



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC STS 26036

Examensarbete 30 hp

Juni 2026

Utformning av energigemenskaper ur ett exergiperspektiv

Systemeffekter i lokala energisystem

Isa Nordin



Abstract

In the transition from fossil fuels to renewable energy sources, local energy communities are a smart solution to create self-sufficiency and reduce grid congestion. However, traditional evaluations of local energy systems mainly consider energy quantities, which creates a risk of overlooking energy quality (exergy). This reduces the possibility of thermodynamic optimization through exergy analysis. Thus, this study investigates the energy and exergy performance of a local energy community in Uppsala. The study investigates how different technical configurations impact the independence from the external grid and the overall resource utilization of the system. Based on hourly energy data, exergy flows were calculated, showing the thermodynamic quality difference between electricity, fuel and heat. Then, the community's self-sufficiency rate, self-consumption rate and exergy efficiency were calculated in different technical scenarios. In addition to the reference scenario which relies on imported energy, three scenarios were investigated: solar panels, solar panels combined with a heat pump and solar panels in combination with combined heat and power (CHP) integrated with thermal energy storage (TES). The results indicate that the technical configuration significantly impacts the exergy efficiency as well as the self-sufficiency of the system. Additionally, the results indicate that scenarios with a higher self-sufficiency have a lower exergy efficiency. This study demonstrates that exergy analysis is an interesting complement to traditional energy calculations, for revealing hidden thermodynamic losses. It also highlights the importance of the choice of system definition when conducting an exergy analysis.

The conclusion is that future designs of energy communities should be optimized based on both energy quantity and quality. This could maximize resource efficiency and support a truly sustainable energy transition. Furthermore, the study highlights the need for future research to evaluate exergy efficiency from a broader perspective to understand the efficiency outside of the community's border, to investigate the full impact of energy communities in the bigger energy system.

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala

Handledare: Magnus Åberg Ämnesgranskare: Joakim Munkhammar

Examinator: Elísabet Andrésdóttir

Populärvetenskaplig sammanfattning

Idag befinner sig Sveriges energisystem mitt i en omfattande förändring. För att nå målet om nettonollutsläpp av växthusgaser till år 2045 måste fossila bränslen som olja och kol snabbt ersättas med el. Denna förändring behöver ske i alla delar av samhället, i allt från bilar till industrier. Elektrifieringen medför dock utmaningar kopplade till elnätets kapacitet, där det blir kan bli överbelastat under de timmar vi använder mest el. Eftersom utbyggnaden av elnätet är både kostsam och tidskrävande finns redan kapacitetsbrist i flera delar av landet, vilket hämnar elektrifieringen och bidrar till högre elpriser. För att lösa denna utmaning räcker det inte med att bygga ut kraftledningar, utan vi behöver även använda den el vi har tillgång till på ett smartare sätt. Idag sker mycket arbete med att ta fram nya, smarta lösningar för detta.

En lösning som blir alltmer välkänd är så kallade energigemenskaper, som innebär att lokalsamhällen, grannar, lokala företag eller organisationer går samman för att producera, dela och lagra sin egen energi lokalt. På så sätt kan lokalsamhällen sänka sina elkostnader samtidigt som de bidrar till att avlasta elnätet, men dessa lokala energisystem kräver god planering för att fungera energieffektivt. Idag mäts energi oftast enbart som en mängd (kWh), vilket inte berättar något om energins kvalitet, alltså om hur användbar energin faktiskt är. Denna kvalitetsaspekt kallas för exergi. Att bortse från exergin i energiberäkningar är ungefär som att räkna mynt utan skilja på valörer. El som energibärare har exempelvis ett högt exergiinnehåll, alltså hög användbarhet, medan värme har betydligt lägre. Inom energigemenskaper är detta perspektiv viktigt för att undvika att högkvalitativ energi används ineffektivt till behov som egentligen hade kunnat täckas av lågkvalitativ energi. Målet är att matcha rätt typ av energi med rätt typ av behov, för att skapa ett mer resurseffektivt energisystem.

Trots att exergi är en viktig kvalitetsaspekt finns väldigt lite forskning om hur energigemenskaper presterar ur detta perspektiv. Detta arbete undersöker därför hur olika tekniska lösningar i en energigemenskap påverkar dess exergiprestanda. Arbetet utgår från en modell av en energigemenskap med flera olika byggnadstyper. De scenarier som undersöks är: solceller, solceller kombinerade med en värmepump, samt solceller kombinerade med ett kraftvärmeverk och ett värmelager. Fokus ligger på hur dessa scenarier påverkar energigemenskapens så kallade exergiverkningsgrad och hur denna parameter förhåller sig till systemets energimässiga oberoende gentemot omgivningen. Arbetet bygger på tidigare simulerade energiflöden som omvandlas till motsvarande exergiflöden.

Resultaten visar att de scenarier som ger störst energimässigt oberoende från omgivningen samtidigt uppvisar lägst exergiverkningsgrad, trots att de minskar importen av exergi mest. Paradoxalt nog uppvisar det helt importberoende referensscenariet den mest effektiva användningen av energins kvalitet, medan det helt

saknar egen energiförsörjning. Scenariot med solceller kombinerat med ett kraftvärmeverk och ett värmelager presterar tvärtom bäst sett till omgivningspåverkan, men sämst utifrån exergiverkningsgraden. Däremellan hamnar scenarierna med värmepumpen och solcellerna. Detta resultat indikerar att medan ett scenario kan prestera väl i relation till omgivningen, sker samtidigt stora interna förluster av energikvalitet. Dessa förluster härleds framförallt till värmeproducerande komponenterna (i detta fall värmepumpen och kraftvärmeverket), där energi av hög kvalitet i form av el och bränsle ineffektivt används för att förse lågexergi-behov i form av värme. Resultaten indikerar vidare att en energigemenskap som är väl utformad både ur ett exergi- och energiperspektiv bör vara av sådan typ att den sänker importberoendet så mycket som möjligt, samtidigt som denna import består av energi med så låg exergi som möjligt, i detta fall fjärrvärme. Dessutom är det önskvärt att en energigemenskap utformas på så sätt att den kan exportera el för att avlasta det omgivande elnätet.

Resultaten visar tydligt att utformningen av en energigemenskap starkt påverkar dess belastning mot omgivande el- och fjärrvärmenät, och att det därför är viktigt att förstå hur dessa system kan planeras på ett optimalt sätt. Vidare visar resultaten att det finns en tydlig avvägning mellan energimässigt oberoende och effektiv användning av energins kvalitet. Mer forskning behövs därför för att utveckla energigemenskaper som både avlastar elnätet och använder de tillgängliga resurserna på ett så resurseffektivt sätt som möjligt.

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Syfte och frågeställningar	2
1.1.1 Avgränsningar	2
2. Bakgrund	3
2.1 Energisystemet	3
2.1.1 Elnätet - Elektrifiering, effektbehov och nätkapacitet	3
2.1.2 Fjärrvärmenätet - beskrivning och utmaningar	4
2.2 Samverkan mellan el- och fjärrvärmenätet	5
2.3 Energigemenskaper	6
2.3.1 Definition och dagsläge	6
2.3.2 Tekniska lösningar i energigemenskaper	7
2.4 Exergiperspektivet	8
3. Teori	9
3.1 Exergi – energins kvalitet	9
3.1.1 Irreversibilitet och exergiförstöring	9
3.1.2 Exergins beroende av energibärare - exergifaktorn	10
3.2 Exergins omgivningsberoende	10
3.2.1 Den termodynamiska referensmiljön	11
3.3 Exergiberäkning i fjärrvärmesystem	11
3.4 Exergiförluster i energigemenskapens komponenter	12
3.4.1 Eldriven värmepump	13
3.4.2 Kraftvärmeverk	14
3.4.3 Vattenburet radiatorsystem	15
3.4.4 Termiskt lager	15
3.5 Systemprestanda och nyckeltal	16
3.5.1 Självförsörjandegrad och självkonsumtion	16
3.5.2 Exergiverkningsgrad	16
4. Metod	17
4.1 Tillvägagångssätt - överblick	17
4.2 Systembeskrivning och data	17
4.3 Data	19
4.4 Studerade scenarier	19
4.4.1 Referensscenario – Konventionell fjärrvärme (Fjv)	20
4.4.2 Scenario 1 – Solceller (PV)	20
4.4.3 Scenario 2 - Värmepump (VP)	20
4.4.4 Scenario 3 - Kraftvärme och värmelager (CHP + TES)	20
4.4.5 Komponenternas tekniska specifikationer	21
4.5 Systemgräns	21

4.6	Exergiberäkning och temperaturantaganden	23
4.6.1	Exergiberäkning.....	23
4.6.2	Exergifaktorer – temperaturantaganden	23
4.7	Beräkning av nyckeltal	25
4.7.1	Självförsörjandegrad och självkonsumtion	26
4.7.2	Exergiverkningsgrad	27
4.7.3	Grafisk analys av SS, SC och exergiverkningsgrad	27
4.8	Import och export	28
4.9	Tolkning av begreppet energikvalitetsförluster	28
5.	Resultat	29
5.1	Exergifaktorer beroende på delsystem.....	29
5.2	Exergibehov och exergitillförsel.....	30
5.3	Självförsörjandegrad, självkonsumtion och exergiverkningsgrad.....	33
5.4	Import och export mot externt nät.....	37
6.	Diskussion	41
6.1	Konflikt mellan energi- och exergimått.....	41
6.2	Exergibehov och exergiverkningsgrader	42
6.3	Omgivningspåverkan	46
6.4	Metoddiskussion.....	47
6.5	Framtida forskning.....	48
7.	Slutsatser	49
	Referenser	51

1. Inledning

Sveriges energisystem befinner sig i en omfattande omställning till följd av klimatmål, elektrifiering av samhället och en växande andel förnybar energi i energimixen. För att uppnå klimatmålen om nettonollutsläpp år 2045 behöver vi därför ställa om från fossila energikällor genom elektrifiering av alla samhällets sektorer (Naturvårdsverket, 2024). Denna utveckling, i kombination med ett ständigt ökande el- och effektbehov, ställer högre krav på elnätets förmåga att hantera en ökad efterfrågan. Samtidigt är utbyggnaden av elnätet både tids- och resurskrävande, vilket medför att delar av elnätet är hårt belastade till följd av begränsad nätkapacitet. Sveriges energisystem står därför inför en period av förnyelse och utveckling i närtid (Vattenfall, u. å.). I denna utveckling spelar smarta energilösningar som kan avlasta nätet en allt viktigare roll (Energimarknadsinspektionen, 2020). På lokal och regional nivå kan detta innebära exempelvis energilagring, solcellsanläggningar och användarflexibilitet. I områden med kapacitetsbrist kan även fjärrvärmeanslutning bidra till att avlasta elnätet genom att ersätta elbaserad uppvärmning. Lokala aktörer visar idag ett stort intresse för dessa typer av lösningar, och flera framgångsrika exempel har redan implementerats i Sverige (Power Circle, u.å.)

En typ av lösning är så kallade energigemenskaper, vilka generellt definieras som sammanslutningar av hushåll, företag eller organisationer som tillsammans producerar, delar, lagrar och använder energi lokalt. Syftet med energigemenskaper är framför allt att minska belastningen på de omgivande el- och värmenäten genom att effektivisera resursanvändningen, och på så sätt även minska ekonomiska kostnader (Sundelöf, 2026). För att möjliggöra en hållbar resursanvändning behöver behovet av energi även minska genom energieffektivisering av både byggnader och energianvändning. Dessutom har systemkomponenters tekniska egenskaper i lokala energisystem stor betydelse för hur effektivt energi används, och därför utvecklas och effektiviseras olika tekniker kontinuerligt (Jansen, 2014).

För att analysera energisystem räcker det inte alltid att studera energiflöden, då det traditionella energibegreppet endast beskriver mängden energi, och inte tar hänsyn till hur användbar denna energimängd faktiskt är. Inom energitekniken har det därför länge betonats vikten av att beräkna den användbara delen av energin, det vill säga den del som kan omsättas till praktiskt arbete. Denna kvalitetsaspekt av energi benämns inom termodynamiken som *exergi* och används ofta för att avgöra om rätt energiform används till rätt typ av energibehov. Ett resurssnålt värmesystem är ett system som inte använder energikällor med högre exergiinnehåll än vad som krävs för det aktuella behovet (Wall, 1992). Vid utformning av energigemenskaper är det därför viktigt att beakta exergin, eftersom detta perspektiv kan synliggöra fall där energi används på ett mindre

resurseffektivt sätt än nödvändigt. Detta perspektiv är därför kritiskt för att möjliggöra termodynamiskt resurseffektiva lokala energisystem (Åberg, 2024).

Trots vikten av exergiperspektivet i utformningen av energigemenskaper finns det begränsad forskning kring detta. Mer specifikt saknas forskning som studerar matchningen mellan energitillförsel och energianvändning i lokala energisystem med hänsyn till energins kvalitet (Åberg, 2024). Detta belyses även i internationella forskningsinsatser som betonar att exergianalyser av den byggda miljön är nödvändiga för att synliggöra termodynamiska förluster i lokala energisystem (Jansen, 2014). Mot bakgrund av detta finns en relevans i att utföra studier som undersöker hur olika tekniska systemlösningar i energigemenskaper påverkar systemets exergiprestanda.

1.1 Syfte och frågeställningar

Syftet med detta examensarbete är att analysera prestandan hos en energigemenskap av byggnader i ett fjärrvärmesystem utifrån ett exergiperspektiv. Den studerade energigemenskapen består av enfamiljshus, flerfamiljshus, en kontorsbyggnad, en vårdcentral samt en förskola. Med utgångspunkt i energidata för denna energigemenskap jämförs ett antal tekniska lösningar för lokal energitillförsel och energilagring, med fokus på energigemenskapens självförsörjandegrad, självkonsumtion och exergiverkningsgrad. Arbetet ämnar identifiera systemeffekter av olika tekniska lösningar, samt att skapa förståelse för hur exergiperspektivet påverkar bedömningen av energigemenskapers prestanda i jämförelse med traditionella energimått. På så sätt kan arbetet bidra med insikter om hur utformningen av energigemenskaper kan göras på ett sätt som stödjer ett långsiktigt hållbart och resurseffektivt energisystem.

För att uppfylla studiens syfte undersöks följande frågeställningar:

- Hur påverkar olika tekniska utformningar för lokal energitillförsel och energilagring en energigemenskaps självförsörjandegrad, självkonsumtion och exergiverkningsgrad?
- I vilken utsträckning kan energimässigt oberoende mot omgivande nät kombineras med lokal exergieffektivitet i de olika scenarierna?

1.2 Avgränsningar

Arbetet avgränsas till analys av en lokal energigemenskap kopplad till ett fjärrvärmesystem, baserad på befintliga energidata och ett antal definierade tekniska scenarier. Analysen genomförs på systemnivå med fokus på energiflöden, självförsörjningsgrad, självkonsumtion och exergiprestanda för hela energigemenskapen. Studien avgränsas därmed från en fullständig analys av det regionala eller nationella energisystemet och fokuserar i stället på energigemenskapens lokala energibalans,

resurseffektivitet och energiutbyte med det omgivande energisystemet genom import och export av energi.

Vidare omfattar arbetet inte ekonomiska, sociala eller policyrelaterade analyser. Detaljerad dimensionering eller teknisk optimering av enskilda energisystemkomponenter inkluderas inte heller. Exergianalysen används främst som ett jämförande utvärderingsmetod snarare än för termodynamisk optimering av de tekniska lösningarna.

2. Bakgrund

I detta avsnitt presenteras en bakgrund och kontext till arbetet. Inledningsvis beskrivs de centrala utmaningar som Sveriges lokala energisystem står inför samt hur el- och värmesystem interagerar med varandra. Vidare beskrivs energigemenskaper och hur de kan bidra till att lösa flera av energisystemets utmaningar, samt vilka teknologier som är centrala för detta. Slutligen lyfts exergiperspektivet.

