligt att påvisa i vilken utsträckning en systemlösning bidrar till kvalitetsförluster, inte minst för planering av energisystem och optimering av resursanvändning.

En grundläggande aspekt som kan behöva poängteras är betydelsen av systemgränsen för det system som analyseras. Exergiverkningsgraderna som presenterats i den här rapporten beskriver enbart kvalitetsförlusterna i det lokala systemet. Den säger inget om eventuella ineffektiviteter i överliggande system eller om nyttjandet av primärenergiresurser. Det innebär att analysen som presenterats här inte gör någon skillnad på fjärrvärme som producerats i en ineffektiv anläggning och fjärrvärme som samproducerats med kraftvärme eller är en restprodukt från en industriell process. Det är enbart fjärrvärmens distributionstemperaturer som påverkar det lokala systemets exergiverkningsgrad.

Systemgränsen rör också frågan om vad som är en lämplig storlek på en energigemenskap. Resultaten i den här studien visar att tillförsel av lokal solvärme eller spillvärme i kombination med ett termiskt lager ger de högsta nivåerna av självförsörjande, självkonsumtion och exergieeffektivitet. För att den typen av system ska vara realistiska krävs en viss storlek på behovet av värme och därmed antalet byggnader som ingår i gemenskapen, särskilt om det är bostadshus som avses. Detta innebär att för små energigemenskaper med endast ett fåtal hus så är de tekniska utformningar som faller bäst ut här inte nödvändigtvis realistiska.

Särskilt tydlig blir systemgränsens betydelse avseende volymerna på de termiska lagren, ca 6 000 m<sup>3</sup> för fallen 9 - 11 och 21 000 m<sup>3</sup> för fall 8, som presenteras i kapitel 5. En cylindrisk tank med en volym på 6 000 m<sup>3</sup> har en diameter på närmare 28 meter om höjden är 10 meter. En cylinder med en volym på 21 000 m<sup>3</sup> och höjden 20 meter förutsätter en diameter på drygt 36 meter. Den typen av lagringvolym är svårt att motivera för ett bostadsområde med 17 enfamiljshus och 4 lägenhetshus, såväl utrymmesmässigt som ekonomiskt. För att ge en fingervisning om storleken på investeringskostnaden så finns det siffror redovisade i den akademiska litteraturen. Dessa siffror är relativt gamla och bör tolkas med viss försiktighet. Det finns dock inte till författarens kännedom någon senare publikation som presenterar siffror som signifikant skiljer från de som presenteras här. Investeringskostnaden för ett sensibelt termiskt lager på 6 000 m<sup>3</sup> år 2011 var enligt Pavlov et al (2011) mellan 75 och 185 EUR/m<sup>3</sup>. Motsvarande för ett 21 000 m<sup>3</sup> enligt samma källa var 2011 mellan 40 och 130 EUR/m<sup>3</sup>.<sup>40</sup> Det skulle motsvara en kostnad om 5 - 12 MSEK för det mindre lagret och 9 - 30 MSEK för det större lagret. En tolkning av detta är systemlösningar som utformas för ett mindre antal byggnader, dvs med en relativt snäv systemgräns, riskerar att missa möjligheterna till höga exergieeffektiviteter. Lågeexergiresurser som till exempel spillvärme från

<sup>40</sup> Pavlov, G. K., & Olesen, B. W. (2011). Seasonal Ground Solar Thermal Energy Storage - Review of Systems and Applications. In Proceedings (pp. P-1.2-07)

datacenter tillsammans med effektiva värmelagerlösningar förutsätter en större skala på energisystemet.

Det finns således en poäng med att studera och diskutera vad som är en lämplig storlek på en energigemenskap. Detta är i skrivande stund enligt författarens egen erfarenhet ingen framträdande fråga i energigemenskapssammanhang.

Diagrammet i figur 11 bör tolkas så att ett lokalt välmatchat system med hög exergiverkningsgrad blir en stor cirkel högst upp i det högra hörnet. Den positionen i diagrammet indikerar att det analyserade systemet nått hög autonomi i form av självförsörjning utan stort beroende av överliggande distributionsnät för el och utan signifikanta lokala förluster i energikvalitet. Därmed inte sagt att detta alltid är eftersträvansvärt. Premisserna för huruvida dessa systemlösningar är önskvärda eller inte beror på den energisystemkontext som systemet befinner sig i. I det fall som el- och/eller värmeproduktionen i de överliggande systemen är exempelvis fossilfria, förnybara, eller restenergiflöden så kan en ensidig strävan efter det lokala systemets autonomi ifrågasättas. Detta innebär dock inte att analysen är oviktig eller onödig. Snarare tvärtom. Den ger viktig information om lokala kvalitetsförluster och kan på så sätt användas för att undvika suboptimerade energiförsörjningssystem på regional eller nationell nivå.

Eventuellt kan användningen av termen resurseffektivitet något felaktigt leda tankarna till att detta skulle handla om att minska användningen av primära energiresurser. Exergikonceptet kan förstås användas för detta ändamål också, men det förutsätter att systemgränserna då inkluderar hela systemet inklusive de primära resurserna.

När det gäller självförsörjningsgrad som prestandamått är det rimligt att också diskutera i vilken grad ett autonomt system bidrar till och erhåller en hög resiliens. Det är inte nödvändigtvis så att en hög grad av självförsörjning i en lokal systemlösning ger ett robust och resurseffektivt system. Ett mindre system kan bli känsligt för driftstörningar då kapacitet i överliggande system inte säkert finns tillgängligt att tillgå vid eventuella produktionsbortfall eller distributionsavbrott. Samtidigt kan högt självförsörjande utgöra möjligheter till lokal försörjning vid större avbrott i överliggande system. Självförsörjande kan naturligtvis också handla om möjligheten till större inflytande över fasta och rörliga kostnader. Detta är kanske till och med det vanligare syftet med önskan om en hög grad av autonomi eller oberoende som lyfts fram. I det fallet kan det dock diskuteras vid vilken systemnivå våra energitillförselsystem bäst bör optimeras. Det finns energiteknisk och resursmässig effektivitet att vinna genom skalfördelarna i större system. Större system kan emellertid uppfattas som tröga och framförallt blir priser svåra att påverka och med svårbedömd skälighet för enskilda användare. Detta är ett angeläget ämne som inte ägnas mer utrymme just här men som klart behöver mer forskning och diskussion.

Resultaten som presenterats här beror i stora delar av de antaganden som gjorts i simuleringarna och som utgör förutsättningar i den virtuella testbädden. Dimensionering av solesystem, solvärmesystem, batterilager och termiska lager bestäms av förvisso rimliga men inte självklara principer. De algoritmer som styr elbilsladdning och batterianvändning är enkla och innehåller inte inslag av så

kallade "smarta" energisystem, vilket skulle kunna vara en möjlig utveckling av simuleringarna. De simuleringar som gjorts bedöms trots detta ge en god principiell grund för att analysera hur energiflöden i lokala energisystem överlappar och för att påvisa risken för energikvalitetsförluster.

Det är naturligtvis fullt möjligt att tillämpa denna analys även på andra systemlösningar. Lagring av el skulle även kunna göras i form av vätgas vilket skulle kunna vara en intressant teknik i och med pågående utveckling av fossilfri stålproduktion. Analysen är även fullt tillämpbar på andra energisystem än bebyggelse i form av bostäder. Industriella system och generellt sätt mer heterogena byggnadskluster är intressanta tillämpningar.

En aspekt som diskuterades i samband med förberedelserna för projektet var hur överskott av solet ska betraktas i exergimening om det inte finns någon avsättning för den. Detta är intressant och det är rimligt att tänka att med stora produktionskapaciteter i solcellsanläggningar riskerar det att uppstå situationer där överskottsel inte kan användas eller lagras eller distribueras vidare, och att den då blir att betrakta som värdelös. Frågan är vad det säger om kvaliteten på energin. Det är inte rimligt att anse att exergivärdet i elektriciteten i sig blir lägre för att systemet inte klarar av att tillgodogöra sig det. Däremot kan systemet anses bidra till stora kvalitetsförluster om solet lokalt blir oanvändbar och i värsta fall behöver kopplas bort, det som på engelska kallas *curtail*. Så genom att inkludera curtailning som 100% kvalitetsförlust av energitillförsel så skulle det kunna speglas i analysen. I avsnitt 6.2 presenterades exergieffektiviteter som baseras på att allt överskott av el och värme, det vill säga all energi som inte kan användas eller lagras, i varje tidssteg betraktas som förlorad och innebär därmed även en exergiförlust. I de detaljerade resultaten i bilaga 1 finns dock även exergieffektiviteter presenterade som baseras på antagandet om att överskottsproduktion kan tillgodogöras i andra delar av systemet. Som förväntat ökar detta exergieffektiviteten.

Avslutningsvis bör även poängteras att utformningen av lokala energisystemlösningar exempelvis i form av sk energigemenskaper bör göras i relation till den energisystemkontext som föreligger. Aspekter som elnätets kapacitet att hantera överskott och underskott av el, en stads möjliga kapacitetstillgång för införande av el utifrån, tillgång på spillvärme samt existerande infrastruktur för termisk distribution bör beaktas för att det lokala systemet ska bidra till att energitillförselsystemet som helhet blir mer resilient och resurseffektivt, snarare än tvärtom.

## 9 Slutsats och fortsatt arbete

Sammanfattningsvis är det rimligt att utifrån de resultat som genererats i detta projekt dra slutsatsen att exergieeffektivitet tillsammans med nivåer av självförsörjande och självkonsumtion ger en bredare och mer balanserad analys av tekniska egenskaper i lokala energisystemlösningar. Analysen visar att det är möjligt att urskilja onödiga kvalitetsförluster i en systemlösning och att detta kan bidra som underlag för beslutsfattande om systemlösningar för befintliga och för planerade bostadsområden.