För att nå Sveriges klimatmål om nettonollutsläpp år 2045 behöver Sverige ställa om från fossila energikällor till elektrifiering inom alla delar av samhället (Naturvårdsverket, 2024). Det ställs därför ökade krav på elnätets kapacitet samtidigt som det tar lång tid att utveckla, vilket gör det hårt ansträngt på vissa håll. Sveriges energisystem står därför inför en period av förnyelse och utveckling i närtid (Vattenfall, u.å.). Här kommer smarta lösningar som avlastar elnätet att spela en viktig roll (Energimarknadsinspektionen, 2024).

2.1 Energisystemet

2.1.1 Elnätet - Elektrifiering, effektbehov och nätkapacitet

Det ökande elbehovet till följd av elektrifiering leder till att det idag finns begränsningar av kapaciteten i elnätet på vissa håll i landet (Vattenfall, u.å.). En av utmaningarna idag är bristen på eleffekt, alltså att för stor mängd el (kW) används vid ett visst tillfälle, exempelvis när många elektriska komponenter används samtidigt i ett lokalt nät. En ytterligare typ av elbrist som är en stor utmaning idag är kapacitetsbristen, vilken handlar om att kapaciteten i elnäten inte alltid räcker till för att överföra tillräcklig mängd el från produktion till användning när behov finns (Stockholm Exergi, u.å.). Att enbart fokusera på utbyggnad av elnätet räcker inte för att lösa kapacitetsbristen i närtid, eftersom utbyggnaden tar lång tid. Detta gör att det krävs andra åtgärder för att möta den ökade efterfrågan av energi. Därför spelar smarta energilösningar som avlastar nätet en allt viktigare roll. De utmaningar som uppstår kring kapacitetsbristen aktualiserar även behovet av en mer flexibel, rationell användning av vårt elnät (Energimarknadsinspektionen, 2020).

En ytterligare aspekt i utmaningen att möta den ökade efterfrågan av el är den snabbt ökande andelen förnybar elproduktion från sol- och vindkraft. Elproduktionen i Sverige baseras idag till stor del av fossilfria energikällor som vattenkraft, vindkraft och kärnkraft. I takt med elektrifieringen behöver Sverige producera mer förnybar el för att möta en ökande efterfrågan (Naturvårdsverket, 2024). Den intermittenta karaktären hos vind- och solenergi gör dem mindre planerbara än andra energikällor. Detta ökar ytterligare risken för effektbrist under de tidpunkter då produktionen inte matchar elbehovet, inte minst under vinterhalvåret. Vid dessa tillfällen är Sverige idag beroende av import av el (Stockholm Exergi, u.å.) De långa ledtiderna för nätutbyggnad fördröjer dessutom anslutningen av ny produktion, vilket inte bara hämnar nätkapaciteten utan även samhällstillväxten och laddinfrastrukturen (Vattenfall, u.å.).

Då elnätutbyggnad är tidskrävande krävs en smartare styrning för att jämna ut elanvändningen och minska bristen på nätkapacitet. Här blir förbrukningsflexibilitet avgörande, där hushåll, fordon, industrier och andra verksamheter kan bidra till elsystemets stabilitet. På lokal och regional nivå kan detta göras genom smarta energisystemlösningar som energilagring, storskaliga solcellsanläggningar och användarflexibilitet ur ett fastighetsägarperspektiv. I områden med kapacitetsbrist kan dessutom fjärrvärmeanslutning effektivt avlasta elnätet genom att ersätta elbaserad uppvärmning. Detta kan även kombineras med återvinning av spillvärme från till exempel datacenter, vätgasproduktion eller frysanläggningar. Lokala aktörer visar idag ett stort intresse för dessa typer av lösningar, och flera framgångsrika exempel har redan implementerats i Sverige (Power Circle, u.å.).

2.1.2 Fjärrvärmenätet - beskrivning och utmaningar

Utöver elnätet finns också Sveriges fjärrvärmesystem, som spelar en viktig roll för uppvärmningen av våra byggnader. Fjärrvärme fungerar som ett stort gemensamt värmesystem för en stad eller ett samhälle, där varmvatten produceras centralt och distribueras i rör under marken till byggnader som bostäder, industrier och kontor. Denna värme kan produceras från många olika källor, men mest förekommande är förbränning av avfall och biobränslen, spillvärme från industrier eller värmepumpar som tar vara på energi ur vatten och luft. Inne i byggnaderna kan radiatorer, element eller golvvärme användas för att försörja värme till inomhusmiljön. I vattenburna system pumpar en cirkulationspump runt det uppvärmda vattnet som kyls av i byggnadens värmesystem (Vattenfall, 2024). När det varma vattnet har avgivit värme i fastigheterna leds det genom returledningarna tillbaka till produktionsanläggningarna för att återigen värmas upp och cirkuleras i systemet igen. Detta är ett effektivt sätt att utnyttja lågtempererade resurser, där värmeproduktionen sker centralt i ett samhälle (Region Stockholm, 2025).

Det finns idag utmaningar för fjärrvärmen gällande bränsletillgången. Bränslet består huvudsakligen av biobränslen och avfall, vilket till stor del är positivt ur miljösynpunkt, även om plasten i avfallet ger upphov till koldioxidutsläpp vid förbränning. För att nå EU:s utsläppsmål behöver dessa utsläpp minska, vilket ställer krav på ökad

plaståtervinning och utsläppsminskande tekniker inom fjärrvärmesektorn. Samtidigt försvåras denna utmaning av den ökade konkurrensen om biobränsle, till följd av en förhöjd efterfrågan i samband med utfasningen av fossila bränslen. Som följd har kostnaderna ökat för biobränslet och därmed även för fjärrvärme. Kostnaderna har ytterligare höjts i vissa fall till följd av ökade investeringar i anläggningar och nät (Region Stockholm, 2025). Vidare har det under de senaste åren skett en ytterligare prisökning som följd av kriget i Ukraina och den följande energikrisen i Europa. Även om denna prisökning främst berört fossila bränslen, har marknaderna för biobränslen också påverkats. Priserna för biobränslen ökade under år 2022, och nådde rekordnivåer år 2023 (Olsson och Hansson, 2024). Parallellt med de förändrade priserna måste fjärrvärmerna dessutom anpassa sig till en lägre värmeanvändning till följd av storskalig energieffektivisering i byggnader (Persson och Larsson, 2009). Högre priser för fjärrvärme gör att konkurrensen mot alternativa uppvärmningssätt ökar (Region Stockholm, 2025). Det främsta konkurrerande uppvärmningssättet mot kraftvärmerna är berg- och luftvärmepumpar (Region Stockholm, 2025).

Framtidens fjärrvärme kan ha minskade koldioxidutsläpp och ökad flexibilitet. Koldioxidinfångning från fjärrvärmeproduktion kan bli aktuellt för att minska utsläppen av koldioxid i förbränningen i värmeproduktionen. Fjärrvärme har dessutom potential att spela en större roll på elmarknaden genom att vara en del av flexibilitetstjänster, till exempel genom anpassad produktion efter behov i elnätet. Detta kan bli viktigt i ett elsystem med mycket väderberoende kraft (Region Stockholm, 2025).

2.2 Samverkan mellan el- och fjärrvärmennätet

Det finns en tydlig samverkan mellan elnätet och fjärrvärmesystemet. Uppvärmning av byggnader i dagens samhälle sker främst med fjärrvärme och el, och även i viss mån användning av förbränning av biobränslen i småhus. När värmebehovet täcks av fjärrvärme minskar belastningen på elnätet eftersom värmen ofta annars tillförs från elnätet och omvandlas till värme med eldrivna värmepumpar. Fjärrvärmens påtagliga avlastande effekt på elnätet sker främst när uppvärmningsbehoven är som högst vintertid. Om eldrivna värmepumpar i stället används, vilket är det vanligaste alternativet som ersättning för fjärrvärmerna, ökar belastningen på elnätet. Detta innebär att ett bortfall av fjärrvärmerna för uppvärmning skulle kräva omfattande elnätsutbyggnad och ny elproduktion, vilket kan resultera i inbromsning av andra satsningar som bostadsbygganden och näringslivsutveckling (Region Stockholm, 2025).

I samverkan mellan el- och fjärrvärmesystem blir kraftvärmeverket en central komponent. Kraftvärmeverket bidrar med ytterligare nyttor till elnätet, då den producerar både el och värme samtidigt. Om kraftvärme används för uppvärmning av fjärrvärme genereras samtidigt el som kan användas för att tillgodose lokala behov, vilket ytterligare minskar belastningen på elnätet. Kraftvärmens produktion är dessutom planerbar, vilket gör den relevant när utbud och efterfrågan balanseras i elsystemet när andelen sol och vindkraft ökar (Stockholm Exergi, u.å.). En av Energimyndighetens framtidsprognoser

indikerar dock en minskad användning av kraftvärme till följd av EU-målen att fasa ut fossila bränslen, som driver upp kostnaderna för biomassaråvaror. Detta gör att även svensk kraftvärme står inför utmaningar under de närmsta decennierna. En tänkbar framtidsutveckling är att kompensera för den minskade tillgången till biobränslen genom att integrera små modulära reaktorer (SMR) för uppvärmningen (Energimyndigheten, 2025).

2.3 Energigemenskaper

2.3.1 Definition och dagsläge

Som en del av lösningen på de kapacitetsutmaningar som el- och värmesystemet idag står inför finns så kallade energigemenskaper. Juridiskt sett saknas en bestämd definition, men generellt definieras en energigemenskap som: *En sammanslutning av hushåll, företag eller organisationer som tillsammans producerar, delar, lagrar och använder energi lokalt*. Syftet med energigemenskaper är att bland annat minska belastningen på det omgivande el- och värmenätet och på så sätt även spara in på resurser och ekonomiska utgifter (Sundelöf, 2026). När el produceras och förbrukas inom en energigemenskap i stället för att importeras, minskar belastningen på det överliggande nätet. Dessutom kan effekttoppar kapas genom gemensam styrning och exempelvis batterilager, vilket gör elnätet mer stabilt. Elnätsbolag kan i vissa fall även köpa lokal flexibilitet från gemenskapen för att minska behovet av kostsamma nätutbyggnader (Morén et al., 2025).

Energigemenskaper kan bli en viktig del av att skapa ett hållbart och robust energisystem där fler aktörer både bidrar till och drar nytta av teknikutvecklingen. Energigemenskaper möjliggör således både lokal utveckling och ett starkare energisystem. På så sätt kan de bidra till en ökad acceptans för förnybar energi, och gör det även lättare att locka privata investeringar till den gröna omställningen. Detta kan vara ett effektivt sätt att driva klimatomställningen, där lokalbefolkningar direkt gynnas genom energieffektivisering, lägre kostnader och mer lokala gröna jobbopportuniteter (Europeiska kommissionen, u.å.). Dessutom stärks beredskapsförmågan i lokalsamhällen genom ett minskat beroende av det externa nätet och därmed minskad sårbarhet för externa störningar. Energimyndigheten vill därför främja bildandet av energigemenskaper i Sverige och satsar på forskning kring utmaningar och nyttor hos dessa system (Sundelöf, 2026).

Genom energigemenskapers möjliga bidrag till att uppnå ett mer säkert, prisvärt och rent energisystem i Europa har EU haft målet att det måste finnas minst en energigemenskap per kommun med över 10 000 invånare vid år 2025. I november 2025 rapporterades det finnas mer än 8000 energigemenskaper inom EU. Under EU-lagstiftningen kan en energigemenskap anta vilken juridisk form som helst, såsom en förening, ett kooperativ, ett partnerskap, en ideell organisation eller ett aktiebolag (Europeiska kommissionen, u.å.).

Ett exempel på en energigemenskap som implementerats lokalt i Uppsala kommun är fastigheten Dansmästaren, där nya lösningar för energidelning testas. Fastigheten

Dansmästaren är ett så kallat mobilitetshus med flera parallella funktioner. Byggnaden rymmer bostäder, parkeringshus och en matbutik. På taket finns en solcellspark installerad och i källaren finns ett batterilager som kan lagra energi som solcellerna producerar. Batterilagrets främsta uppgift är att kapa effekttoppar och ska i framtiden kunna återvinna spillvärme från kylar och frysar i byggnadens matbutik. Vid tider av kris skulle Dansmästaren i ö-drift kunna driva matbutikens frysar, eventuellt ladda elfordon samt vara en samlingsplats för belysning och mobilladdning. Det är alltså inte bara gynnsamt utifrån ett ekonomiskt perspektiv utifrån den ökade självständigheten gentemot elnätet, utan även en viktig fråga i tid av kris (Borglund, 2024). Dansmästaren illustrerar ett system där el från solceller och batterier kommer att kunna integreras med termisk energi från värmeåtervinning.

2.3.2 Tekniska lösningar i energigemenskaper

Energigemenskaper omfattar flera olika tekniklösningar som samverkar för att öka systemets energieffektivitet och oberoende av omgivningen. I den byggda miljön består energisystem av användarbehov, energikällor och energisystemkomponenterna däremellan (Jansen, 2014). Mer specifikt kan en byggnads energibehov beskrivas som den energi som vid normalt brukande behöver levereras för uppvärmning, komfortkyla, tappvarmvatten och fastighetsel. Detta sammanfattas ofta som köpt energi (Levin, 2010). Systemkomponenterna antas vidare vara teknikerna som behövs för att leverera denna energi i rätt form vid rätt tidpunkt, vilket inkluderar energiomvandling, lagring, distribution och värmeavgivning. Till följd av förluster inom systemkomponenterna är den totala efterfrågan på energi till ett system alltid högre än det faktiska användarbehovet. För att möjliggöra en hållbar resursanvändning kan vi minska användarbehovet genom att effektivisera byggnader och dess energianvändning, minska det totala energibehovet genom smartare och mer energieffektiva systemkomponenter samt öka möjligheten till att använda rätt miljöresurser och minska spillvärme. Systemkomponenternas tekniska egenskaper är även viktiga för hur effektivt energi används i en energigemenskap (Jansen, 2014).

Några relevanta komponenter inom energigemenskaper är solceller, värmepumpar, kraftvärmeverk, värmelager och batterier. Nedan följer en överblick av funktionen hos dessa komponenter.

- **Solceller** omvandlar solenergi till el, till skillnad från solfångare som omvandlar solenergin till värme. Solceller kännetecknas av låga driftkostnader och ger möjligheten att sälja överskottsel till det externa nätet. De producerar mest effekt under perioder då uppvärmningsbehovet är lågt, vilket är dagtid när solen skiner, särskilt sommartid (Vattenfall, 2024).
- **Värmepumpar** tar värmeenergi från lågtempererade källor i omgivningen (luft, vatten, jord eller berggrund) och avger värme vid högre temperaturer för uppvärmning av byggnader. Värmepumpen drivs generellt med el och är effektiv på det sättet att den levererar flera gånger så mycket värmeenergi som den elenergi den förbrukar (Vattenfall, 2024).

- **Kraftvärmeverk** (Combined Heat and Power, CHP) producerar el och värme samtidigt genom att förbränna ett bränsle och producera ånga som driver en turbin kopplad till en generator. Den kvarvarande restvärmen i ångan återvinns sedan för att värma upp vatten till fjärrvärmesystemet (Region Stockholm, 2025). Den kombinerade produktionen ger en hög total verkningsgrad, upp till 93 procent (Rydegran, 2021). Systemet kan dessutom integreras med extern spillvärme från exempelvis industrier eller datacenter för att höja effektiviteten. Kraftvärmen är planerbar, styrbar och kan användas för att avlasta elnätet genom att hantera effekttoppar. Den har bränsleflexibilitet och kan vid rätt förutsättningar användas för så kallad ö-drift. Detta innebär att kraftvärmeverket potentiellt skulle kunna försörja kritiska samhällsfunktioner (som vård och vattenförsörjning) med både el och värme, även om det nationella elnätet drabbas av avbrott (Region Stockholm, 2025).
- **Termiska energilager** (Thermal Energy Storage, TES) fungerar som en buffert mellan tillgång (produktion) och efterfrågan (användarbehov) av värmeenergi. Termiska lager är en nyckelkomponent för att inkludera mer förnybara, intermittenta energikällor samt för att utnyttja industriell spillvärme. Termiska energilager finns i flera olika typer, men gemensamt är att alla kan förbättra energisystemets övergripande effektivitet, flexibilitet och tillförlitlighet genom att jämna ut belastningstoppar i nätet (Samoteeva, 2022).

2.4 Exergiperspektivet

Under utvecklingen av energigemenskaper idag, som sker parallellt med elektrifiering av samhället, finns en risk för ett ensidigt fokus på elbaserade energigemenskaper. Då el används i allt högre utsträckning finns en risk att el används för behov som egentligen hade kunnat täckas av fjärrvärme, exempelvis för att bereda varmvatten. Detta innebär att så kallad högvärdig energi, el, används för att försörja lågvärdiga energibehov såsom rumsuppvärmning. Högvärdig energi innebär energibärare med hög potential att utföra arbete, medan lågvärdig energi refererar till energibärare som inte i samma utsträckning omvandlas till nyttigt arbete. Graden av arbetspotential benämns ofta som energins kvalitet. Denna kvalitetsaspekt, som inom termodynamiken kallas *exergi*, är avgörande för att avgöra om rätt energiform används till rätt behov (Åberg, 2024). Ett resurssnålt värmesystem är ett system som inte använder sig av energikällor med högre exergiinnehåll än nödvändigt (Wall, 1992). Vid utformning av energigemenskaper är det därför viktigt att beakta denna aspekt, för att synliggöra fall där elektrifieringen tränger undan lösningar som effektivt utnyttjar lågvärdig energi till motsvarande lågvärdiga energibehov. Detta är viktigt för att möjliggöra ökad resurseffektivitet där hänsyn även tas till energins kvalitet och inte bara kvantitet (Åberg, 2024). Begreppet exergi definieras vidare i kapitel 3, som del av det teoretiska ramverket för denna studie.

Trots vikten av exergiperspektivet finns det fortfarande begränsad forskning som analyserar matchningen mellan energitillförsel och energianvändning i lokala

energisystemlösningar, med hänsyn till just energins kvalitet. Denna aspekt är dock viktig för optimering av energigemenskaper och deras resurseffektivitet (Åberg, 2024). Detta går linje med internationella forskningsinsatser som betonar att en exergianalys av den byggda miljön är nödvändig för att synliggöra de termodynamiska förlusterna i lokala energisystem (Jansen, 2014).

3. Teori

I detta avsnitt presenteras den teori som ligger till grund för analysen. Inledningsvis definieras exergibegreppet och fenomenet exergiförstöring. Därefter beskrivs exergins omgivningsberoende och den termodynamiska referensmiljön. Vidare förklaras exergiberäkningar i fjärrvärmenät samt varför exergiförstöring sker i ett antal vanligt förekommande tekniska komponenter. Slutligen definieras nyckeltalen självförsörjandegrad, självkonsumtion och exergiverkningsgrad.

3.1 Exergi – energins kvalitet

För att analysera energisystem räcker det inte alltid att enbart studera energimängd, eftersom energiomvandlingar alltid medför försämrade energikvalitet enligt termodynamikens andra lag. Därför har det inom energitekniken länge framförts vikten av att även beräkna den användbara delen av energi, med andra ord den del som kan uträtta mekaniskt arbete (Wall, 1992). Det är en fundamental naturlag (termodynamikens första huvudsats) att energi inte kan skapas eller förstöras, utan endast omvandlas mellan olika former. Vid dessa omvandlingar ökar entropin, det vill säga oordningen i systemet, vilket medför att energins förmåga att utföra arbete minskar (Nationalencyklopedin, u.å. a). Termodynamikens andra lag säger att entropin, oordningen i systemet, alltid ökar i naturliga, spontana processer där energin har en bestämd riktning (Nationalencyklopedin, u.å. b).

För att beskriva och kvantifiera energikvalitet används begreppet exergi, vilket förenklat definieras som den maximala mängd arbete som kan utvinnas ur ett system i relation till dess omgivning (Nationalencyklopedin, u.å. a). Exergibegreppet används därmed för att analysera hur stor del av energin som är användbar för arbete och hur mycket som förloras genom irreversibla processer (Wall, 1992). Mer specifikt definieras exergi som *en mängd mekaniskt arbete som maximalt (dvs. i en ideal process) kan utvinnas ur ett system då det får gå till termodynamisk jämvikt (internt eller med en viss konstant omgivning)*. Exergi mäts liksom energi i Joule (J) (Nationalencyklopedin, u.å. a).

3.1.1 Irreversibilitet och exergiförstöring

Verkliga energiomvandlingar sker alltid med någon form av kvalitetsförlust, eftersom alla verkliga processer är irreversibla. Till skillnad från reversibla processer som endast sker i teorin och utan förluster, har irreversibla processer en bestämd riktning och medför alltid

entropiökning enligt termodynamikens andra huvudsats (Wall, 1992). I praktiken innebär detta att energins förmåga att utföra arbete successivt försämras under energiomvandlingar, alltså minskar exergin. Medan energi enligt termodynamikens första huvudsats inte kan förstöras, förstörs exergi alltid i irreversibla processer genom att energikvaliteten minskar (Rosen, 2004). Exergi kan därför användas för att identifiera var ineffektivitet uppstår i energisystem i form av kvalitetsförluster, och för att jämföra olika energiomvandlingsprocessers termodynamiska prestanda (Wall, 1992).

3.1.2 Exergins beroende av energibärare - exergifaktorn

Exergiinnehållet i en energibärare beror på energins sort och termodynamiska egenskaper. Eftersom olika energiformer som elektrisk energi, potentiell energi och termisk energi, har olika möjligheter att omvandlas helt till arbete, skiljer sig dess exergiinnehåll åt. Denna skillnad kan kvantifieras med hjälp av *exergifaktorn*, vilken anger förhållandet mellan exergi och energi i en specifik energibärare. Exergifaktorn är dimensionslös och antar värden mellan 0 och 1, där högre värden motsvarar en större andel användbar energi. Faktorn kan därmed användas för att beräkna exergimängden i ett givet energiflöde (Wall, 1992). Exergianalyser används ofta i energisystem där flera olika energiformer samverkar, eftersom de möjliggör en bedömning av både energimängd och energikvalitet. För el kan hela energimängden teoretiskt sett omvandlas till arbete, vilket innebär att exergifaktorn för el är 1. Motsvarande antagande görs ofta för kemisk energi i bränslen, där exergifaktorn approximativt sätts till 1 (Jansen, 2014). För värmeenergi är exergiinnehållet däremot temperaturberoende. Ju större temperaturskillnaden är mellan systemet (värmes) och dess omgivning, desto högre är värmens potential att utföra arbete och därmed även dess exergiinnehåll (Nationalencyklopedin, u.å. a). Detta förklaras vidare i nästkommande delavsnitt.

3.2 Exergins omgivningsberoende

En viktig egenskap hos exergi är dess beroende av omgivningen, och särskilt relevant är värmeexergins temperaturberoende. Till skillnad från värmeenergi som är en bevarad storhet definieras exergi alltid relativt en referensomgivning. Detta innebär att samma system kan ha olika exergiinnehåll beroende på omgivningens temperatur eller tryck (Wall, 1992).

Exergins omgivningsberoende kan förklaras så att möjligheten att utföra arbete uppstår ur skillnader mellan ett system och dess omgivning. Enligt termodynamikens andra huvudsats strävar system spontant mot termodynamisk jämvikt, vilket innebär att temperatur- och tryckskillnader successivt utjämnas till en gemensam jämviktsnivå. Det är strävan mot jämvikt som skapar potentialen att utvinna arbete ur ett system. När skillnaden mellan ett system och dess omgivning minskar sjunker därför även systemets potential till arbete, alltså dess exergiinnehåll. Ett system som har samma temperatur och tryck som sin omgivning befinner sig därmed redan i jämvikt och har ingen exergi. För värmeenergi innebär detta resonemang att exergin ökar med ökande temperaturskillnad mellan ett system och dess omgivning. Om systemet och omgivningen

har samma temperatur finns ingen möjlighet att utvinna arbete ur värmeöverföringen, vilket innebär att exergin är noll (Wall, 1992).

Ett illustrativt exempel på en kontrast som skapar potential till arbete är en kall glass i en varm omgivning (Wall, 1992). Eftersom temperaturen skiljer sig mellan glassen och luften sker spontant en värmeöverföring från omgivningen till glassen. Under processen minskar temperaturskillnaden succesivt fram till att termodynamisk jämvikt uppnås. När glassen och omgivningen har samma temperatur finns inte längre någon drivkraft för ytterligare värmeöverföring och därmed ingen kvarvarande potential att utföra arbete. Exergin har då förbrukats genom processen.

3.2.1 Den termodynamiska referensmiljön

Som en konsekvens av exergins omgivningsberoende behöver den termodynamiska referensmiljön definieras tydligt i en exergianalys. Referensmiljön representerar det tillstånd som systemet strävar mot, alltså den omgivande miljö som innebär termodynamisk jämvikt. I analyser av byggd miljö definieras referensomgivningen vanligtvis med en referenstemperatur, betecknad T_0 . För byggnader och energisystem rekommenderas generellt att utetemperaturen ska användas, då den representerar den byggda miljöns verkliga omgivning. I andra typer av system kan också andra storheter, exempelvis tryck eller kemisk sammansättning, vara relevanta vid definition av en referensmiljö (Jansen, 2014).

Vid dynamiska simuleringar varierar referensomgivningen över tid, vilket innebär att även referenstemperaturen behöver vara tidsberoende. Samma referensmiljö behöver samtidigt användas konsekvent för alla delsystem och beräkningar inom exergianalysen, för att de olika resultaten ska vara jämförbara och termodynamiskt korrekta (Jansen, 2014).

Det är relevant att inkludera exergi i jämförelser mellan olika energibärare. Detta då olika energibärare har olika exergimängder. Analys av exergi görs ofta i frågor kring energisystem som omsätter många energiformer, där det är av relevans att inte bara titta på energimängd utan även hur kvaliteten på olika energibärare varierar i systemet. Om direktverkande el används, kan 100% av dess energi användas till exempelvis uppvärmning. Därför är exergin i direktverkande el densamma som dess energi. Från varmvatten som energibärare, exempelvis, kan däremot inte all energi användas till nyttigt arbete, och varmvatten har därmed en lägre exergi än el (Wall, 1992).

3.3 Exergiberäkning i fjärrvärmesystem

Exergin E hos en energimängd Q kan beräknas genom att multiplicera energimängden med dess exergifaktor f_{ex} , som visar andelen exergi i en given energimängd (Jansen, 2014). Det är mycket viktigt att tydligt definiera det undersökta systemet och processen, då detta är avgörande vid beräkning av exergiinnehåll (Wall, 1992).

För värmeenergi är exergiinnehållet direkt kopplat till temperaturskillnaden mellan systemet och omgivningen, eftersom denna temperaturskillnad kan driver omvandlingen av värmeenergi till arbete. Denna process kan beskrivas med Carnot-sambandet

$$E = \frac{T - T_0}{T} Q. \quad (1)$$

I ekvation (1) representerar T värmets temperatur och T_0 omgivningens temperatur. E representerar exergiinnehållet, och Q representerar en energimängd. Temperaturer anges i Kelvin (K) (Wall, 1992).

Enligt ekvation (1) kan endast en del av värmeenergin teoretiskt sett omvandlas till arbete. Denna andel bestäms av temperaturförhållandet mellan systemet och omgivningen. Utifrån omskrivning av sambandet i ekvation (1) kan exergifaktorn $\left(\frac{E}{Q}\right)$ för en energimängd vid konstant temperatur enligt Wall (1992) beräknas som

$$\frac{E}{Q} = \left| \frac{T - T_0}{T} \right|. \quad (2)$$

För begränsade värmemängder eller värmeflöden behöver även temperaturvariationer i flödet beaktas, eftersom temperaturen förändras när värme avges till omgivningen. I ett system med kontinuerliga värmeflöden såsom fjärrvärmesystem, där en del av energin även återförs genom returledning, används en utökad beräkning av exergifaktorn, baserat på ekvation (2). Den utökade formeln tar enligt Wall (1992) hänsyn till både fram- och returledningstemperaturerna samt den logaritmiska (icke-linjära) temperaturförändringen hos flödet enligt

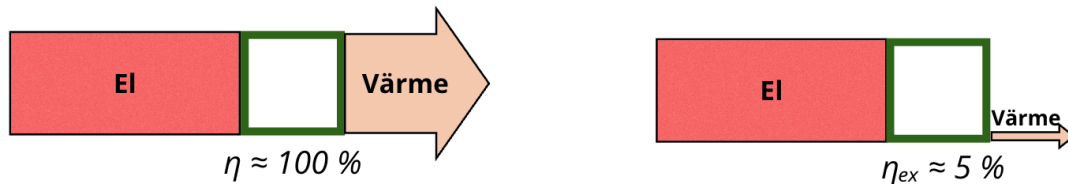
$$f_{ex} = \frac{E}{Q} = 1 - \frac{T_0}{T_{fram} - T_{retur}} \ln \frac{T_{fram}}{T_{retur}}. \quad (3)$$

I ekvation (3) representerar T_{fram} framledningstemperaturen och T_{retur} returtemperaturen. Sambandet visar att exergifaktorn generellt minskar när referenstemperaturen ökar, till följd av att temperaturskillnaden mellan värmeflödet och omgivningen då reduceras. Detta innebär att energins potential att utföra arbete blir lägre vid högre omgivningstemperaturer (Wall, 1992).

3.4 Exergiförluster i energigemenskapens komponenter

I energitekniska komponenter sker förluster av exergi i samband med energiomvandlingar mellan energibärare med olika exergiinnehåll (Wall, 1992). Elbaserad värmeproduktion, till exempel, har energiverkningsgraden 100% då all tillförd el kan användas för att producera värme. Däremot är den motsvarande exergiverkningsgraden låg, då högvärdig energi (el) används för att täcka producera lågvärdig energi (värme). Exergiförlusten i denna typ av teknik uppstår alltså inte i själva energiomvandlingen, utan representerar felmatchningen i energikvalitet mellan tillförseln och produktionen (Wall, 1992). Figur 1 visar en principiell skiss som illustrerar hur exergiverkningsgraden kan skilja sig från energiverkningsgraden för elbaserad värmeproduktion, baserat på förhållandet mellan

tillförseln och produktionen. Den vänstra illustrationen visar energiflödet, medan den högra visar motsvarande exergiflöden. När tillförseln och produktionen är lika stor, som i denna illustration, blir verkningsgraden 100 % då all tillförd energi gett upphov till värmeproduktion. Till höger illustreras däremot den mängden energikvalitet i den tillförda elen samt i den producerade värmen, där den betydligt lägre mängden producerad exergi ger upphov till en låg exergiverkningsgrad.

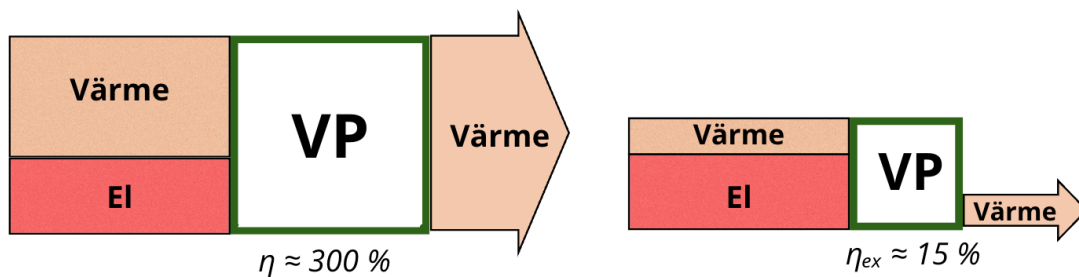


Figur 1. Principiell skiss över hur exergiverkningsgraden kan skilja sig från energiverkningsgraden för elbaserad värmeproduktion. Till vänster illustreras energiflöden, och till höger motsvarande exergiflöden.

3.4.1 Eldriven värmepump

Med eldrivna värmepumpar produceras värme genom att tillföra el och utnyttja så kallad gratisvärme från omgivningen. Ett köldmedium cirkulerar i värmepumpen, och upptar värme från omgivningen för att sedan avge denna värme till det system som ska ta emot den. Värmepumpens prestanda definieras vanligen som Coefficient of Performance (COP), vilket är verkningsgraden mellan tillförd el och producerad värme. Den tillförda gratisvärmen inkluderas inte i COP, vilket ger en hög verkningsgrad, ofta omkring 300% (Jansen, 2014). På grund av oundvikliga exergiförluster presterar dock verkliga värmepumpar endast mellan cirka 40 och 60 procent av vad en ideal förlustfri process skulle göra, då högvärdig energi (el) används för att tillgodose ett lågvärdigt energibehov (värme) (Wall, 1992).