Den workshop som genomfördes visade också att den tilltänkta målgruppen upplever att det finns ett värde i att inkludera exergieeffektivitet i analys av lokala energisystemlösningar. Tydligt var också att målgruppen ser värdet av flera kombinerade parametrar och att ekonomi inte får utelämnas.

Exergieeffektiviteten i lokala energisystemlösningar som den presenterats här saknas idag i diskussioner om införandet av energigemenskaper och skulle kunna tillföra ett perspektiv som bidrar till att undvika onödig elektrifiering i energisystem där detta potentiellt skulle kunna generera minskad resurseffektivitet.

Följande är tänkbara arbetspunkter för fortsatt arbete i senare projekt:

- Inkludera energieffektiviseringar av byggnader och hur det påverkar temperaturbehoven för uppvärmning. Detta för att påvisa en bredd i användbarheten och att analysen är relevant för flera aktörer och systemfrågor.
- Inkludera lågtempererad värmedistribution.
- Tillämpa analysen som presenterats här i verkliga fall där olika systemlösningar övervägs för utbyggnad eller utveckling av bostadsområden.
- Undersöka hur flexibilitetsåtgärder för tidsmässig anpassning av el- och värmeanvändning kan påverka exergieeffektiviteten i lokala energisystemlösningar.
- Utveckla upplägget av workshop för ytterligare workshops för att fortsätta diskutera tillämpning och användande av exergikonceptet med olika målgrupper. Det är ett värde i att diskutera exergibegreppet med aktörer som på olika sätt arbetar med utformning, drift och underhåll av lokala energisystem.

## 10 Referenslista

- Björk, E., Acuña, J., Granryd, E., Mogensen, P., Nowacki, J.-E., Palm, B., Weber, K., 2013. Bergvärme På Djupet: Boken För Dig Som Vill Veta Mer Om Bergvärmepumpar.
- Boverkets byggregler (BBR). Luft och ventilation i bostäder.  
<https://www.boverket.se/sv/byggande/halsa-och-inomhusmiljo/ventilation/luft-och-ventilation-i-bostader/> (2024-10-15)
- Cao, S. (2014) Matching analysis for on-site building energy systems involving energy conversion, storage and hybrid grid connections. PhD thesis, Aalto University, Finland.
- Çengel, Yunus A. (2008). Thermodynamics : an engineering approach. Boston :McGraw-Hill Higher Education,
- Ericsson-Sintong, J. (2023) Data Centres as Prosumers: A Techno- Economic Analysis. Master of Science in Energy Technologies (ENTECH). Thesis, Uppsala universitet.
- European Commission. Clean energy for all Europeans. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019.
- European Parliament. Directive (EU) 2019/944 on common rules for the internal market for electricity. Off J Eur Union. 2019.
- European Parliament. Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources. Off J Eur Union. 2018.
- Fachrizal, R., Lindberg, O., Kinasih, Annisa D. S., Muntean, A., Widén, J. & Munkhammar, J. (2022) Residential building with rooftop solar PV system, battery storage and electric vehicle charging: Environmental impact and energy matching assessments for a multi-family house in a Swedish city.
- Grahn P, Munkhammar J., Widén J., Alvehag K., Söder L., PHEV Home-Charging Model Based on Residential Activity Patterns, IEEE Transactions on Power Systems 28: 2507-2515, 2013.
- Ham, S-W., Kim, M-H., Choi, B-N., Jeong, J-W. (2015) Simplified server model to simulate data center cooling energy consumption. Energy and Buildings 86 (2015) 328-339.
- Johari, F., Munkhammar, J., Shadram, F. & Widén, J. (2022) Evaluation of simplified building energy models for urban-scale energy analysis of buildings. Building and Environment 211 (2022) 108684

- Johari, F., Shadram, F., Widén, J. Urban building energy modeling from geo-referenced energy performance certificate data: Development, calibration, and validation. *Sustainable Cities and Society*. Volume 96, September 2023, 104664.
- Johari, F., Lindberg, O., Ramadhani, U.H., Shadram, F., Munkhammar, J., Widén, J. Analysis of large-scale energy retrofit of residential buildings and their impact on the electricity grid using a validated UBEM. *Applied Energy*. Volume 361, 1 May 2024, 122937.
- Liu, Z. (2011) *Greening Geographical Load Balancing*. California Institute of Technology. Pasadena, California.
- Luthander R, Widén J, Nilsson D, Palm J. Photovoltaic self-consumption in buildings: a review. *Appl Energy* 2015;142:80–94.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>.
- Luthander, R., Nilsson, A. M., Widén, J., Åberg, M. (2019) Graphical analysis of photovoltaic generation and load matching in buildings: A novel way of studying self-consumption and self-sufficiency, *Applied Energy*. Vol 250 pp. 748–759.
- Lund, H., et al., (2014) 4th Generation district heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems.,” , *Energy* 68 (2014) 1–11.
- Olsson, O. (2023) *Distributionssystem för lågtempererad fjärrvärme i framtida bostadsområden – Fallstudie för stadsomvandlingsprojektet Näringen i Gävle*. Examensarbete 30 hp, Civilingenjörsprogrammet i energisystem, Uppsala universitet.
- Oró, E., Taddeo, P., Salom, J. (2019) Waste heat recovery from urban air cooled data centres to increase energy efficiency of district heating networks, *Sustainable Cities and Society* 45 (2019) 522-542.
- Pavlov, G. K., & Olesen, B. W. (2011). *Seasonal Ground Solar Thermal Energy Storage - Review of Systems and Applications*. In *Proceedings* (pp. P-1.2-07)
- Peuser, Dr. F A., Remmers, K-H., Schnauss, M. (2002) *Solar Thermal Systems – Successful Planning and Construction*, Solar praxis, Berlin, Germany.
- Press, A. (2022) *Utformning av modell för simulering av distributionsnät för fjärrvärme*. Examensarbete 30 hp, Civilingenjörsprogrammet i energisystem, Uppsala universitet.
- SVEBY (2012), *Brukarindata bostäder – Version 1.0* 1012-10-10. Svebyprogrammet. Stockholm.
- Uppsala klimatprotokoll. <https://klimatprotokollet.uppsala.se> (2024-06-07)

- Wall, G. (1992), Exergi, helhetssyn och intelligens – En tillämpning på Västerås.
- Wall, G. & Gong, M. On exergy and sustainable development—Part 1: Conditions and concepts. Exergy, an International
- Widén, J. & Wäckelgård, E. (2010), A high-resolution stochastic model of domestic activity pattern and electricity demand, Applied Energy 87: 1880-1892.
- Widén, J., et al. (2009), A combined Markov-chain and bottom-up approach to modelling of domestic lighting demand, Energy and Buildings 41: 1001-1012.
- Åberg, M., Lingfors, D., Olauson, J., Widén, J. (2019) Can electricity market prices control power-to-heat production for peak shaving of renewable power generation? The case of Sweden, Energy. Vol 176, pp. 1-14.

# Bilagor

## BILAGA A – DATA FÖR TERMISKT DISTRIBUTIONSSYSTEM

Tabell A1 innehåller rörlängder och dimensioner i det termiska distributionssystem som använts för att beräkna distributionsförluster och distributionstemperaturer som försörjer byggnaderna i testbädden med värme.

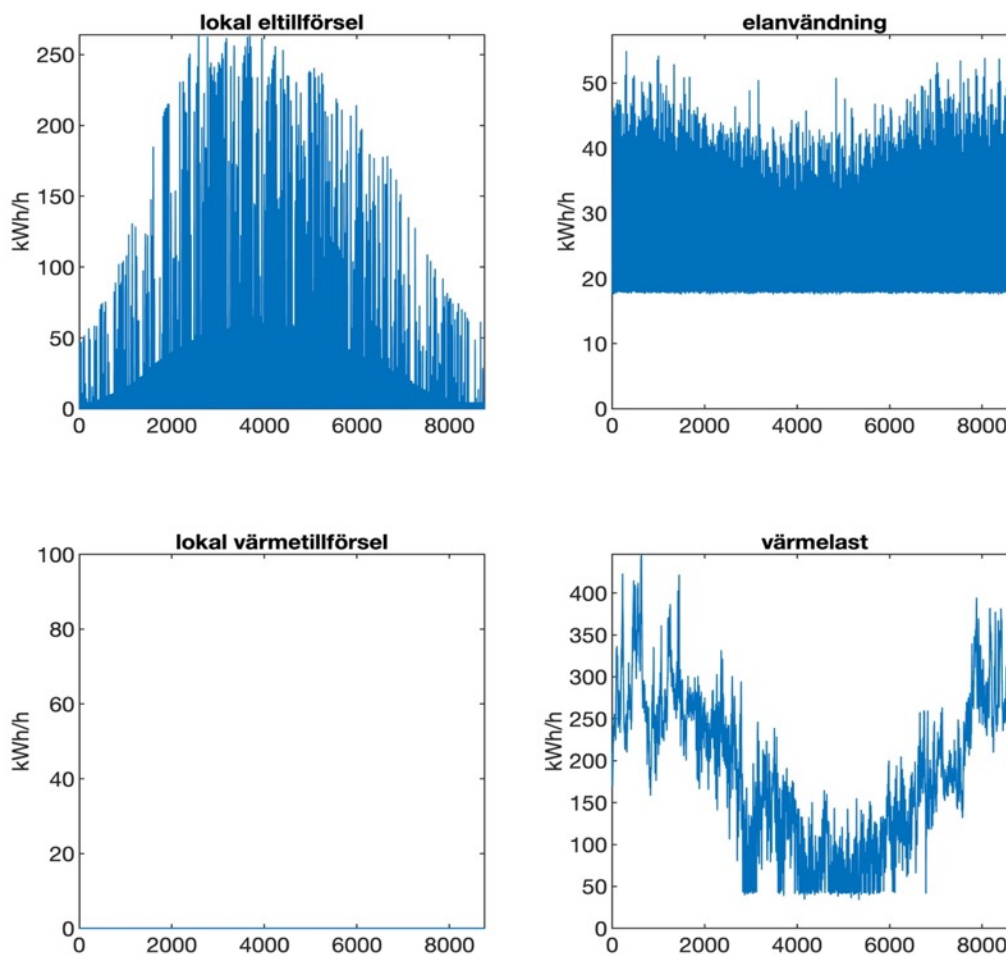
*Tabell A1. Rörlängder och diametrar för de olika rördelarna i det termiska distributionssystemet.*