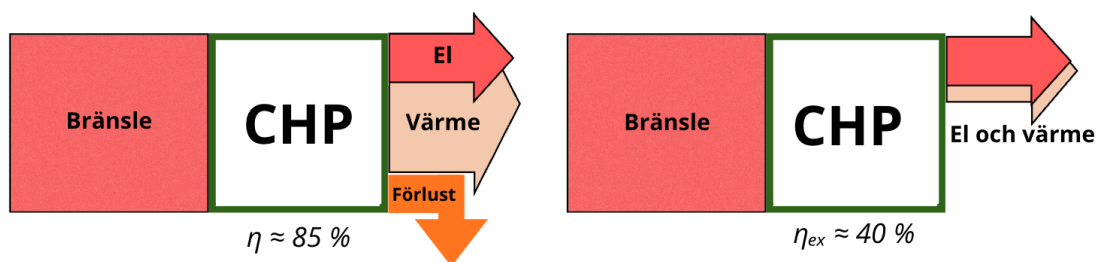
De mest betydande irreversibiliteterna som leder till exergiförlusterna i värmepumpen uppkommer i värmeväxlarna, expansionsventilen och kompressorn. I värmeväxlarna sker de största exergiförlusterna, där värmeöverföringen drivs av en temperaturskillnad mellan omgivningen och köldmediet. Varje gång värme flödar över en sådan temperaturskillnad sker en irreversibel process där exergi förstörs. Det sker även energiförluster i expansionsventilen där en trycksänkning utförs utan arbetsutvinning, samt i kompressorn där friktion och värmeförluster uppstår, vilket även minskar exergin (Jansen, 2014). Figur 2 visar en principskiss av hur exergiverkningsgraden skiljer sig från energiverkningsgraden för en typisk eldriven värmepump. Enligt Wall (1992) är en typisk exergiverkningsgrad för värmepumpen cirka 15 procent, medan energiverkningsgraden är hela 300%.



Figur 2. Principiell skiss över hur exergiverkningsgraden kan skilja sig från energiverkningsgraden för en eldriven värmepump. Till vänster illustreras energiflöden, och till höger illustreras motsvarande exergiflöden.

3.4.2 Kraftvärmeverk

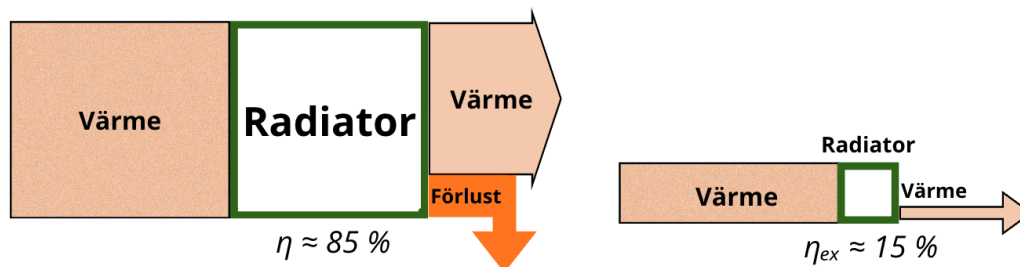
Kraftvärmeverk använder förbränning av ett bränsle för att med värme från processen koka vatten till ånga, och producera värme och el. Generellt sett har kraftvärmeverk en verkningsgrad på omkring 85%. Den största exergiförlusten i ett kraftvärmeverk sker vid omvandlingen av bränsle till värme genom förbränning. Bränsle och el är högvärdig energi, medan värme är lågvärdig energi (Mahian et al., 2020). Skillnaden i energikvalitet är det som driver exergiförlusterna i processen (Wall, 1992). En annan källa till exergiförluster i kraftvärmeverket är i ångpannan, där värmen från förbränningen värmer upp vattnet. Här sker exergiförluster till följd av den temperaturskillnad som driver arbetet med uppvärmningen, vilket är en irreversibel process (Mahian et al., 2020). Samtidigt som det sker kvalitetsförluster omvandlas en del av den högvärdiga energin till el, som också har hög energikvalitet och därmed matchar dessa exergier (Wall, 1992). Normalt blir omkring 30–40 procent av kraftvärmens produktion el och resterande del värme (Rydegran, 2021). Enligt Wall (1992) är exergiverkningsgraden för kraftvärmeverk cirka 40%. Figur 3 visar en principskiss som illustrerar hur exergiverkningsgraden skiljer sig från energiverkningsgraden för elbaserad värmeproduktion.



Figur 3. Principiell skiss över hur exergiverkningsgraden kan skilja sig från energiverkningsgraden för ett typiskt kraftvärmeverk. Till vänster illustreras energiflöden, och till höger visas motsvarande exergiflöden.

3.4.3 Vattenburet radiatorsystem

I vattenburna radiatorsystem cirkulerar varmt vatten i ett rörsystem och genom element, där de avger värme till rummet (Vattenfall, 2024). När värme distribueras från ett fjärrvärmenät till ett radiatorsystem och används i byggnader sker en irreversibel process och därmed en exergiförlust. Exergiförlusterna uppstår till stor del i samband med temperaturminskningen från fjärrvärmenätet till det vattenburna systemet och till rumsluften som har lägre temperatur. Rumsuppvärmningen anses vara ett lågvärdigt energibehov, eftersom temperaturerna är relativt låga, medan temperaturen som tillförs radiatorsystemet från fjärrvärmenätet är betydligt högre och därmed har något högre exergi. Det tillförs alltså mer exergi än vad som faktiskt behövs, vilket skapar energikvalitetsförluster i processen (Wall, 1992). Figur 4 visar en principskiss som exemplifierar hur exergiverkningsgraden kan skilja sig från energiverkningsgraden för ett vattenburet radiatorsystem.



Figur 4. Principiell skiss över hur exergiverkningsgraden kan skilja sig från energiverkningsgraden för ett typiskt kraftvärmeverk. Till vänster illustreras energiflöden, och till höger illustreras motsvarande exergiflöden.

3.4.4 Termiskt lager

Termiska lager lagrar värme på olika sätt beroende på modell, men vanligt är att använda en isolerad vattenfylld tank (Karim et al, 2018). I den vattenfyllda tanken finns ofta två skikt av vatten, ett övre med högre temperatur och ett undre med lägre temperatur. Exergiförlusterna i termiska lager (TES) uppstår av flera irreversibla processer. Den främsta är att vätskan med olika temperaturer, skikten, blandas inom lagret under laddning och urladdning. Detta ger lagret en mer jämn temperatur. När detta sker minskar temperaturskillnaderna inom lagret och därmed exergin, potentialen till arbete. Vidare uppstår förluster även till följd av värmeförluster till omgivningen, vilket som följd minskar exergin i lagret. Dessutom sker även vissa förluster vid in- och urladdning av värmelagret (Rosen, 2001).

3.5 Systemprestanda och nyckeltal

3.5.1 Självförsörjandegrad och självkonsumtion

I konventionella energianalyser används självförsörjandegrad och självkonsumtion som nyckeltal för att beskriva matchningen mellan lokal energiproduktion och lokal energianvändning. En hög matchning anses generellt vara positivt, då detta minskar behovet av extern energitillförsel och reducerar överskott som matas ut till överliggande nät. Dessa nyckeltal används därför ofta för att analysera graden av lokalt oberoende i energisystem (Åberg, 2024).

Självförsörjandegraden beskriver andelen av det totala energibehovet som består av egenproducerad energi och därmed hur väl energigemenskapen kan försörja egna energibehov med lokal produktion (Åberg, 2024). Med utgångspunkt i Åberg (2024) definieras självförsörjandegraden för el och värme enligt

$$SS = \frac{\text{Använd lokalt tillförd energi}}{\text{Lokalt energibehov}}, \quad (4)$$

där *Använd lokalt tillförd energi* syftar till den mängd egenproducerad energi som faktiskt används inom energigemenskapen. Vidare beskriver självkonsumtionen hur stor andel av den egenproducerade energin som används inom energigemenskapen och inte exporteras till externa system. Med utgångspunkt i definitionen i Åberg (2024) uttrycks självkonsumtionen enligt

$$SC = \frac{\text{Använd lokalt tillförd energi}}{\text{Lokalt tillförd energi}}. \quad (5)$$

Vid analys av energigemenskaper är det även av relevans att skilja mellan olika energibärare, exempelvis el och värme, eftersom dessa har olika energikvalitet och därmed olika förmåga att utföra arbete. En jämförelse baserad enbart på total energimängd riskerar därför att förbise viktiga skillnader i energikvalitet (Åberg, 2024).

3.5.2 Exergiverkningsgrad

Exergiverkningsgraden η_{ex} är ett mått på hur effektivt ett system omvandlar tillförd exergi till nyttig exergi, och kan således användas för att beskriva systemets kvalitetsförluster. Begreppet definieras på samma sätt som konventionell energiverkningsgrad, men baseras på energins kvalitet snarare än enbart energimängd (Wall, 1992). Exergiverkningsgraden definieras av Wall (1992) som kvoten mellan exergiutbyte och exergiinsats. I denna rapport benämns dessa storheter *exergibehov* respektive *tillförd exergi* för att tydliggöra deras funktion i systemet, där

$$\eta_{ex} = \frac{\text{exergibehov}}{\text{tillförd exergi}}. \quad (6)$$

Enligt ekvation (6) innebär ett värde på $\eta_{ex} = 1$ att all tillförd exergi har använts hos slutanvändaren, helt utan kvalitetsförluster. Lägre värden indikerar att en andel av exergin har förstörts genom irreversibla processer i systemet (Wall, 1992).

För ett system av byggnader kan *exergibehovet* i ekvation (6) tolkas som det energibehov som finns för att rumsuppvärmning och tappvarmvattenanvändning samt elbehovet, omräknat till motsvarande exergi. Den *tillförda exergin* avser den exergi som tillförs systemet för att täcka detta behov. Detta kan exempelvis bestå av egenproducerad el eller tillförd fjärrvärme, beroende på systemets uppbyggnad (Wall, 1992).

4. Metod

Följande avsnitt beskriver arbetets metod. Inledningsvis beskrivs den tidigare studie och energigemenskap som låg till grund för data som användes. Därefter beskrivs de studerade scenarierna och systemgränsen. Sedan beskrivs tillvägagångssättet för exergiberäkningar, samt för nyckeltal för energi- och exergiprestanda. Slutligen beskrivs hur exergiflöden mellan energigemenskapen och de externa näten beräknades.

4.1 Tillvägagångssätt - överblick

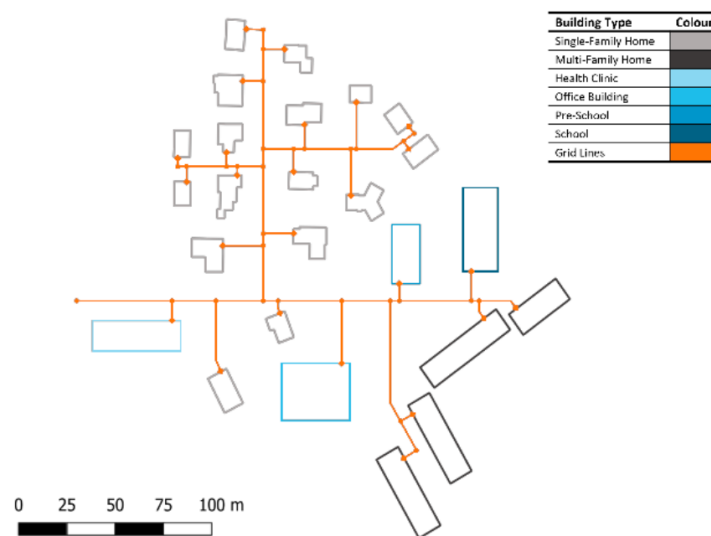
Denna studie är en kvantitativ simuleringsstudie som tillämpar ett exergiperspektiv på Napolitanos (2026) tidigare studie av en energigemenskap. För att undersöka olika energigemenskapslösningar utifrån ett exergiperspektiv användes resultaten från Napolitano (2026) i kombination med relevanta temperaturdata för att beräkna exergiflöden. Dessa data och energiflöden motsvarar timvisa värden under ett referensår. Beräknade exergiflöden samt motsvarande energimängder användes för att beräkna nyckelfaktorerna självförsörjandegrad (SS), självkonsumtion (SC) och exergiverkningsgrad (η_{ex}), såväl som flöden in och ut ur gemenskapen. I studien undersöktes flera tekniklösningar och samma nyckeltal beräknades i varje scenario. Slutligen beräknades även energigemenskapens importerade respektive exporterade exergi i respektive scenario. Alla beräkningar gjordes i programmet Matlab.

4.2 Systembeskrivning och data

Som grund för de exergiberäkningar som utfördes i denna studie användes energidata och energiprofiler från en tidigare studie av samma energigemenskap, av Napolitano (2026). Data simulerades fram av Napolitano (2026) med en virtuell testbädd, som är en vidareutvecklad version av en modell som i grunden skapades av Johari et al. (2023) med hjälp av Urban Energy Building Modelling (UEBM). Åberg (2024) tillämpade denna modell för att skapa en energigemenskap av bostadshus med totalt 73 hushåll, varav 17 enfamiljshus och 4 flerfamiljshus. Napolitano (2026) utökade denna energigemenskap med en kontorsbyggnad, en förskola och en vårdcentral, se figur 5. De tre ytterligare

byggnaderna inkluderas för att öka variationen av lastprofiler i energigemenskapen. Napolitano (2026) undersökte sedan ett antal tekniska systemlösningar och dess påverkan på energimässigt oberoende externa nät. Resultaten från dessa simuleringar, i form av timvisa data över ett år, användes i exergiberäkningarna i denna studie.

Energigemenskapen som undersöktes består av bostäder, en kontorsbyggnad, en vårdcentral och en förskola. I hälften av de undersökta scenarierna försörjs energigemenskapernas byggnader av ett konventionellt fjärrvärmesystem, medan resterande scenarier utgick från att alla byggnader var sammankopplade via ett gemensamt lokalt fjärrvärmenät. Uppvärmningen sker i samtliga fall med ett vattenburet radiatorsystem. Energigemenskapen och byggnaderna är baserade på data från Uppsala.



Figur 5. Illustration av energigemenskapen, dess byggnadstyper samt det gemensamma värmesystemet (Napolitano, 2026).

De indata som användes i Napolitanos (2026) simuleringar var lastprofiler för tappvarmvattenanvändning, rumsuppvärmning, elanvändning, elproduktion från solceller, nätdata samt utetemperaturer. Bostädernas el- och värmebehov samt solelproduktion var standarddata från simuleringar av UEBM. Gällande vårdcentralen, förskolan och kontoret representerades motsvarande parametrar av uppmätta data för värme- och elanvändning i verkliga byggnader av respektive typ.

Därutöver använde Napolitano (2026) även ett antal tekniska specifikationer beroende på scenario, för komponenter som värmepump och värmelager. Napolitano (2026) kombinerade energilasterna till centrala behov för energigemenskapen, såsom central ellast och total fjärrvärmelast mot nätet. Därefter simulerade Napolitano (2026) lasten mot den externa energinfrastrukturen, alltså det fjärrvärme- och elnät som gemenskapen är sammankopplad med. Resultat i form av energidata presenterades för bland annat total import respektive export till och från det externa nätet, och även energiprofiler kopplade till olika komponenter i energigemenskapen, såväl som nyckeltalen självförsörjning och självkonsumtion.

4.3 Data

Denna studie baserades på Napolitanos (2026) inputdata samt de resulterande data som simulerades för varje scenario. All denna data är timvis data, över ett referensår. Den timvis data (kWh) som användes för varje scenario var följande:

- Utetemperaturdata
- Grundläggande el- och värmebehov (hushållsel, tappvarmvatten samt rumsuppvärmning)
- Distributionsförluster i det lokala fjärrvärmenätet
- Elbehov för värmepumpens drift
- Import av el och fjärrvärme från nätet
- Export av el och fjärrvärme till nätet
- Egenproducerad el (solceller, kraftvärmeverk)
- Egenproducerad värme (värmepump, kraftvärmeverk)
- Data över fjärrvärmenätets fram- och returledningstemperaturer (där data för det externa nätet var från år 2024)
- Lagerstatus samt in- och urladdning av lokalt värmelager

4.4 Studerade scenarier

En överblick av de scenarier som undersöktes i denna studie med dess ingående tekniska komponenter presenteras i tabell 1. Respektive scenario beskrivs mer ingående i följande underavsnitt (4.4.1–4.4.4).

Tabell 1. Studerade scenarier. De ingående komponenterna i varje scenario är markerade med kryss (Fjv = konventionell fjärrvärme, PV = Solceller, HDR = energieffektivisering, VP = värmepump, CHP = kraftvärmeverk, TES = värmelager).

Scenario	Fjv	PV	HDR	VP	CHP	TES
0 – Referens	X					
1 – Solceller	X	X				
2 – Värmepump		X	X	X		
3 – Kraftvärme och värmelager		X	X		X	X

4.4.1 Referensscenario – Konventionell fjärrvärme (Fjv)

Referensscenariot innebär att värmeförsörjning sker via stadens fjärrvärmesystem medan elförsörjning sker via det regionala elnätet. Scenariot inkluderar inte lokala tekniska lösningar för produktion och lagring av energi. Gemenskapen tillgodoser därför sina värme- och elbehov helt genom import av fjärrvärme och el från externa system.

4.4.2 Scenario 1 – Solceller (PV)

Scenario 1 innebär att gemenskapen använder konventionell fjärrvärme och importerar denna på samma sätt som i referensscenariot, men har även decentraliserade solceller vid alla bostadshus. De decentraliserade solcellerna producerar el som används för att tillgodose gemenskapens timvisa elbehov, och på så sätt minskar importbehovet från det externa elnätet. De timmar då produktionen av solel är högre än efterfrågan exporteras solel till det externa nätet.

4.4.3 Scenario 2 - Värmepump (VP)

Scenario 2 innebär att det utöver solelproduktion finns en central värmepump som drivs av el. Värmepumpens värmeproduktion anpassas efter energigemenskapens centrala värmebehov varje timme, så länge värmebehovet ligger under värmepumpens maximala kapacitet. Värmepumpen är dimensionerad för att maximalt leverera 70% av den maximala värmelasten, och ytterligare värmebehov tillgodoses av importerad fjärrvärme från det externa nätet. Värmepumpen antas producera värme med samma temperatur som krävs för att försörja det lokala värmenätet. Om överskott av solel finns efter att byggnadernas timvisa elbehov tillgodosetts, kan detta överskott användas för att försörja värmepumpens timvisa elbehov.

Utöver värmepumpen och solelproduktionen har det i detta scenario även gjorts en energieffektivisering av byggnaderna som minskat det grundläggande värmebehovet med 40% (HDR, Heat Demand Reduction).

4.4.4 Scenario 3 - Kraftvärme och värmelager (CHP + TES)

Scenario 3 innebär att det likt Scenario 2 finns decentraliserad solelproduktion och en 40% minskning av uppvärmningsbehovet. Utöver detta finns i stället för en värmepump ett lokalt kraftvärmeverk i kombination med ett lokalt värmelager. Kraftvärmeverket drivs av biobränsle och producerar el och värme. Mängden energi i biobränslet som behöver tillföras för att driva kraftvärmeverket beräknas utifrån kraftvärmeverkets verkningsgrad (se tabell 2, avsnitt 4.4.5). Kraftvärmeproduktionen antas styras av elbehovet timvis, efter bidraget från solel. Detta innebär att kraftvärmeverkets produktion styrs av byggnadernas elbehov och att värmeproduktionen anpassas efter detta. Kraftvärmearnäggningen antas producera cirka tre gånger så mycket värme som el timvis. Den överskottsvärme som produceras vissa timmar lagras i värmelagret så länge lagringskapaciteten tillåter detta. Den värme som lagras i värmelagret kan nyttjas under

timmar då gemenskapens värmebehov överstiger kraftvärmeproduktionen. Den överskottsvärme som produceras i CHP och som inte kan lagras i värmelagret exporteras till det externa fjärrvärmenätet. Kraftvärmeverket antas producera värme med samma temperatur som det lokala fjärrvärmenätet.

4.4.5 Komponenternas tekniska specifikationer

En sammanställning av de tekniska specifikationerna som definierades av Napolitano (2026) för de ingående komponenterna presenteras i tabell 2.

Tabell 2. Sammanställning av värden på tekniska parametrar för de komponenter som ingår i energigemenskapen.

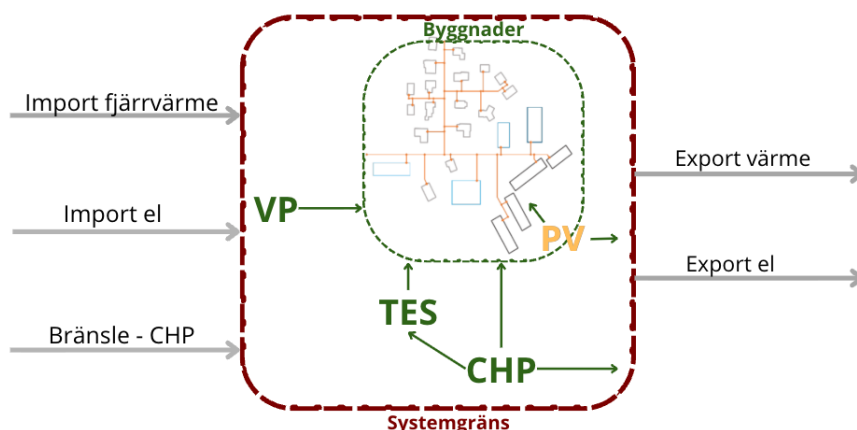
Komponent	Parameter	Värde
Byggnader	HDR (Heat Demand Reduction)	40%
Värmepump	COP	3.0
	Dimensionerad maxlast	70%
Kraftvärmeverk	Typ av kraftvärmeverk	Biogas, mikroturbin
	El-produktionskapacitet	180 kW
	El-värme-förhållande	0.3
	Verkningsgrad	85 %
	Elstyrd / Värmestyrd	Elstyrd
Värmelager	Lagringskapacitet	1.5 MWh
	Timvis effektivitet (laddning urladdning lagring)	1 1 0.99
	Initial lagerstatus	0 %
	Maxlast (laddning urladdning)	300 kW 300 kW

4.5 Systemgräns

Systemgränsen för energigemenskapen i denna studie definieras som allt som ryms *inom* energigemenskapen, vilket inkluderar alla byggnader, det lokala fjärrvärmenätet samt

centrala och decentrala komponenter vilka varierar beroende på scenario. Energiflöden mellan byggnader inom det lokala nätet eller mellan komponenter i systemet betraktades därmed inte som tillförd eller bortförd energi i systembalansen. Det externa fjärrvärme- och elnätet ansågs inte vara inom systemgränsen för gemenskapen. Energiflöden som passerar systemgränsen utgjordes framför allt av import och export av el och fjärrvärme mellan energigemenskapen och det externa nätet. Även tillförd el från solceller och tillförd bränsle för att driva kraftvärmeverket definierades som tillförd energi till gemenskapen från omgivningen.

Vidare definierades egen produktion av energi som all energi som genereras inom gemenskapen. Beroende på scenario inkluderade detta elproduktion från solceller, värmeproduktion i central värmepump samt el- och värmeproduktion från ett lokalt kraftvärmeverk. Se figur 6 för en illustration av vilka komponenter och flöden som ryms inuti respektive utanför den valda systemgränsen, som markerats med en röd streckad linje.



Figur 6. Systemgräns för studien, samt illustration av import och export.

Solel behandlades i denna studie med ett tvådelat perspektiv, beroende på vilket nyckeltal som utvärderades. Vid beräkning av exergiverkningsgrad betraktades solel som tillförd exergi till systemet, för att kunna undersöka hur effektivt gemenskapen omvandlar tillgängliga resurser. Vid beräkning av självförsörjandegrad och självkonsumtion definierades solel i stället som lokal produktion, eftersom syftet med dessa nyckeltal är att mäta oberoendet från det externa el- och fjärrvärmenätet (se avsnitt 4.6).

Valet av systemgräns påverkar beräkningen av nyckeltal såsom självförsörjandegrad, självkonsumtion och exergiverkningsgrad och är därför viktigt för tolkningen av resultaten. För att möjliggöra en rättvis jämförelse av de undersökta scenarierna definierades systemgränsen på samma sätt i samtliga simuleringsfall.

4.6 Exergiberäkning och temperaturantaganden

4.6.1 Exergiberäkning

Innan exergiflöden beräknades utifrån energidata togs relevanta exergifaktorer fram. Detta gjordes dock inte för energiflöden bestående av el och bränsle, då elektrisk energi och kemisk energi har exergifaktorn 1. För el och biobränsle antogs därför energidatan motsvara exergin direkt. Däremot beräknades exergifaktorer för alla värmeflöden, då dessa är temperaturberoende.

Exergifaktorer f_{ex} för värme beräknades genom att använda ekvation (3) (se avsnitt 3.3), med timvis fram- och returledningstemperaturer (T_{fram} och T_{retur}) samt en referenstemperatur (T_0). Som referenstemperatur T_0 användes timvisa lokala utetemperaturdata för Uppsala kommun i alla beräkningar. Valet av en dynamisk referenstemperatur gjordes med utgångspunkt i Jansen (2014) för att representera hur exergins värde förändras med omgivningen när utemperaturen varierar över året. Om en fast referenstemperatur hade antagits skulle denna variation i energikvalitet inte fångas på samma sätt.

De temperaturer för fram- och returledning (T_{fram} och T_{retur}) som tillämpades i ekvation (3) varierade beroende på vilket energiflöde som undersöktes. Då exergin är beroende av den lokala termodynamiska kontexten, varierar de relevanta temperaturerna beroende på om flödet avser exempelvis byggnadernas radiatorsystem eller det externa fjärrvärmenätet. De specifika temperaturerna som användes redovisas i tabell 3 (avsnitt 4.6.2). Samma metodik tillämpades för samtliga beräkningar av exergifaktorer, vilket innebär att samma matematiska princip användes oavsett om flödet avsåg ett exergibehov eller en exergitillförsel.

För att därefter omvandla energidata för varje scenario till exergi (E) användes sambandet

$$E = Q \times f_{ex} , \quad (7)$$

där Q representerade värmeflödet i energi timvis, och f_{ex} representerade den relevanta beräknade exergifaktorn timvis.

4.6.2 Exergifaktorer – temperaturantaganden

De temperaturer som användes som fram- och returledningstemperaturer i fjärrvärmenätet hämtades från Napolitano (2026), medan temperaturerna för tappvarmvatten och radiatorsystem antogs vara konstanta. Tabell 3 sammanställer de temperaturer som låg till grund för beräkningar av exergifaktorer för respektive delsystem.

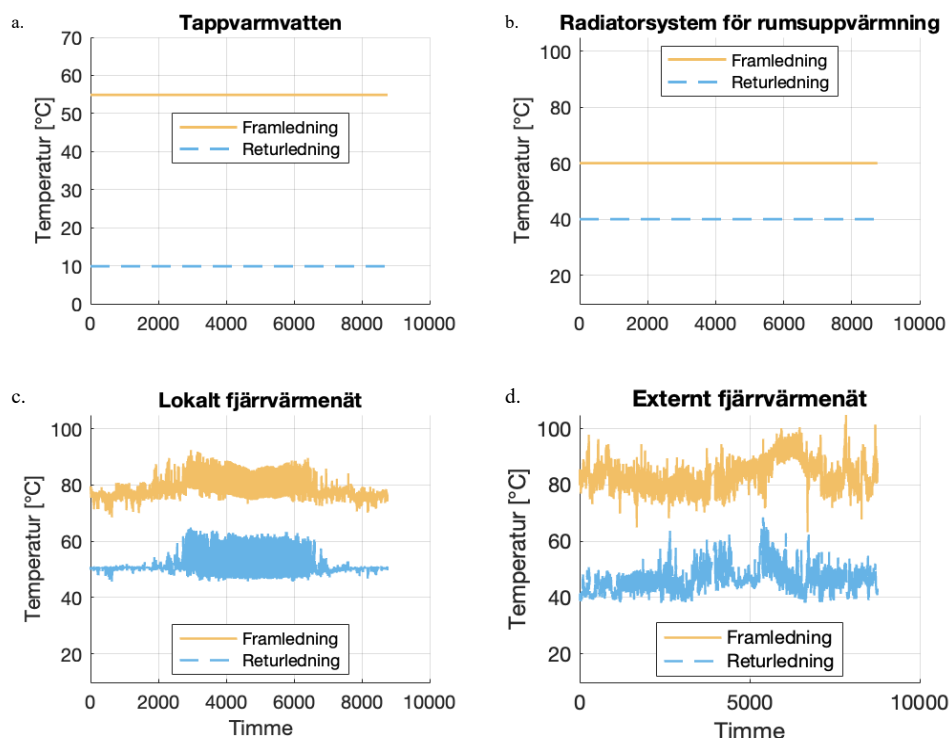
Tappvarmvattnets och radiatorsystemets temperaturer användes endast vid beräkningar av exergifaktorn hos dessa specifika flöden. Det lokala fjärrvärmenätets temperatur

användes vid beräkning av exergifaktorn för de lokala distributionsförlusterna samt för gemenskapens lokala värmeproduktion (värmepump och kraftvärmeverk), beroende på scenario. Det externa fjärrvärmenätets temperatur användes vid beräkning av exergifaktorerna för den importerade och exporterade fjärrvärmen.

Tabell 3. Fram- och returledningstemperaturer beroende på delsystem i energigemenskapen. För de varierande temperaturerna visas ett årsmedelvärde.

Delsystem		T_{fram} [°C]	T_{retur} [°C]	Källa
Fjärrvärmenät - lokalt	Varierar	78.99 (medel)	52.11 (medel)	Napolitano (2026)
Fjärrvärmenät - externt	Varierar	83.41 (medel)	46.64 (medel)	Napolitano (2026)
Tappvarmvatten	Konstant	55	10	(Levin, 2016)
Radiatorsystem	Konstant	60	40	Napolitano (2026)

Figur 7 illustrerar tidsvariationen av fram- och returledningstemperaturerna för tappvarmvatten, radiatorsystem för uppvärmning, det lokala fjärrvärmenätet samt det externa fjärrvärmenätet.



Figur 7. Tidvariationen hos fram- och returledningstemperatur följande delsystem: a. tappvarmvatten, b. radiatorsystem för rumsuppvärmning, c. lokalt fjärrvärmenät samt d. externt fjärrvärmenät.

4.7 Beräkning av nyckeltal

Efter att alla relevanta energiflöden identifierats och motsvarande exergier beräknats, beräknades självförsörjandegrad (SS), självkonsumtion (SC) samt exergiverkningsgrad (η_{ex}) för energigemenskapen i varje scenario. I detta delavsnitt beskrivs vilka energidata som användes vid beräkning av dessa nyckelfaktorer.

Självförsörjandegrad och självkonsumtion beräknades för energiflöden, medan gemenskapens systemverkningsgrad utvärderades ur ett exergiperspektiv. Valet att använda konventionella energidata för självförsörjande och självkonsumtion grundades i att dessa nyckeltal belyser den interna balansen mellan lokal produktion och lokalt behov. Eftersom energigemenskaper och externa energisystem interagerar utifrån energimängder, ger detta perspektiv en tydlig bild av gemenskapens oberoende gentemot omgivningen. Parallellt med detta användes systemets exergiverkningsgrad som ett mått på systemets tekniska prestation. Genom att exergiverkningsgraden ställer exergibehovet mot den tillförda exergin utifrån möjliggörs en analys av hur termodynamiskt effektivt systemet utnyttjar tillförda resurser för att täcka gemenskapens behov. Genom att kombinera energi- och exergiperspektiven skapades en helhetsbild där SS och SC utvärderar systemets tekniska förmåga till oberoende, medan exergiverkningsgraden

fungerar som en kritisk kontroll av om detta oberoende uppnås på bekostnad av termodynamiska förluster.