rörledning	Innerdiameter - d(m)	Ytterdiameter - D(m)	Längd (m)
1	0,02	0,0259	36
2	0,065	0,0761	30
3	0,04	0,0483	20
4	0,05	0,0603	10
5	0,02	0,0259	24
6	0,01	0,015	38
7	0,04	0,0483	10
8	0,025	0,0327	7
9	0,01	0,015	7
10	0,02	0,0259	10
11	0,02	0,0259	10
12	0,01	0,015	10
13	0,01	0,015	25
14	0,025	0,0327	10
15	0,02	0,0259	10
16	0,01	0,015	35
17	0,02	0,0259	24
18	0,01	0,015	16
19	0,01	0,015	18
20	0,01	0,015	20
21	0,01	0,015	35
22	0,025	0,0327	8
23	0,02	0,0259	20
24	0,02	0,0259	12
25	0,01	0,015	10
26	0,02	0,0259	32
27	0,02	0,0259	6
28	0,05	0,0603	42
29	0,032	0,0424	32
30	0,032	0,0424	16
31	0,025	0,0327	8
32	0,025	0,0327	62
33	0,025	0,0327	16
34	0,025	0,0327	30



## BILAGA B – SIMULERINGSRAPPORTER

Fall 1: Solel och fjärrvärme



Figur B1. Simulerade timvärden för lokal tillförsel av el och värme samt elanvändning och värmelast för beräkningsfall 1.

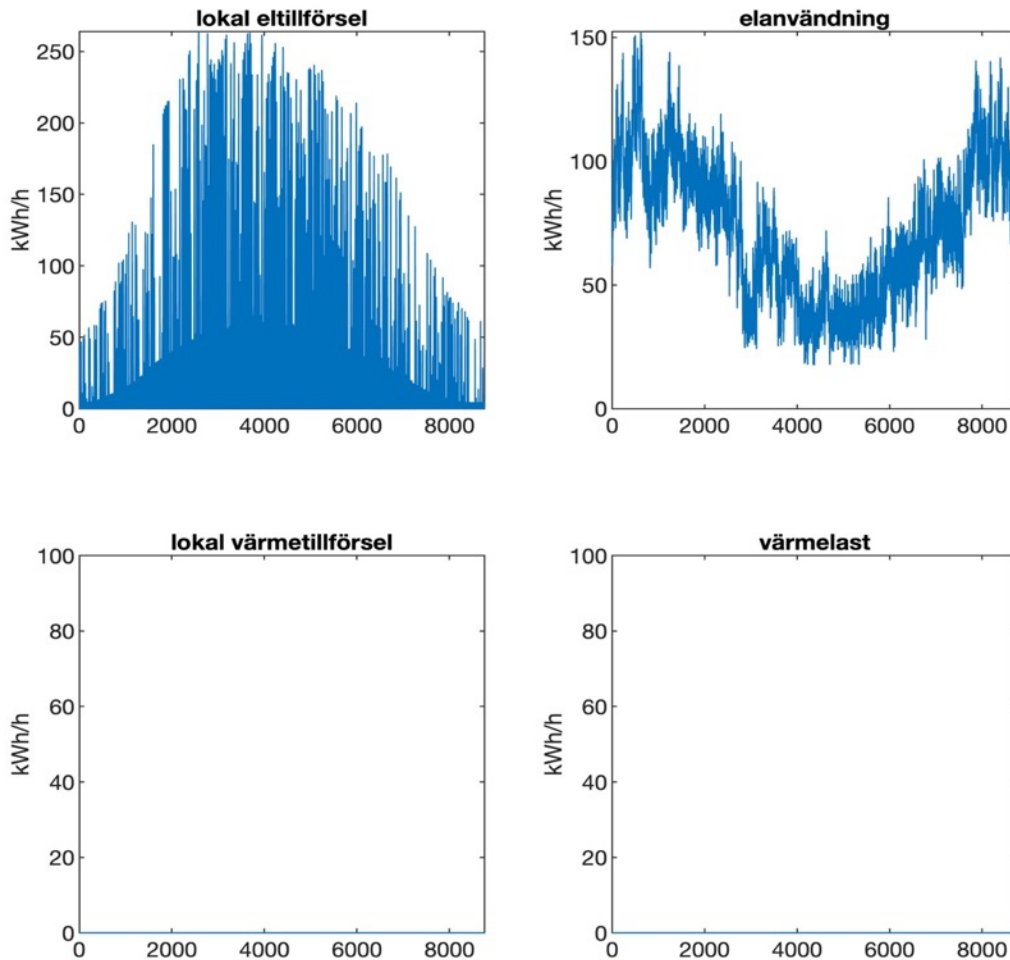
Tabell B1. Nyckeltal i form av årsvärden och prestandamått för beräkningsfall 1.

Nyckeltal	Värde
Lokal eltilförsel [MWh/år]	318
Lokal värmeförsel [MWh/år]	0
elbehov [MWh/år]	247
värmelast [MWh/år]	1615
$SS_{\text{värme+el}}$	0,052
$SC_{\text{värme+el}}$	0,303
$SS_{\text{el}}$	0,391
$SC_{\text{el}}$	0,303
elöverskott [MWh/år]	222

Nyckeltal	Värde
värmeöverskott [MWh/år]	0
exergibehov [MWh/år]	312
tillförd exergi [MWh/år]	537
tillförd exergi* [MWh/år]	759
exergiverkningsgrad	0,581
exergiverkningsgrad*	0,412
el till batteri [MWh/år]	0
el från batteri [MWh/år]	0
värme från TES [MWh/år]	0

\*Med hänsyn tagen till exergiförlust via curtailing/bortkyllning

Fall 2: Solel och värmepumpar



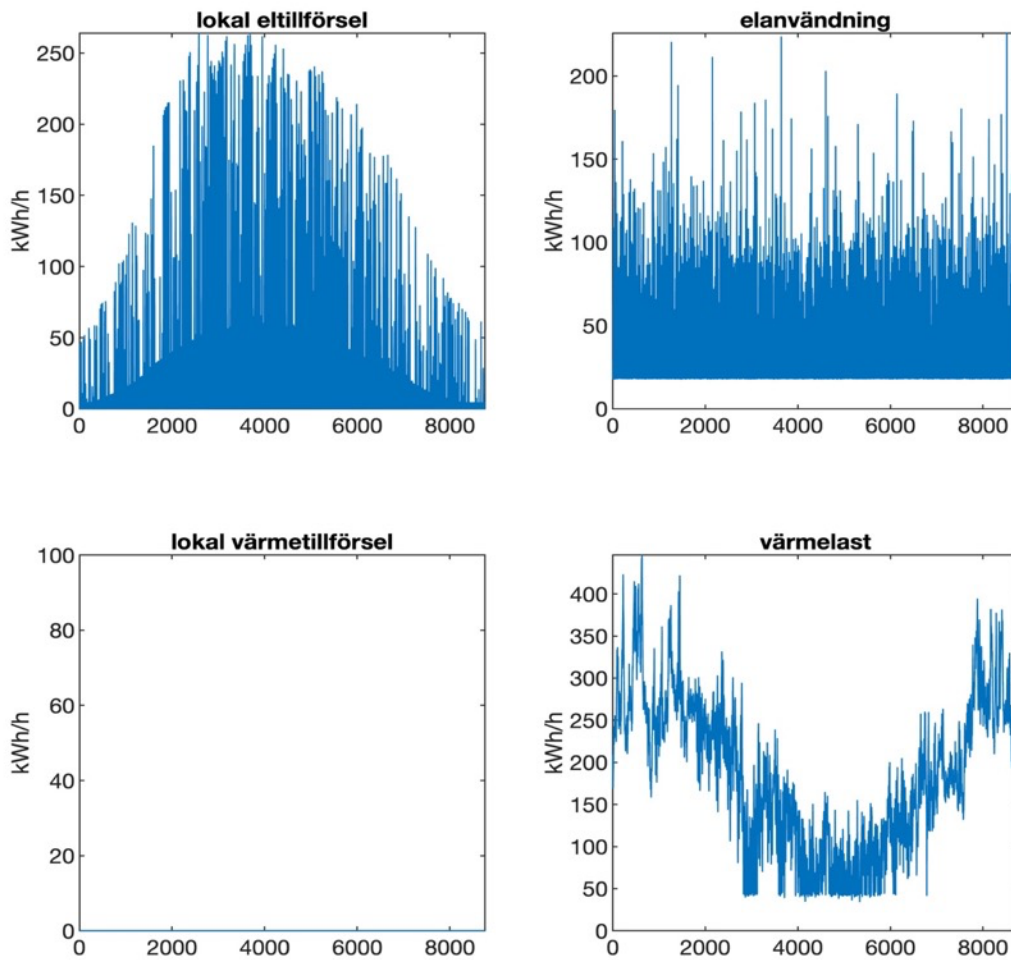
Figur B2. Simulerade timvärden för lokal tillförsel av el och värme samt elanvändning och värmelast för beräkningsfall 2.

Tabell B2. Nykeltal i form av årsvärden och prestandamått för beräkningsfall 2.

Nykeltal	Värde	Nykeltal	Värde
Lokal eltilförsel [MWh/år]	318	värmeöverskott [MWh/år]	0
Lokal värmertilförsel [MWh/år]	0	exergibehov [MWh/år]	312
elbehov [MWh/år]	621	tillförd exergi [MWh/år]	621
wärmelast [MWh/år]	0	tillförd exergi* [MWh/år]	791
$SS_{\text{värme+el}}$	0,239	exergiverkningsgrad	0,502
$SC_{\text{värme+el}}$	0,467	exergiverkningsgrad*	0,395
$SS_{\text{el}}$	0,182	el till batteri [MWh/år]	0
$SC_{\text{el}}$	0,356	el från batteri [MWh/år]	0
elöverskott [MWh/år]	169	wärme från TES [MWh/år]	0

\*Med hänsyn tagen till exergiförlust via curtailing/bortkylning

Fall 3: Solel, fjärrvärme och elbilsladdning



Figur B3. Simulerade timvärden för lokal tillförsel av el och värme samt elanvändning och värmelast för beräkningsfall 3.

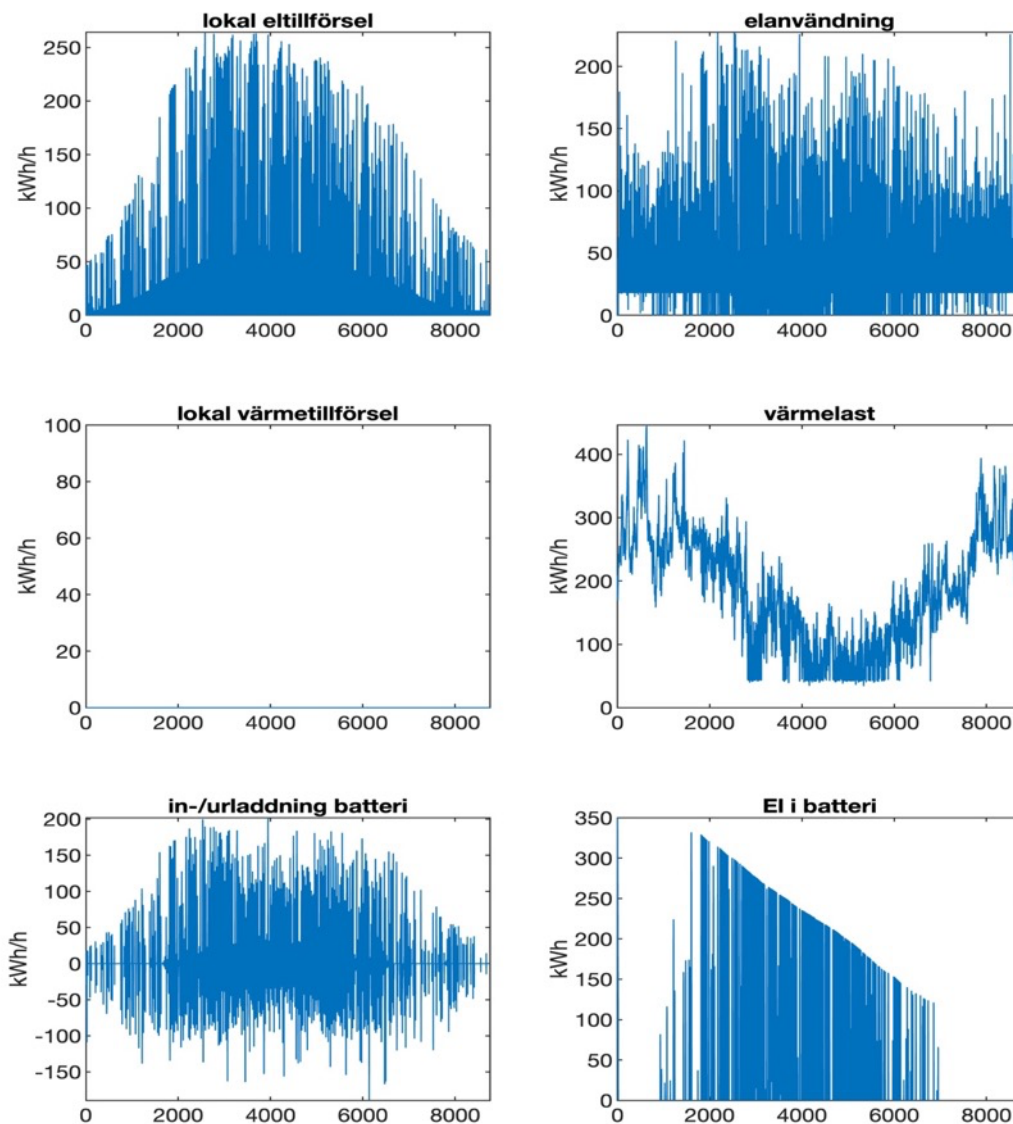
Tabell B3. Nyckeltal i form av årsvärden och prestandamått för beräkningsfall 3.

Nyckeltal	Värde
Lokal eltillförsel [MWh/år]	318
Lokal värmertilförsel [MWh/år]	0
elbehov [MWh/år]	341
värmelast [MWh/år]	1615
$SS_{\text{värme+el}}$	0,062
$SC_{\text{värme+el}}$	0,381
$SS_{\text{el}}$	0,356
$SC_{\text{el}}$	0,381
elöverskott [MWh/år]	197

Nyckeltal	Värde
värmeöverskott [MWh/år]	0
exergibehov [MWh/år]	312
tillförd exergi [MWh/år]	631
tillförd exergi* [MWh/år]	828
exergiverkningsgrad	0,495
exergiverkningsgrad*	0,377
el till batteri [MWh/år]	0
el från batteri [MWh/år]	0
värme från TES [MWh/år]	0

\*Med hänsyn tagen till exergiförlust via curtailing/bortkyllning

Fall 4: Solel, fjärrvärme, elbilsladdning och batterilager



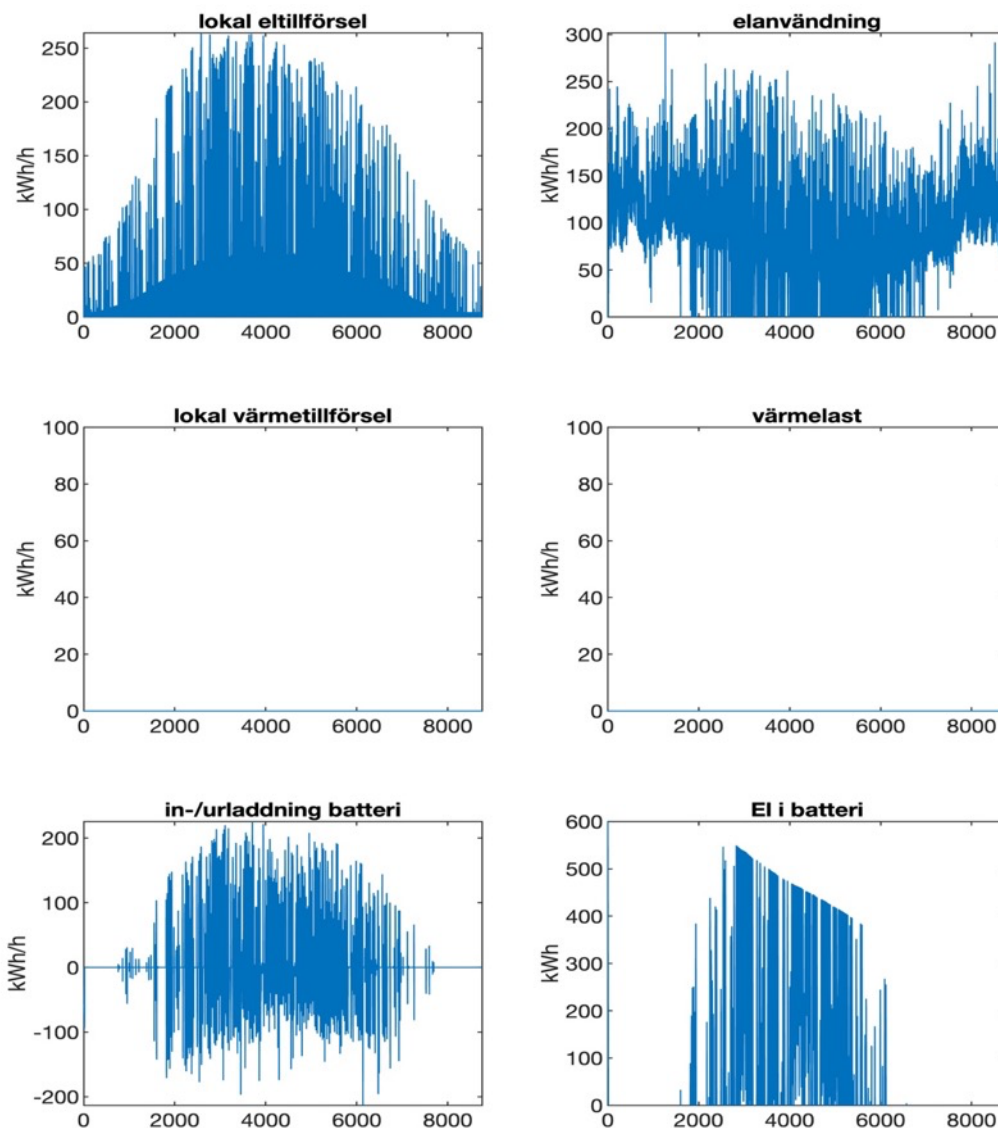
Figur B4. Simulerade timvärden för lokal tillförsel av el och värme, elanvändning och värmelast, samt batteriutnyttjande för beräkningsfall 4.