4.7.1 Självförsörjandegrad och självkonsumtion

Den totala årliga självförsörjandegraden och självkonsumtionen beräknades både för el och fjärrvärme separat, men även för el och fjärrvärme i kombination. Beräkningarna utfördes enligt ekvation (4) och ekvation (5) (avsnitt 3.5.1), och vid beräkning av el och fjärrvärme separat användes samma princip men där endast el respektive fjärrvärme inkluderades.

Vid beräkning av självförsörjandegraden med ekvation (4) antogs gemenskapens *lokala energibehov* bestå av byggnadernas grundläggande elanvändning samt värmebehovet för uppvärmning och tappvarmvattenanvändning. Dessa parametrar fanns i den givna energidatan och summerades direkt. Vidare, för att beräkna självkonsumtionen enligt ekvation (5), definierades *lokalt tillförd energi* som summan av data med egenproducerad energi från respektive komponent, beroende på scenario.

Vid beräkning av både självkonsumtion och självförsörjandegrad behövdes även termen *Använd lokalt tillförd energi* definieras. Då denna storhet inte fanns given i energidatan från Napolitano (2026) härleddes den från övriga givna energiflöden. *Använd lokalt tillförd energi* definierades i denna studie som den mängd lokalt tillförd energi som försörjer gemenskapens lokala behov, och alltså inte exporteras till externa nät eller går förlorad. Beräkningsmetoden för den *använda lokalt tillförda energin* varierade mellan de olika scenarierna, beroende på ingående komponenter:

- I *Scenario 0* finns ingen lokalt tillförd energi, så det antogs inte heller finnas någon *använd lokalt tillförd energi*.
- I *Scenario 1* finns egen produktion av el. Den *använda lokalt tillförda energin* i varje tidssteg begränsades således till det lägsta värdet av den aktuella produktionen och det rådande behovet. Överskott av solel inkluderades inte som använd lokalt tillförd solel, då den inte används hos slutanvändarna inom gemenskapen.
- I *Scenario 2* finns egen produktion av både värme och el. Den *använda lokalt tillförda elen* beräknades enligt samma princip som i Scenario 1. För värmen beräknades den använda mängden i stället som det lägsta värdet av värmepumpens produktion och det aktuella värmebehovet.
- I *Scenario 3* hanterades flera samverkande flöden av energi, med en viss prioriteringsordning.
 - **El:** Först beräknades bidraget från solceller som beskrivet i Scenario 1 och Scenario 2. I de fall där ett ytterligare elbehov kvarstod antogs detta försörjas av kraftvärmeverkets elproduktion, och den *använda lokalt*

tillförda elen beräknades som det lägsta värdet av det ytterligare elbehovet och mängden producerad el från kraftvärmeverket.

- **Värme:** Den *använda lokalt tillförda värmen* definierades som summan av direktnyttjad värme från kraftvärmeverket och den energi som laddades ur från värmelagret. Direktnyttjad värme från kraftvärmeverket beräknades enligt samma princip som för värmepumpen i Scenario 2, medan värmelagrets urladdade energi fanns given i data från Napolitano (2026). Eventuell energi som kvarstod i värmelagret efter årets slut inkluderades inte i nyckeltalen då den inte nått slutanvändaren.

4.7.2 Exergiverkningsgrad

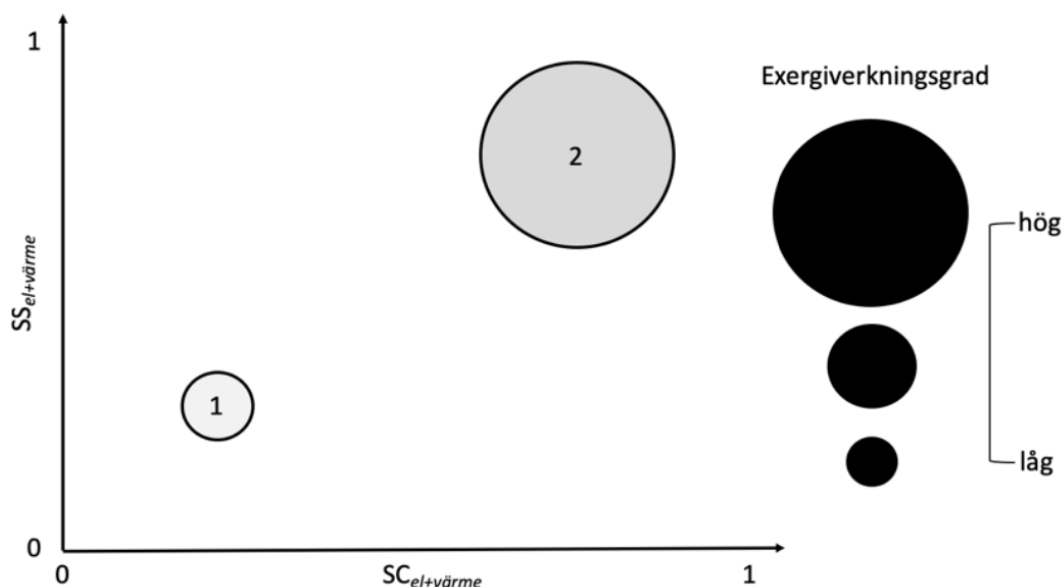
För varje scenario togs även den årliga totala exergiverkningsgraden η_{ex} fram enligt sambandet i ekvation (6) (avsnitt 3.5.2).

Utifrån definitionen av systemgränsen (se figur 6 och avsnitt 4.4) definierades total *tillförd exergi* som den totala mängd exergi som tillförs energigemenskapen utifrån systemgränsen under ett år. Detta inkluderar all import av el och fjärrvärme från det externa nätet inklusive el för att driva värmepumpen, samt exergi i form av bränsle till kraftvärmeverket och solel. Efter att dessa energimängder identifierats för respektive scenario, omvandlades de till motsvarande exergier med hjälp av exergifaktorer enligt beskrivningen i avsnitt 4.5.1, varefter alla tillförda exergiflöden summerades till en total *tillförd exergi*.

Vidare antogs totalt *exergibehov* avse det årliga exergibehovet hos slutanvändarna i energigemenskapen. Detta inkluderar elbehov samt fjärrvärmebehov för rumsuppvärmning och tappvarmvattenanvändning, omvandlat till motsvarande exergi enligt beskrivning i avsnitt 4.5.1. Samtliga behov summerades till ett totalt årligt exergibehov.

4.7.3 Grafisk analys av SS, SC och exergiverkningsgrad

För att tydligt jämföra nyckeltalen hos olika systemlösningar sammanställdes självförsörjandegrad, självkonsumtion och exergiverkningsgrad i ett gemensamt diagram (Figur 7). Storleken på cirkelarna i diagrammet anger exergiverkningsgraden, medan placeringen i diagrammet visar dess grad av självförsörjande respektive självkonsumtion. Ett optimalt system med god matchning mellan lokal tillförsel och användning av el och värme samt minimala energikvalitetsförluster, representeras av en stor cirkel på den övre högra halvan, likt exempel 2 i figur 8. Ett sämre presterande system visas i stället en mindre cirkel på den nedre vänstra halva av diagrammet, likt exempel 1 (Åberg, 2024).



Figur 8. Principiell illustration av diagram som inkluderar självkonsumtion, självförsörjandegrad samt exergiverkningsgrad (Åberg, 2024).

4.8 Import och export

Efter att självförsörjandegrad, självkonsumtion och exergiverkningsgrader beräknats för respektive scenario, beräknades även exergin i den resulterande import och export som respektive scenario gett upphov till. Energidata för importerad el och fjärrvärme, samt exporterad el och fjärrvärme, fanns givet i Napolitanos (2026) data. Därför kunde dessa energiflöden omvandlas till exergi direkt i enlighet med tidigare beskrivning av hur en sådan omvandling utförs (ekvation (7)). Exergifaktorn som användes för import och export av fjärrvärme var exergifaktorn för det externa fjärrvärmenätet, som beskrevs i avsnitt 4.6. Den resulterade totala importen och exporten i varje scenario presenteras i stapeldiagram för att illustrera energigemenskapens totala belastning mot de externa näten. För exporten presenteras dessutom tidsvariationen över året, för att illustrera när det sker en överproduktion av lokalt tillförd exergi.

4.9 Tolkning av begreppet energikvalitetsförluster

I denna studie används begreppet energikvalitetsförluster synonymt med exergiförluster. Detta definieras som den exergi som går förlorad till följd av den miss-matchning som blir resultatet av att högvärdiga energiresurser används för att förse lågvärdiga energibehov, både på komponent- och systemnivå. Förlusten innebär i praktiken att energi som potentiellt hade kunnat omvandlas till arbete har gått förlorad.

De värmeproducerande komponenternas exergiverkningsgrad togs fram, för att illustrera graden av exergimatchning mellan deras in- och utflöden. Exergiverkningsgraden beräknades i dessa fall som kvoten mellan utgående och ingående exergi. Denna typ av beräkning kan synliggöra de interna irreversibiliteterna som kan uppstå inuti

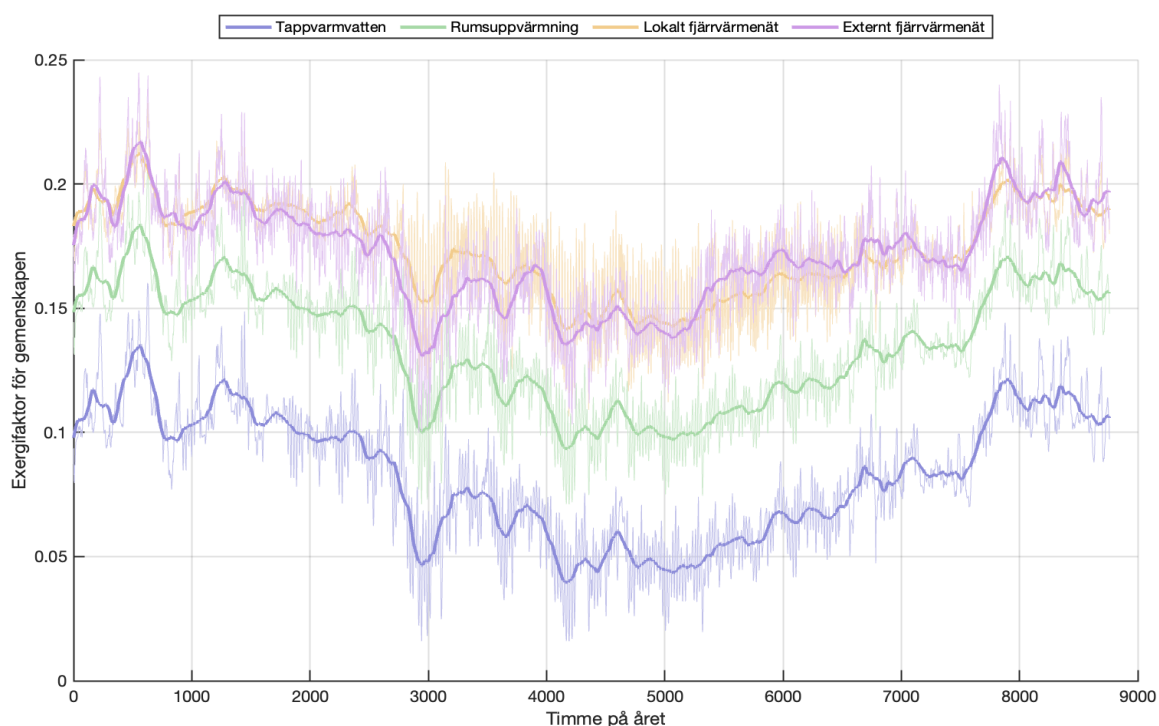
energitekniska komponenter. Till skillnad från en traditionell energiverkningsgrad visar exergiverkningsgraden till vilken grad komponenterna bevarar energins kvalitet.

5. Resultat

I detta kapitel presenteras studiens resultat. Inledningsvis presenteras grundläggande resultat av exergiberäkningar och exergifaktorer för olika delsystem. Därefter presenteras självförsörjandegrader och exergiverkningsgrader för de olika scenarierna. Sedan visas det resulterande importbehovet samt exporten till det externa nätet.

5.1 Exergifaktorer beroende på delsystem

Figur 9 visar hur exergifaktorerna för delsystemen tappvarmvatten, rumsuppvärmning, lokalt fjärrvärmenät samt externt fjärrvärmenät varierar timvis över året. Ett glidande medelvärde visas i figuren för att tydligare illustrera skillnader mellan respektive graf.



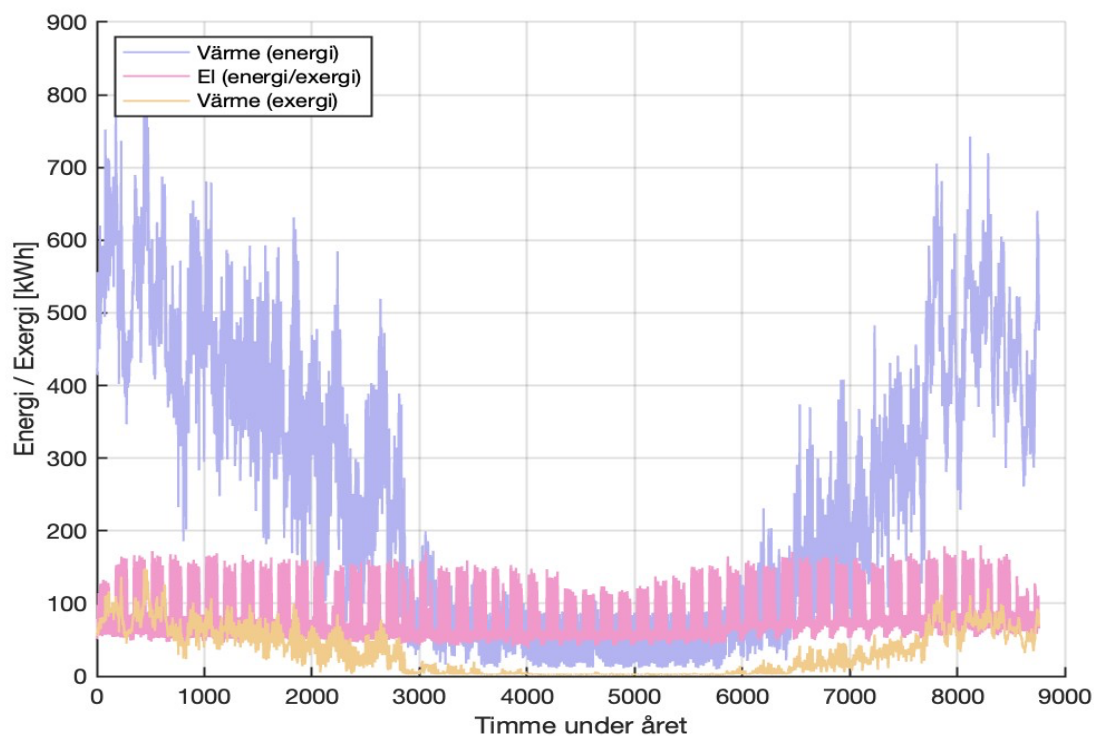
Figur 9. Exergivärdet i värmeflödet - timvis variation över året beroende på delsystem i fjärrvärmenätet.

Resultaten presenterade i figur 9 visar att exergivärdet för det lokala fjärrvärmenätet och det externa fjärrvärmenätet håller en jämn nivå med varandra, trots att det finns en skillnad i temperatur mellan dessa delar av fjärrvärmenätet, där det externa fjärrvärmenätet har något högre framledningstemperatur och något lägre returledningstemperatur (se figur 7, avsnitt 4.5.2). Vidare visar figuren att

rumsuppvärmningens exergifaktor kontinuerligt har ett något lägre värde än fjärrvärmens exergifaktor, följt av tappvarmvattnet som alltid har det lägsta värdet. Detta resultat korrelerar med storleksordningen hos temperaturerna för delsystemen. Det kan även noteras i diagrammet att alla exergifaktorer följer en liknande trend över året, där det sker en minskning mot årets sommarmånader. Detta korrelerar med tidsperioden då referenstemperaturen, som antogs vara den varierande utetemperaturen, ökar.