Tabell B4. Nyckeltal i form av årsvärden och prestandamått för beräkningsfall 4.

Nyckeltal	Värde	Nyckeltal	Värde
Lokal eltillförsel [MWh/år]	318	värmeöverskott [MWh/år]	0
Lokal värmertilförsel [MWh/år]	0	exergibehov [MWh/år]	312
elbehov [MWh/år]	350	tillförd exergi [MWh/år]	640
värmelast [MWh/år]	1615	tillförd exergi* [MWh/år]	740
$SS_{\text{värme+el}}$	0,111	exergiverkningsgrad	0,488
$SC_{\text{värme+el}}$	0,687	exergiverkningsgrad*	0,422
$SS_{\text{el}}$	0,625	el till batteri [MWh/år]	97,2
$SC_{\text{el}}$	0,687	el från batteri [MWh/år]	88,3
elöverskott [MWh/år]	99.6	värme från TES [MWh/år]	0

\*Med hänsyn tagen till exergiförlust via curtailing/bortkyllning

Fall 5: Solel, värmepumpar, elbilsladdning och batterilager



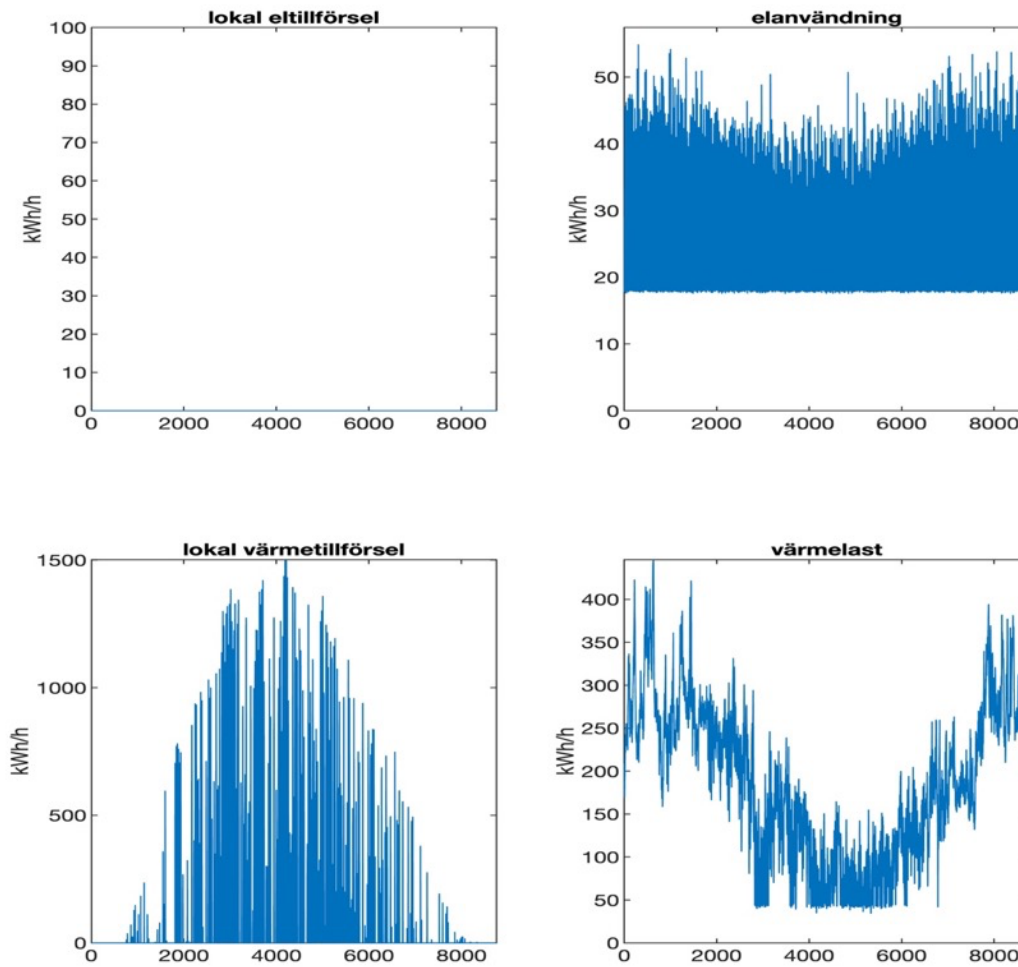
Figur B5. Simulerade timvärden för lokal tillförsel av el och värme, elanvändning och värmelast, samt batteriutnyttjande för beräkningsfall 5.

Tabell B5. Nyckeltal i form av årsvärden och prestandamått för beräkningsfall 5.

Nyckeltal	Värde	Nyckeltal	Värde
Lokal eltillförsel [MWh/år]	318	värmeöverskott [MWh/år]	0
Lokal värmertilförsel [MWh/år]	0	exergibehov [MWh/år]	312
elbehov [MWh/år]	725	tillförd exergi [MWh/år]	725
värmelast [MWh/år]	0	tillförd exergi* [MWh/år]	769
$SS_{\text{värme+el}}$	0,378	exergiverkningsgrad	0,431
$SC_{\text{värme+el}}$	0,861	exergiverkningsgrad*	0,406
$SS_{\text{el}}$	0,378	el till batteri [MWh/år]	106
$SC_{\text{el}}$	0,861	el från batteri [MWh/år]	96,8
elöverskott [MWh/år]	44,1	värme från TES [MWh/år]	0

\*Med hänsyn tagen till exergiförlust via curtailing/bortkylning

Fall 6: Fjärrvärme och solvärme



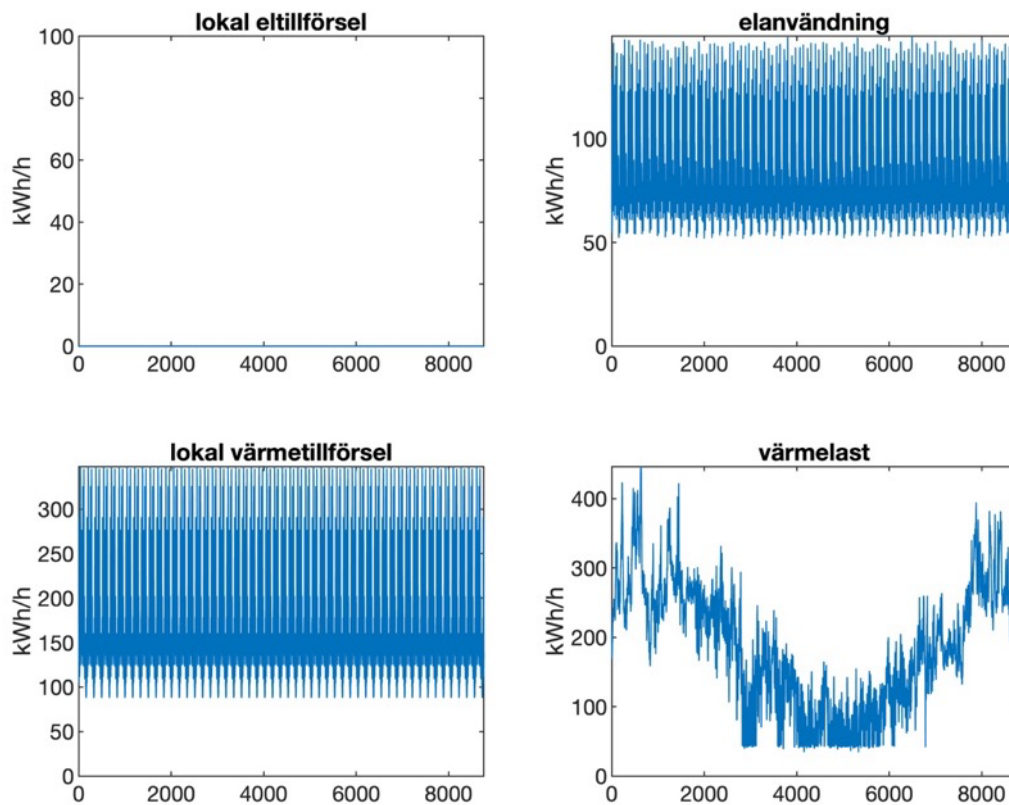
Figur B6. Simulerade timvärden för lokal tillförsel av el och värme samt elanvändning och värmelast för beräkningsfall 6.

Tabell B6. Nyckeltal i form av årsvärden och prestandamått för beräkningsfall 6.

Nyckeltal	Värde	Nyckeltal	Värde
Lokal eltilförsel [MWh/år]	0	värmeeöverskott [MWh/år]	653
Lokal värmeförsel [MWh/år]	791	exergibehov [MWh/år]	312
elbehov [MWh/år]	247	tillförd exergi [MWh/år]	537
värmelast [MWh/år]	1615	tillförd exergi* [MWh/år]	637
$SS_{\text{värme+el}}$	0,074	exergiverkningsgrad	0,581
$SC_{\text{värme+el}}$	0,174	exergiverkningsgrad*	0,490
$SS_{\text{el}}$	0	el till batteri [MWh/år]	0
$SC_{\text{el}}$	0	el från batteri [MWh/år]	0
elöverskott [MWh/år]	0	värme från TES [MWh/år]	0

\*Med hänsyn tagen till exergiförlust via curtailing/bortkyllning

Fall 7: Fjärrvärme och Spillvärme från datacenter



Figur B7. Simulerade timvärden för lokal tillförsel av el och värme samt elanvändning och värmelast för beräkningsfall 7.