5.2 Exergibehov och exergitillförsel

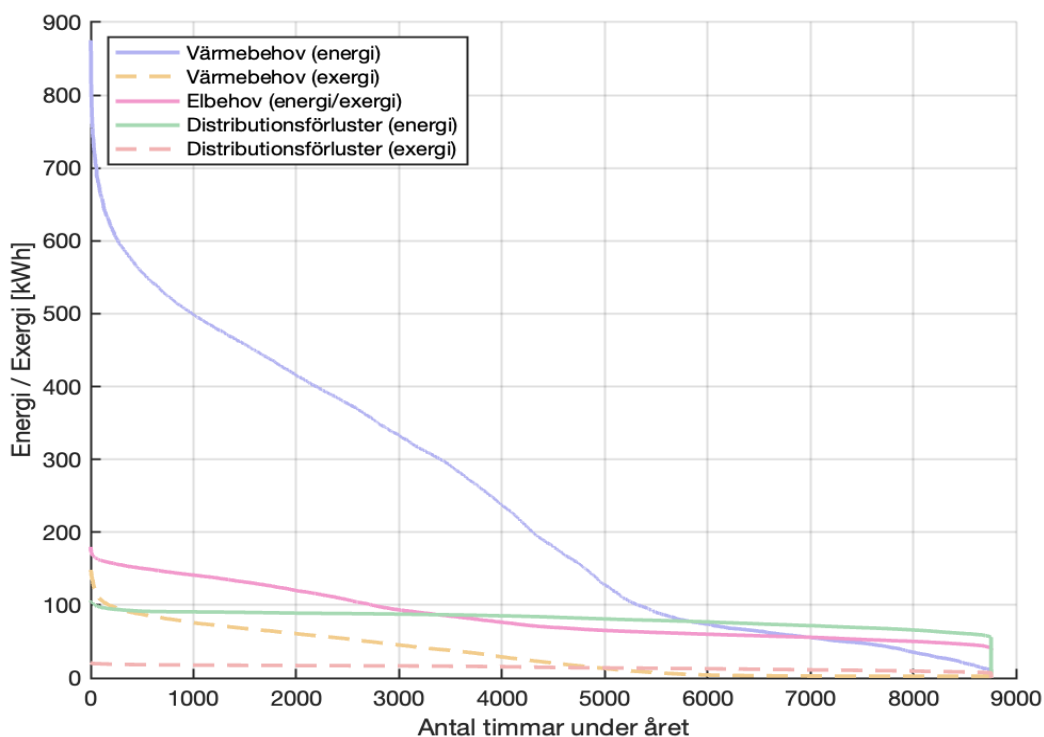
Figur 10 visar årsvariationen hos det grundläggande energi- respektive exergibehovet för fjärrvärme och el för hela gemenskapen, som beräknades med hjälp av energidata och exergifaktorer. Fjärrvärmebehovet inkluderar gemenskapens totala tappvarmvattenanvändning och rumsuppvärmning, medan elbehovet inkluderar det grundläggande behovet för elanvändning. Elbehovet är detsamma uttryckt i både energi och exergi.



Figur 10. Timvis tidsvariation hos det grundläggande värme- och elbehovet hos byggnaderna, uttryckt i både exergi och energi.

I figur 10 illustreras att fjärrvärmebehovet är som högst i början och slutet av året, medan det minskar under årets sommarmånader. Maximalt uppgår fjärrvärmebehovet till cirka 760 kWh. Motsvarande exergibehov för fjärrvärmens följer samma trend, men detta behov har betydligt lägre magnitud och uppgår maximalt till omkring 150 kWh. Gällande elbehovet visar figuren en jämn last över årets timmar, med endast en låg minskning under mitten av tidsperioden.

Figur 11 visar samma fjärrvärme- och elbehov som figur 10, men illustrerat i ett varaktighetsdiagram. I varaktighetsdiagrammet inkluderas även distributionsförlusterna i det lokala fjärrvärmenätet, uttryckt i både energi och motsvarande exergi. Till skillnad från figur 10, som visade säsongvariationen av energibehoven, visar figur 11 antalet timmar under ett år som respektive energibehov uppnått ett visst värde.



Figur 11. Varaktighetsdiagram som visar grundläggande värmebehov, elbehov och distributionsförluster, uttryckt i både energi och exergi.

I varaktighetsdiagrammet i figur 11 illustreras skillnaden i energikvalitet (energiinnehåll) mellan gemenskapens olika energibehov. Elbehovet identiskt både uttryckt i exergi och energi, eftersom exergi har exergifaktor 1, och kan teoretiskt sett helt kan omsättas till mekaniskt arbete.

För värmebehovet och distributionsförlusterna finns däremot en markant skillnad mellan energi- och exergimängd under årets samtliga timmar. Värmebehovets toppeffekt uppgår till nära 900 kWh, medan det motsvarande exergibehovet är som högst cirka 180 kWh (till vänster i diagrammet). Figuren indikerar vidare att den procentuella skillnaden mellan exergin och energin i värmebehovet är som störst under årets kallaste timmar, alltså där topplatsen inträffar. Dock finns en större andel timmar under året där den kvantitativa skillnaden inte blir lika markant. Under majoriteten av årets timmar ligger energin under 100 kWh, vilket visas av att endast en liten topp finns som överstiger 100 kWh, till vänster i diagrammet. Här syns även en lägre kvantitativ skillnad mellan energin och motsvarande exergi.

Vidare, gällande distributionsförlusterna i det lokala fjärrvärmenätet, visar figur 11 att de timvisa exergiförlusterna konsekvent ligger under 20 kWh, trots att energiförlusterna når

upp till omkring 100 kWh. Detta indikerar att de faktiska termodynamiska kvalitetsförlusterna i distributionen är begränsade för denna energigemenskap.

Gällande grafernas lutning i figur 11 kan det konstateras att exergibehovens varaktighetskurvor är betydligt flackare än energibehovens. Medan energikurvorna har en brant negativ lutning med höga toppvärden under ett begränsat antal timmar, uppvisar exergikurvorna en jämnare nivå som sträcker sig över merparten av årets timmar. De maximala exergibehoven är därmed både lägre och mer stabilt fördelade över varaktigheten jämfört med de stora variationerna som uppvisas i det totala energibehovet.

Tabell 4 sammanfattar beräknade data för gemenskapen, såsom totala exergibehov och motsvarande exergitillförsel, intern värmeproduktion och elproduktion, samt verkningsgrader för värmeproducerande komponenter i gemenskapen. Alla parametrar som beskriver mängder uttrycks i både exergi och energi, medan verkningsgrader uttrycks i procent.

Tabell 4. Summerade data för gemenskapen och tekniska komponenter i respektive scenario.

			Scenario			
Parameter		Enhet	0	1	2	3
Totalt fjärrvärmebehov	Energi	GWh	2.098	2.098	2.128	2.128
	Exergi	GWh	0.285	0.285	0.304	0.304
Total lokal värmeförsel	Energi	GWh	0	0	2.107	1.661
	Exergi	GWh	0	0	0.313	0.299
Totalt elbehov	Energi	GWh	0.754	0.754	1.457	0.754
	Exergi	GWh	0.754	0.754	1.457	0.754
Total lokal elförsel	Energi	GWh	0	0.314	0.314	0.829
	Exergi	GWh	0	0.314	0.314	0.829
Totalt behov (fjv + el)	Energi	GWh	2.852	2.852	3.585	2.882
	Exergi	GWh	1.039	1.039	1.761	1.058
Total lokal försel (fjv + el)	Energi	GWh	0	0.314	2.421	2.490
	Exergi	GWh	0	0.314	0.627	1.128
Värmepump verkningsgrad	Energi	%	-	-	300	-

	Exergi	%	-	-	44.5	-
Kraftvärmeverk	Energi	%	-	-	-	85
verkningsgrad	Exergi	%	-	-	-	31.8

Ur tabell 4 framgår bland annat att scenariot med det högsta totala energibehovet är Scenario 2, med värmepumpen, där det uppgår till totalt 3,585 GWh. Gällande total lokal tillförsel visar sig Scenario 3 ha det högsta totala värdet, med totalt 2,490 GWh egenproducerad el och fjärrvärme. Detta står i kontrast mot referensfallet är den lokala tillförseln av energi är noll. Vidare bekräftar tabell 4 att exergivärdena för samtliga värmerelaterade energiflöden är markant lägre än deras respektive energivärden.

Ytterligare information som framgår ur tabell 4 är att värmepumpen som komponent har en högre exergiverkningsgrad än kraftvärmeverket, där värmepumpens verkningsgrad är 44,5%, medan kraftvärmeverkets verkningsgrad är 31,8%. Alltså indikerar tabellen att värmepumpen på ett mer effektivt sätt lyckas omvandla tillförda resurser till nyttiggjord exergi. Detta står i kontrast mot de typiska värdena på komponenternas verkningsgrader som presenterades i figur 2 och 3 (se avsnitt 3.4), där värmepumpar vanligtvis har en lägre exergiverkningsgrad än kraftvärmeverk. Den observerade skillnaden i exergiverkningsgrad kan dock förklaras av exergins omgivningsberoende, exempelvis variationer i temperaturförhållanden som påverkar systemets exergiprestanda.

5.3 Självförsörjandegrad, självkonsumtion och exergiverkningsgrad

Tabell 5 visar resulterande självförsörjandegrad och självkonsumtion för el och fjärrvärme separat, samt för en kombination av dessa. Dessa resultat presenteras i energiform, och har beräknats för varje undersökt scenario. Tabell 5 visar även exergiverkningsgraden för hela energigemenskapen i respektive scenario.

Ur tabell 5 kan utläsas att självkonsumtionen och självförsörjandegraden är noll i referensfallet, där ingen egen produktion finns. I Scenario 1, där det finns en egen produktion av el från solceller, finns en viss självförsörjandegrad och självkonsumtion av el, men inte av fjärrvärme. Det framgår ur tabellen att Scenario 1 generellt har lägre värden på självförsörjning och självkonsumtion än Scenario 2 och Scenario 3. Undantaget från detta gäller el separat, där Scenario 1 och Scenario 2 har identiska värden, då de båda har samma elproduktion från solceller.

Tabell 5. Resultande total självförsörjandegrad (SS), självkonsumtion (SC) och exergiverkningsgrad (η_{ex}) i de studerade scenarierna.

Parameter	Referens [%]	Scenario 1 [%]	Scenario 2 [%]	Scenario 3 [%]
SC - fjv	0	0	100	92.696
SS - fjv	0	0	99.046	72.389
SC - el	0	89.050	89.050	90.237
SS - el	0	19.203	19.203	99.322
Total SC (fjv + el)	0	89.050	98.579	91.877
Total SS (fjv + el)	0	7.868	66.594	79.434
η_{ex}	94.270	87.840	43.065	31.393

Gällande Scenario 2 och Scenario 3, där det finns lokal produktion av både av el och fjärrvärme, visar tabell 5 att det finns en grad av självkonsumtion och självförsörjandegrad av både el och fjärrvärme. Det framgår att Scenario 2 har en högre självförsörjandegrad och självkonsumtion av värme separat än Scenario 3. Samtidigt har Scenario 3 högre värden på motsvarande nyckeltal för el, med hela 99% självförsörjandegrad, vilket är det högsta av alla de undersökta scenarierna. Som jämförelse uppvisar Scenario 2 endast 19% i självförsörjandegrad av el. Gällande den totala självförsörjandegraden har Scenario 3 högre värde än Scenario 2, medan det motsatta gäller för självkonsumtionen.

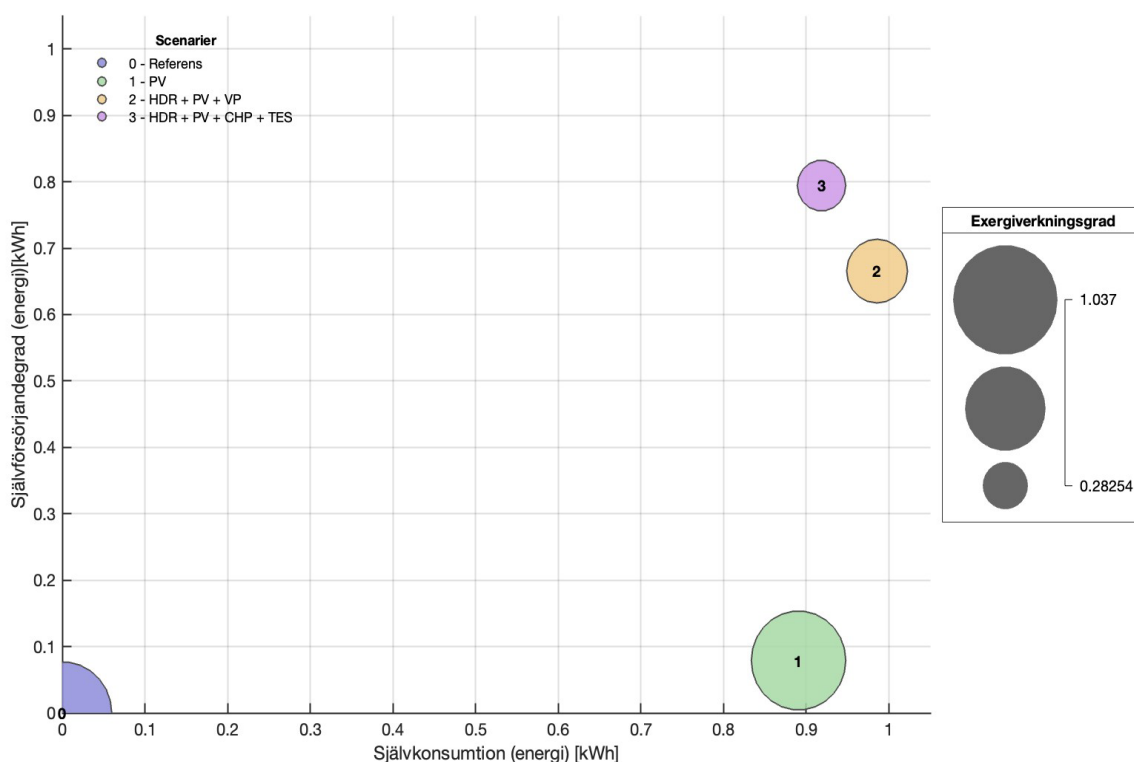
Det framgår även i tabell 5 att det finns en hög nivå av total självkonsumtion i alla tre scenarier, där alla tre system presterar omkring 90–99%. Den totala självförsörjandegraden varierar dock i storlek, men det är tydligt att Scenario 2 och 3, som har egen el- och värmeproduktion, har högre självförsörjandegrader än Scenario 1, som endast har egen elproduktion.

Vad gäller exergiverkningsgraden för systemet kan i tabell 5 utläsas att η_{ex} är högst i referensfallet, följt av Scenario 1 där endast egen solelproduktion tillförts. Vidare är verkningsgraden allra lägst i Scenario 3, ungefär 31,4 %, och i Scenario 2 är η_{ex} 43 % vilket är något högre. Tabell 5 visar därmed att exergiverkningsgraden inte följer samma

mönster som självkonsumtionen och självförsörjandegraden mellan scenarierna när det kommer till procentuell storlek.

En observation som dessutom kan göras gällande systemens exergiverkningsgrader i tabell 5, i jämförelse med komponentverkningsgraderna för värmepump och kraftvärmeverk som visades i tabell 4, är att verkningsgraderna är mycket lika varandra. Scenario 2, med värmepumpen, uppvisade exergiverkningsgraden 43% för hela systemet, medan värmepumpens specifika exergiverkningsgrad är 44,5%. För Scenario 3 är systemverkningsgraden 31,39% medan komponentverkningsgraden för kraftvärmeverket beräknades till 31,8%. Detta indikerar att det finns ett starkt samband mellan exergiprestandan hos de värmeproducerande komponenterna och hela energigemenskapens exergiverkningsgrad.

De huvudsakliga resultaten som lyfts i detta delavsnitt visas grafiskt i figur 12. I figuren illustreras de undersökta scenariernas självförsörjandegrad och självkonsumtion på varsin axel. Storleken på cirkarna illustrerar exergiverkningsgraden, där en lägre exergiverkningsgrad illustreras av en mindre cirkel, och vice versa.