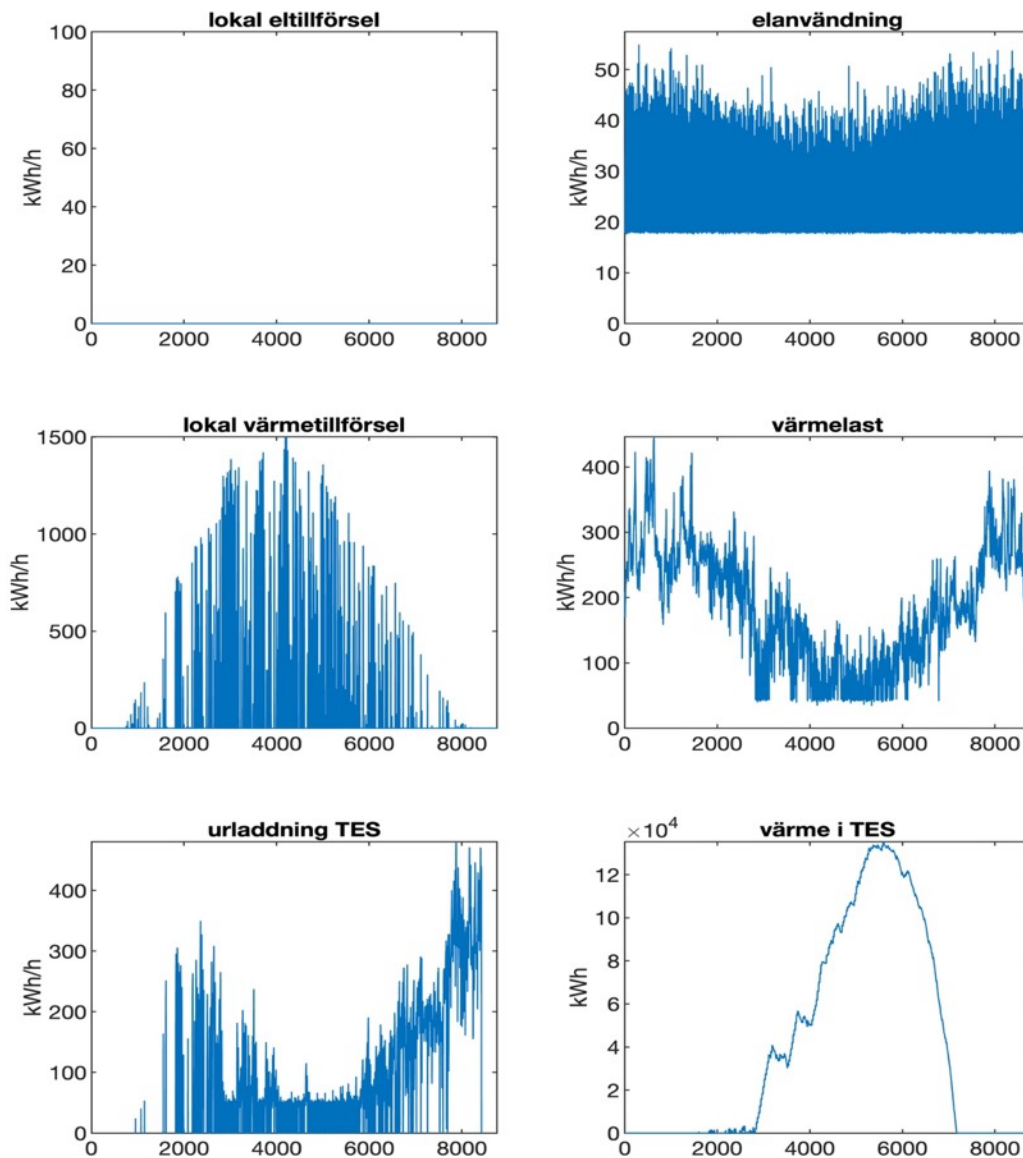
Tabell B7. Nyckeltal i form av årsvärden och prestandamått för beräkningsfall 7.

Nyckeltal	Värde
Lokal eltilförsel [MWh/år]	0
Lokal värmertilförsel [MWh/år]	1513
elbehov [MWh/år]	751
värmelast [MWh/år]	1615
$SS_{\text{värme+el}}$	0,489
$SC_{\text{värme+el}}$	0,764
$SS_{\text{el}}$	0
$SC_{\text{el}}$	0
elöverskott [MWh/år]	0

Nyckeltal	Värde
värmeöverskott [MWh/år]	357
exergibehov [MWh/år]	312
tillförd exergi [MWh/år]	537
tillförd exergi* [MWh/år]	595
exergiverkningsgrad	0,300
exergiverkningsgrad*	0,284
el till batteri [MWh/år]	0
el från batteri [MWh/år]	0
värme från TES [MWh/år]	0

\*Med hänsyn tagen till exergiförlust via curtailing/bortkyllning

Fall 8: Fjärrvärme, solvärme och värmelager



Figur B8. Simulerade timvärden för lokal tillförsel av el och värme, elanvändning och värmelast, samt användning av termiskt lager för beräkningsfall 8.

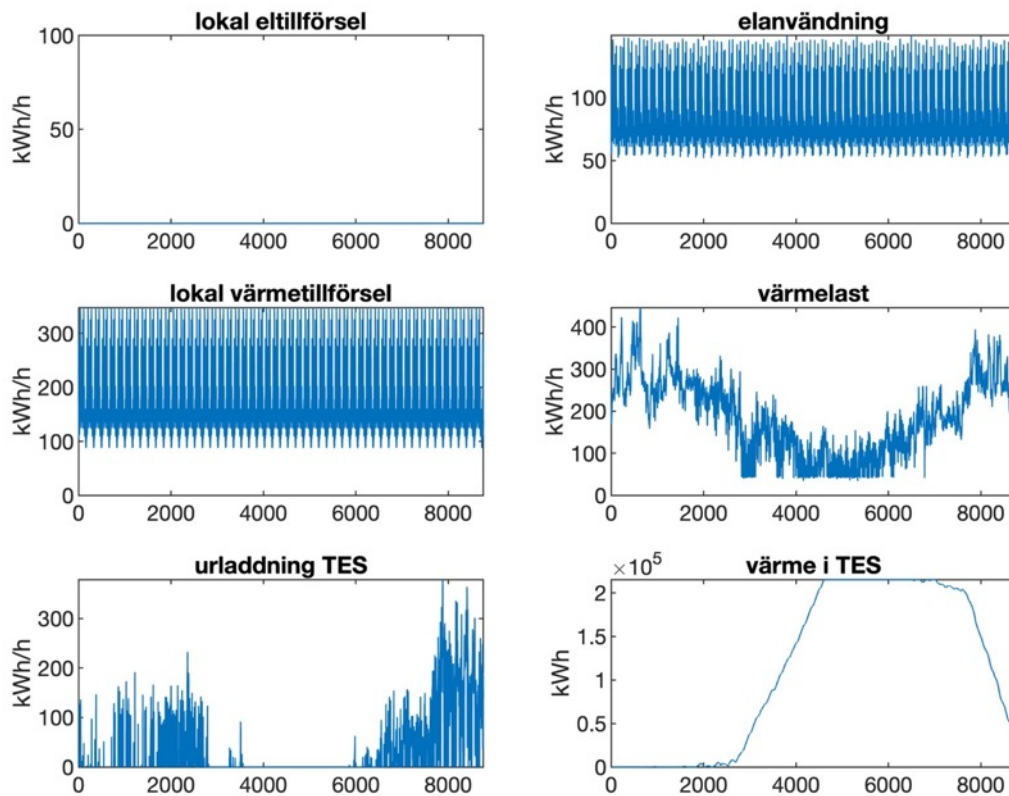
Tabell B8. Nyckeltal i form av årsvärden och prestandamått för beräkningsfall 8.

Nyckeltal	Värde	Nyckeltal	Värde
Lokal eltillförsel [MWh/år]	0	värmeöverskott [MWh/år]	20,3
Lokal värmertilförsel [MWh/år]	791	exergibehov [MWh/år]	312
elbehov [MWh/år]	247	tillförd exergi [MWh/år]	537
värmelast [MWh/år]	1615	tillförd exergi* [MWh/år]	525
$SS_{\text{värme+el}}$	0,414	exergiverkningsgrad	0,581
$SC_{\text{värme+el}}$	0,974	exergiverkningsgrad*	0,595
$SS_{\text{el}}$	0	el till batteri [MWh/år]	0
$SC_{\text{el}}$	0	el från batteri [MWh/år]	0
elöverskott [MWh/år]	0	värme från TES [MWh/år]	460

\*Med hänsyn tagen till exergiförlust via curtailing/bortkyllning



Fall 9: Fjärrvärme, spillvärme och värmelager



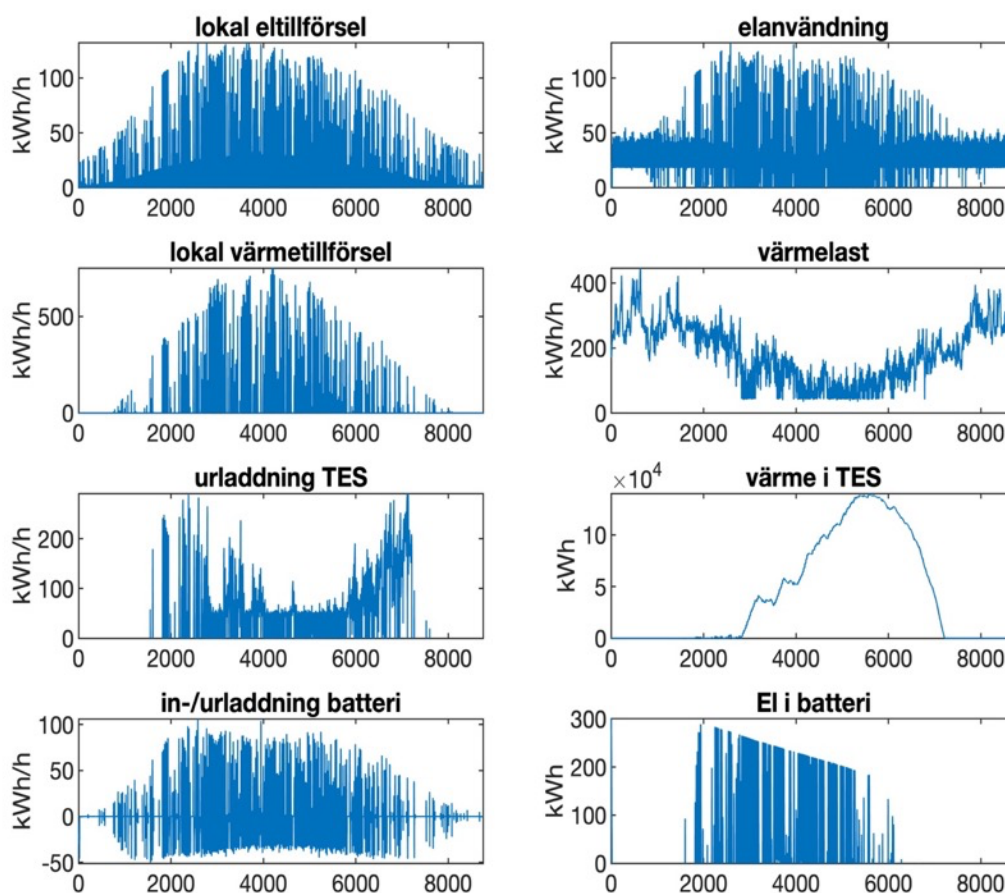
Figur B9. Simulerade timvärden för lokal tillförsel av el och värme, elanvändning och värmelast, samt användning av termiskt lager för beräkningsfall 9.

Tabell B9. Nyckeltal i form av årsvärden och prestandamått för beräkningsfall 9.

Nyckeltal	Värde	Nyckeltal	Värde
Lokal eltilförsel [MWh/år]	0	värmeöverskott [MWh/år]	274
Lokal värmeförsel [MWh/år]	1513	exergibehov [MWh/år]	312
elbehov [MWh/år]	751	tillförd exergi [MWh/år]	537
värmelast [MWh/år]	1615	tillförd exergi* [MWh/år]	578
$SS_{\text{värme+el}}$	0,524	exergiverkningsgrad	0,300
$SC_{\text{värme+el}}$	0,819	exergiverkningsgrad*	0,289
$SS_{\text{el}}$	0	el till batteri [MWh/år]	0
$SC_{\text{el}}$	0	el från batteri [MWh/år]	0
elöverskott [MWh/år]	0	värme från TES [MWh/år]	260

\*Med hänsyn tagen till exergiförlust via curtailning/bortkyllning

Fall 10: Solel, fjärrvärme, solvärme, batterilager och värmelager



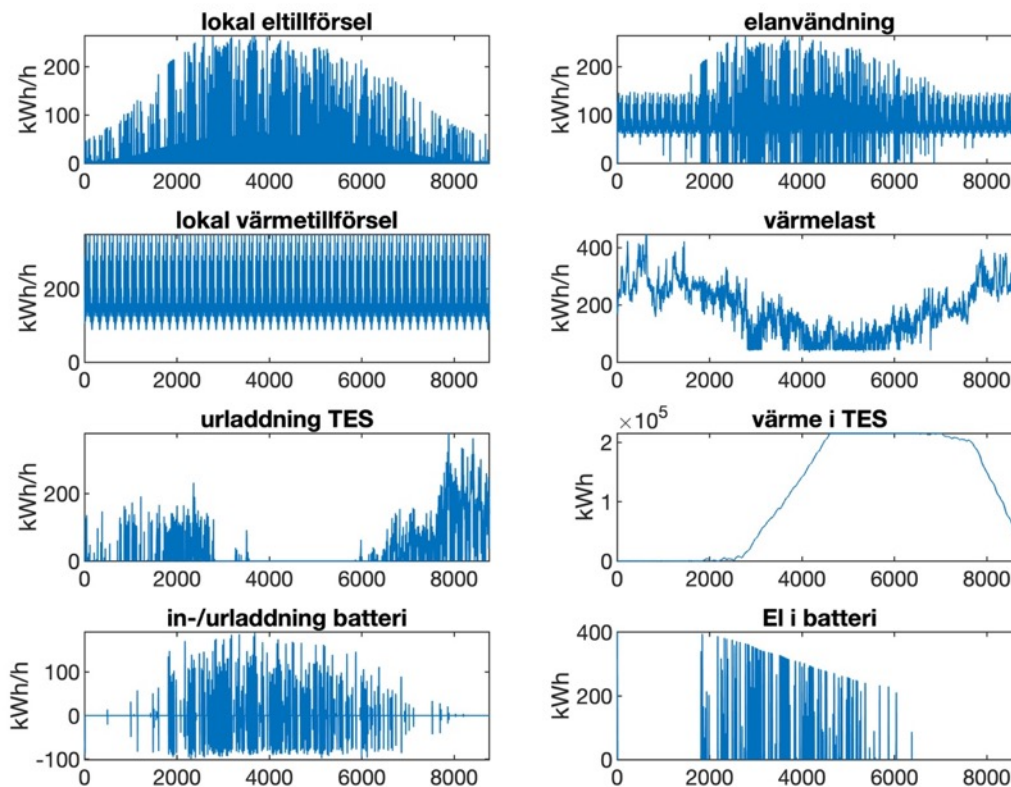
Figur B10. Simulerade timvärden för lokal tillförsel av el och värme, elanvändning och värmelast, samt användning av termiskt lager för beräkningsfall 10.

Tabell B10. Nyckeltal i form av årsvärden och prestandamått för beräkningsfall 10.

Nyckeltal	Värde	Nyckeltal	Värde
Lokal eltilförsel [MWh/år]	159	värmeöverskott [MWh/år]	7,09
Lokal värmertilförsel [MWh/år]	395	exergibehov [MWh/år]	312
elbehov [MWh/år]	252	tillförd exergi [MWh/år]	537
värmelast [MWh/år]	1615	tillförd exergi* [MWh/år]	533
$SS_{\text{värme+el}}$	0,293	exergiverkningsgrad	0,576
$SC_{\text{värme+el}}$	0,987	exergiverkningsgrad*	0,580
$SS_{\text{el}}$	0,550	el till batteri [MWh/år]	56,7
$SC_{\text{el}}$	0,870	el från batteri [MWh/år]	51,6
elöverskott [MWh/år]	0	värme från TES [MWh/år]	309

\*Med hänsyn tagen till exergiförlust via curtailing/bortkylning

Fall 11: Solel, fjärrvärme, spillvärme, batterilager och värmelager



Figur B11. Simulerade timvärden för lokal tillförsel av el och värme, elanvändning och värmelast, samt användning av termiskt lager för beräkningsfall 11.

Tabell B11. Nyckeltal i form av årsvärden och prestandamått för beräkningsfall 11.

Nyckeltal	Värde
Lokal eltillförsel [MWh/år]	318
Lokal värmertilförsel [MWh/år]	1513
elbehov [MWh/år]	758
värmelast [MWh/år]	1615
$SS_{\text{värme+el}}$	0,650
$SC_{\text{värme+el}}$	0,842
$SS_{\text{el}}$	0,401
$SC_{\text{el}}$	0,955
elöverskott [MWh/år]	14,2

Nyckeltal	Värde
värmeöverskott [MWh/år]	274
exergibehov [MWh/år]	312
tillförd exergi [MWh/år]	537
tillförd exergi* [MWh/år]	592
exergiverkningsgrad	0,298
exergiverkningsgrad*	0,283
el till batteri [MWh/år]	73,7
el från batteri [MWh/år]	67,2
värme från TES [MWh/år]	264

\*Med hänsyn tagen till exergiförlust via curtailing/bortkylning

## BILAGA C – INFOMATERIAL UTSKICKAT INNAN WORKSHOP

### Uppsala 2024-05-07

Detta är en kort introduktion till de begrepp som är centrala i det som ska diskuteras vid den workshop som anordnas av mig Magnus Åberg (Uppsala universitet) i samband med Uppsala klimatprotokolls energifokusgruppsmöte den 13/5. Workshopen är en del av ett forskningsprojekt om att använda exergianalys i utvärdering av lokala energisystem.

Texten inleds med ett kort utdrag ur en rapport där exergibegreppet beskrivs på ett konceptuellt och lättillgängligt sätt. Därefter följer en beskrivning av begreppen självförsörjandegrad och självkonsumtion som är vanligt tillämpade mått för att utvärdera lokala energisystemlösningar. Det är inte tanken att detta ska ge en djupare förståelse utan snarare att ge ett hum om vad de olika begreppen innebär.

#### Utdrag ur:

Wall, Göran - *EXERGI, HELHETSSYN OCH INTELLIGENS – EN TILLÄMPNING PÅ VÄSTERAS*, 1992.

#### Energi eller exergi?

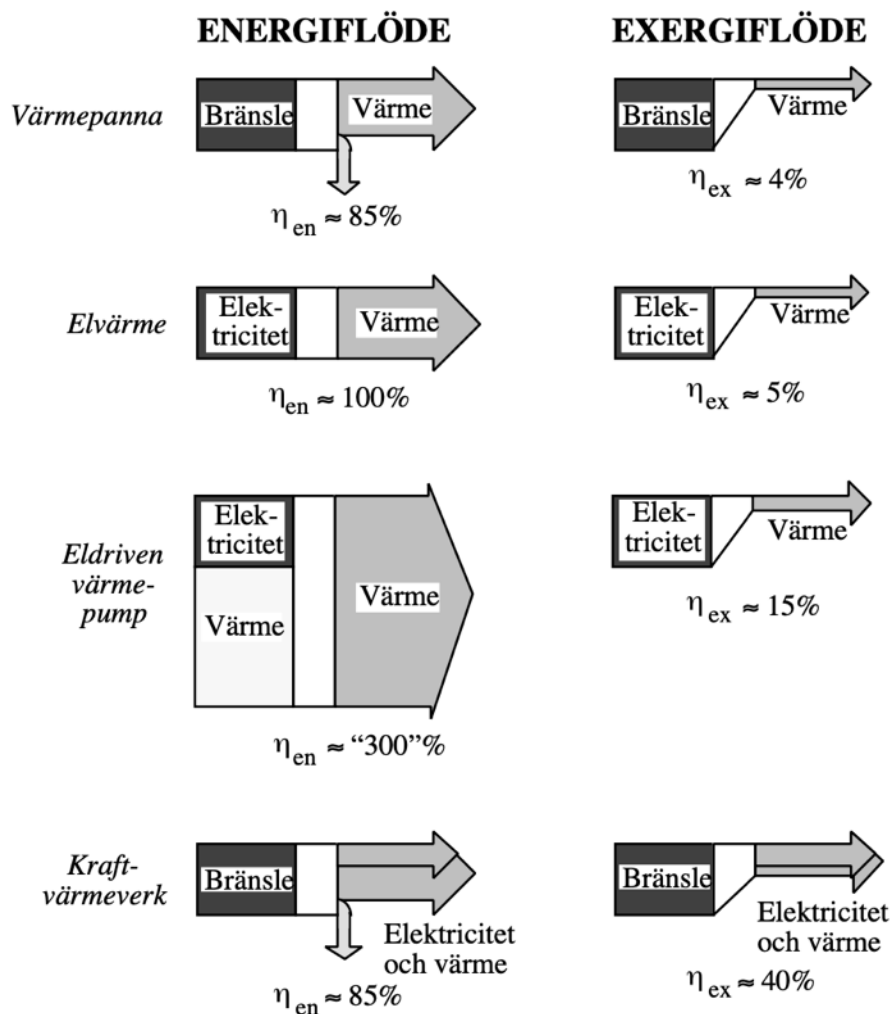
Den 18 november 1975, skrev Hannes Alfvén under rubriken *“Exergitutredning kan ge ny energipolitik”* i Svenska Dagbladet: *“Att helt enkelt summera energi av olika värde är lika felaktigt som att ange kassabehållningen i antalet mynt utan att ange om de är enkronor eller femöringar.”* Att utgå från exergi, energins kvalitet, gör det däremot möjligt att jämföra olika energiformer. El kan jämföras med enkronor och värmen i våra bostäder med femöringar, dvs båda är mynt — någon form av energi, men de har helt olika värde — kvalitet eller exergi.

Skillnaden i energi- och exergisynsättet illustreras i figur 3.11 för fyra energiomvandlare: en värmepanna, en elradiator, en elvärmepump och ett kraftvärmeverk. Värmepannan omvandlar ett bränsle som olja, ved eller gas till värme. Energiutbytet är ca 85 procent men exergikutbytet är bara ca 4 procent. Detta beror på den stora kvalitetsskillnaden mellan bränsle (“enkronor”) och värme (“femöringar”). Elvärme — elektrisk kortslutning — har energiutbytet 100 procent, helt enligt naturlagen om att energi inte kan förintas — all el måste bli värme. Dessa 100 procent är ingen övre gräns för energiutbytet då el omvandlas till värme, se elvärmepumpen i samma figur. El kan alltså omvandlas till mer än 100 procent nyttig

värme genom att utnyttja omgivningens "värme" för sin värmeproduktion. På samma sätt som vi kan växla en krona i fler än en femöring.

Exergiutbytet för elvärme är bara 5 procent, dvs en dålig växlingskurs, och för en elvärmepump däremot ca 15 procent, en något bättre växlingskurs. Energiutbytet är analogt med myntutbytet och exergiutbytet är analogt med det ekonomiska utbytet. I ett kraftvärmeverk — både el(kraft)- och

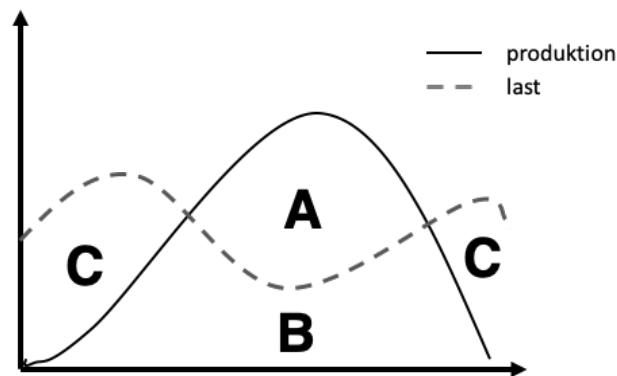
värmeproduktion — är energiutbytet ca 85 procent men exergiutbytet är bara 40 procent, vilket är samma som för ett värmekraftverk — bara elproduktion (ur värme). Vi kan alltså konstatera att det maximala energiutbytet (jfr "myntutbytet") mycket väl kan överskrida 100 procent då vi producerar värme, exergiutbytet ("värdeutbytet") däremot kan aldrig överstiga 100 procent — en grundläggande naturlag. En krona kan vi växla i tjugo femöringar och på samma sätt kan vi, vid en ideal process, "växla" en energienhet el i tjugo energienheter rumsvärme, men fortfarande har vi en krona eller en exergienhet.



Figur 3.11 Energi- och exergiverkningsgrader för värmepanna, elvärme, värmepump och kraftvärmeverk.

### Självförsörjandegrad och självkonsumtion

Självförsörjandegrad (*SS*) och självkonsumtion (*SC*) är vanliga mått på matchning mellan lokalt tillförd energi och energianvändning. Båda dessa mått antar ett värde mellan 0 och 1 där 1 betyder 100 % självförsörjning respektive självkonsumtion. Det är särskilt vanligt för utvärdering av solcellssystem på byggnader eller i kluster av byggnader. Grundtanken är att stor direkt matchning av lokal produktion mot lokalt behov (fält B i figur 2) i relation till storleken på överskott (fält A) och underskott (fälten C) är fördelaktigt. Främst innebär detta ett mindre beroende av överliggande nät och extern försörjning av el.



Figur 2. Principiell bild av produktionsprofil för lokal solexproduktion och lastprofil för lokal elanvändning.

Självförsörjandegrad (SS) definieras som

$$SS = \frac{B}{B+C} \quad (1)$$

och självkonsumtion (SC) definieras som

$$SC = \frac{B}{B+A} \quad (2)$$

Det vanliga när självförsörjandegrad och självkonsumtion används för att utvärdera ett lokalt system med solexproduktion och elanvändning, särskilt om det rör sig om bostäder, är att en hög självkonsumtion medför en låg självförsörjningsgrad och vice versa. Detta beror i huvudsak på hur produktionssystemet är dimensionerat i förhållande till lasten. Ett system som i teorin ska kunna vara kontinuerligt självförsörjande måste ha en produktionsvolym som är lika eller större än den totala årliga lasten. Men för att systemet ska bli oberoende av sin omgivning måste produktionen även matcha lasten i tiden, inte bara i årsvolymen. Ett perfekt matchat system skulle ha  $SS = SC = 1$ , vilket när det gäller solexproduktion och bostäders generella elanvändningsmönster kan betraktas som en utopi. Med hjälp av batterier eller laststyrning kan dock matchningen mer eller mindre förbättras och därmed kan dylika åtgärder höja såväl självförsörjningen som självkonsumtionen.





3. Skulle exergibegreppet kunna vara användbart för dig i din yrkesroll och i den organisation du företräder?

Inte alls Mycket användbart  
0 1 2 3 4 5

Utveckla ditt svar: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4. Är din uppfattning att exergi är ett användbart begrepp vid utvärdering av lokala energisystemslösningar?

Inte alls användbart Mycket användbart  
0 1 2 3 4 5

Utveckla ditt svar: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

5. Anser du att exergibegreppet potentiellt skulle kunna underlätta i kommunikation mellan aktörer involverade i stadsutveckling och till allmänheten?

Inte alls I stor utsträckning  
0 1 2 3 4 5

Utveckla ditt svar: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Stort tack för dina svar!

# EXERGIGEMENSKAPER – FÖR ETT RESURSEFFEKTIVT ENERGISYSTEM

Inom EU finns ett starkt politiskt engagemang för att underlätta skapandet av lokala energigemenskaper som medborgarinitiativ, för att snabba på omställningen till en mer hållbar energiförsörjning. I Sverige har energigemenskaper främst kretsat kring fastighetsägare och småföretag som investerar i sol- och vindenergi. Dessa initiativ, även om lovvärda, riskerar att fokusera för mycket på elektrifiering och förbise resurseffektiva energilösningar, vilket kan leda till kvalitetsförluster i energianvändningen.

I den här rapporten analyseras 11 olika energisystemlösningar med fokus på självförsörjningsgrad, självkonsumtion av lokalt producerad el och värme samt exergieffektivitet. Resultaten visar att det är möjligt att identifiera kvalitetsförluster i energisystem och att exergianalyser kan användas för utformning av lokala energisystem så att resurseffektivitet kan säkras.

Det viktigaste bidraget från rapporten är den analytiska metoden som utvecklats för att analysera exergiverkningsgrad i kombination med självförsörjningsgrad och självkonsumtion av lokalt tillförd energi. Denna metod är inte bara tillämpbar i bostadsområden utan kan även användas för industriella system och byggnadskluster. Vid en workshop med målgruppen, som bestod av aktörer från energisektor och fastighetssektor och lokala- samt regionala myndigheter, bekräftades behovet av att integrera exergieffektivitet i analysen av energisystem.

## Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på [energiforsk.se](http://energiforsk.se).