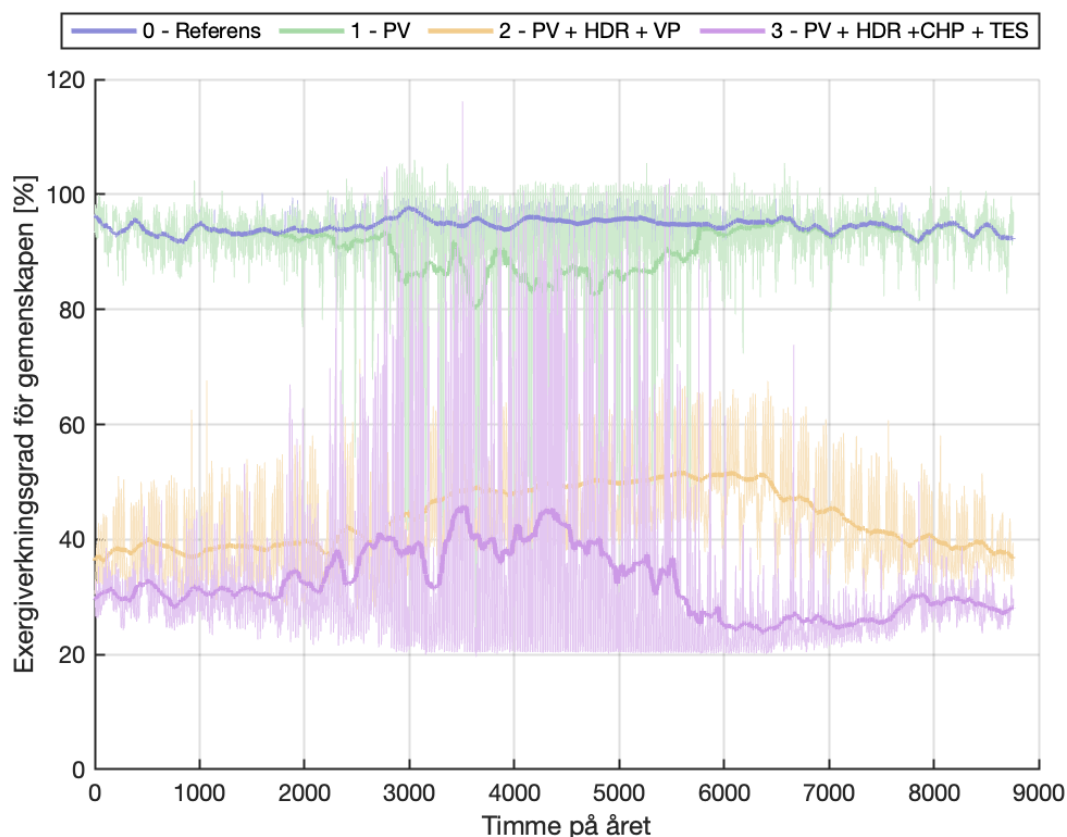
Figur 12. Diagram som illustrerar självkonsumtion, självförsörjandegrad och exergiverkningsgrad för respektive scenario.

Figur 12 visar mindre cirklar och därmed exergiverkningsgrader i Scenario 2 och 3, medan det syns större cirklar i referensscenariot och Scenario 1. Vidare visar cirkelnas placering i diagrammet dess grad av självförsörjandegrad och självkonsumtion, där Scenario 1, 2 och 3 har en hög självkonsumtion. Scenario 2 och 3 har dessutom även hög självförsörjandegrad, vilket illustreras av att de är placerade i den övre halvan av

diagrammet. Referensscenariot och scenario 1 är däremot placerade i den lägre halvan av diagrammet, vilket indikerar en låg självförsörjandegrad.

En observation som kan göras av figur 12 är att de två scenarierna med lägst exergiverkningsgrad är placerade högst upp till höger i diagrammet, vilket innebär att de har högst självförsörjandegrad och självkonsumtion. Detta står i kontrast mot referensscenariot och Scenario 1, som trots sina lägre självförsörjandegrader samtidigt har större cirklar och därmed högre exergiverkningsgrader. Dessa observationer visar att en högre självkonsumtion och självförsörjandegrad hos en energigemenskap inte automatiskt korrelerar med en högre exergiverkningsgrad.

För att vidare undersöka exergiverkningsgraderna i de olika scenarierna har den timvisa variationen av exergiverkningsgraden i de olika scenarierna tagits fram, vilket presenteras i figur 13. Figuren visar exergiverkningsgradens timvisa variation med förtydligande glidande medelvärden markerade i en mörkare nyans.



Figur 13. Exergiverkningsgradernas timvisa årsvariation för respektive scenario.

Ur figur 13 kan observeras att de högre verkningsgraderna, det vill säga verkningsgraderna för Scenario 0 och Scenario 1, är storleksmässigt lika, med undantag för under sommarperioden där Scenario 1 har något lägre exergiverkningsgrad. Detta korrelerar med den period då solcellerna i Scenario 2 producerar mer el. Resultatet

indikerar att ökad produktion av solceller leder till en sänkning av exergiverkningsgraden i detta fall.

Vidare visar figur 13 att verkningsgraderna för Scenario 2 och Scenario 3 är av lägre magnitud, men inte så lika varandra som i referensscenariot och Scenario 1. Båda scenarierna visar dock en höjning av exergiverkningsgraden under sommarmånaderna. Detta kan även betraktas som en motsvarande sänkning av exergiverkningsgraderna under vintermånaderna, snarare än höjning under sommaren, vilket kan korrelera med det ökade värmebehovet när utetemperaturen sjunker.

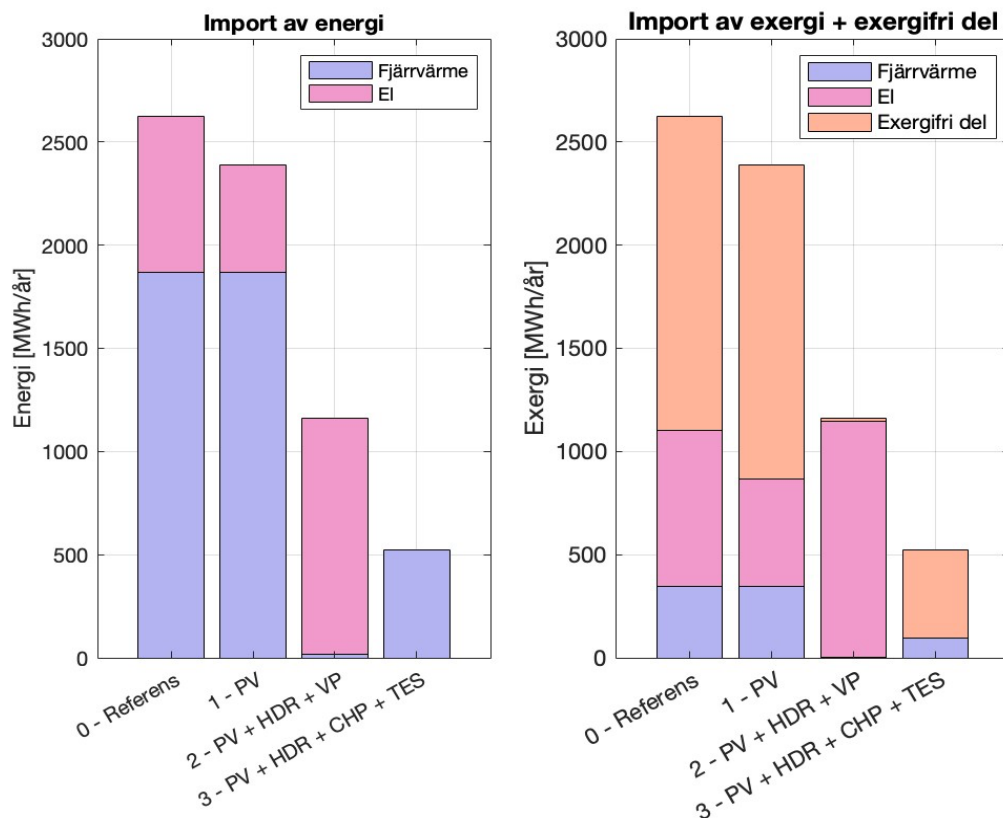
Gällande variationen av exergiverkningsgraden över året visas vidare att referensscenariot håller en stabil hög verkningsgrad utan tydliga variationer över årets timmar. Detta indikerar att exergitillförseln täcker exergibehovet genom import oavsett årstid, och att tillförseln följer behovet jämnt över året, med minimal påverkan från olika tekniska komponenter.

Vidare kan noteras i figur 13 att det finns en variation av hur mycket exergiverkningsgraden fluktuerar timvis mellan de olika scenarierna. Detta illustreras av de tunnare, ljusare graferna bakom respektive glidande medelvärde. I referensfallet och Scenario 1 finns en låg fluktuation, vilket indikerar en stabilare verkningsgrad timvis. Sett till Scenario 2 finns en något högre variation timvis, och hos Scenario 3 syns en tydlig stor fluktuation av verkningsgraden under årets sommarmånader, där det finns skillnader så stora som mellan cirka 90 % och 20 %. Detta visar att samtliga scenarier pendlar mellan att fungera exergieffektivt och ineffektivt under korta tidsintervall, men att vissa av dessa scenarier har en tydligt mer stabil verkningsgrad timvis över året.

Gällande fluktuationerna i figur 13 kan exergiverkningsgraderna vid vissa tidpunkter under sommarmånaderna nå värden som överstiger 100 %. Denna timvisa variation beror sannolikt på den temperaturdata som visades i figur 7 i avsnitt 4.5.2, som vissa timmar lett till en exergitillförsel som varit högre än exergin in på det lokala nätet. I realiteten kan exergiverkningsgraden inte överstiga 100%. Detta belyser hur känslig den dynamiska exergiverkningsgraden är för fluktuationer i omgivningstemperaturen T_0 .

5.4 Import och export mot externt nät

Den totala mängden importerad fjärrvärme och el har summerats och motsvarande import av exergi har beräknats i varje scenario. De resulterande totala importbehoven presenteras i stapeldiagrammen i Figur 14. I figuren inkluderas dessutom den resulterande differensen mellan importerad energi och motsvarande användbara energi (exergi). Denna del av importen, som inte har någon potential att utföra arbete, benämns i figuren som *exergifridel*.



Figur 14. Stapeldiagram med importerad energi uppdelad mellan fjärrvärme och el för respektive scenario, i det högra diagrammet. Import av exergi i fjärrvärme och el visas i det vänstra diagrammet, tillsammans med motsvarande exergifri del av importen.

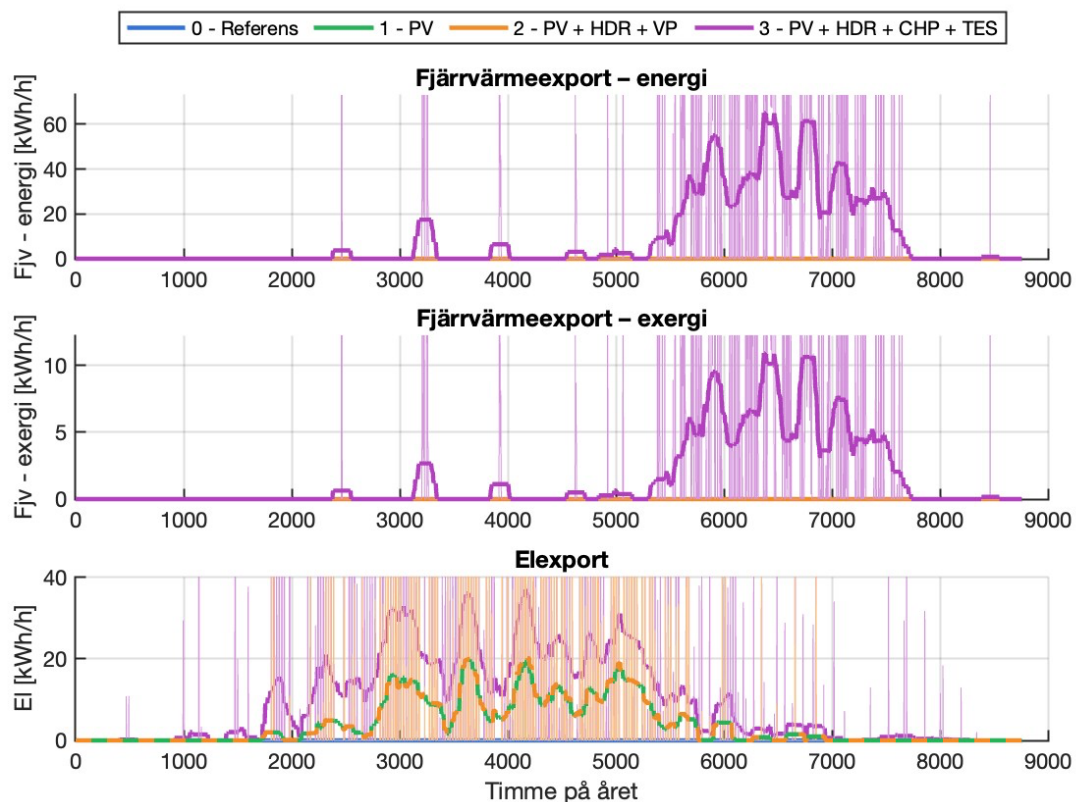
Stapeldiagrammet till vänster i figur 14 visar att alla scenarier i någon grad är importberoende av el och eller fjärrvärme. Referensscenariot, där ingen egen energiproduktion finns, är naturligtvis helt importberoende. Figuren visar att detta rör sig om en större mängd fjärrvärme, men även el. Totalt uppgår importen av energi till cirka 2600 MWh energi i referensscenariot. Vidare visar det vänstra diagrammet att referensscenariot och Scenario 1 importerar samma mängd fjärrvärme, men att Scenario 1 som även producerar solceller resulterar i en lägre import av el. Gällande Scenario 2 som inkluderar en eldriven värmepump visar figur 14 att fjärrvärmeimporten nästan helt elimineras. Samtidigt kan observeras att importbehovet av el ökar i jämförelse med Scenario 0 och 1. Totalt uppgår importen av energi i Scenario 2 till ungefär 1200 MWh. Vidare visar det vänstra stapeldiagrammet att Scenario 3, som inkluderar ett el- och värmeproducerande kraftvärmeverk, eliminerar behovet av import av el. Importen består i stället endast av fjärrvärme, men med en betydlig sänkning jämfört med importbehovet av värme i referensscenariot. Totalt uppgår importen av energi i Scenario 3 till cirka 500 MWh per år.

I det högra stapeldiagrammet i figur 14 kan utläsas att den importerande exergin i form av el alltid är av samma magnitud som den importerade energin för el som visades i det vänstra diagrammet, vilket gäller i alla scenarier där elimport finns. Detta förklaras

naturligt av att exergifaktorn för el är 1. Det som däremot tydligt skiljer sig åt mellan energiimporten och exergiimporten i figurens högra och vänstra diagram, är att den totala importen av exergi är mindre än den totala importen av energi i alla fall där importen inkluderar fjärrvärme, alltså i Scenario 0, 1 och 3. Detta är en naturlig följd av att fjärrvärmens exergiinnehåll är temperaturberoende och varierar.

I det högra diagrammet i figur 14 visas vidare att det sker import av energi utan exergiinnehåll i hög utsträckning i alla fall där importen inkluderar fjärrvärme. Detta illustreras i diagrammet som *exergifri del*. Referensscenariot och Scenario 1 resulterar i samma totala import av denna typ, då de innebär import av fjärrvärme. Scenario 2, som resulterar i en nästan helt eliminerad import av fjärrvärme, uppvisar inte heller någon import av exergifri energi i det högra diagrammet. Detta står i kontrast mot Scenario 3, som resulterar i det lägsta totala importbehovet, men som uppvisar högst andel exergifri energi, då importen nästan helt utgörs av fjärrvärme. Diagrammen synliggör att ett minimerat totalt importbehov i kilowattimmar i stället kan bestå av energiflöden med lägre termodynamisk kvalitet.

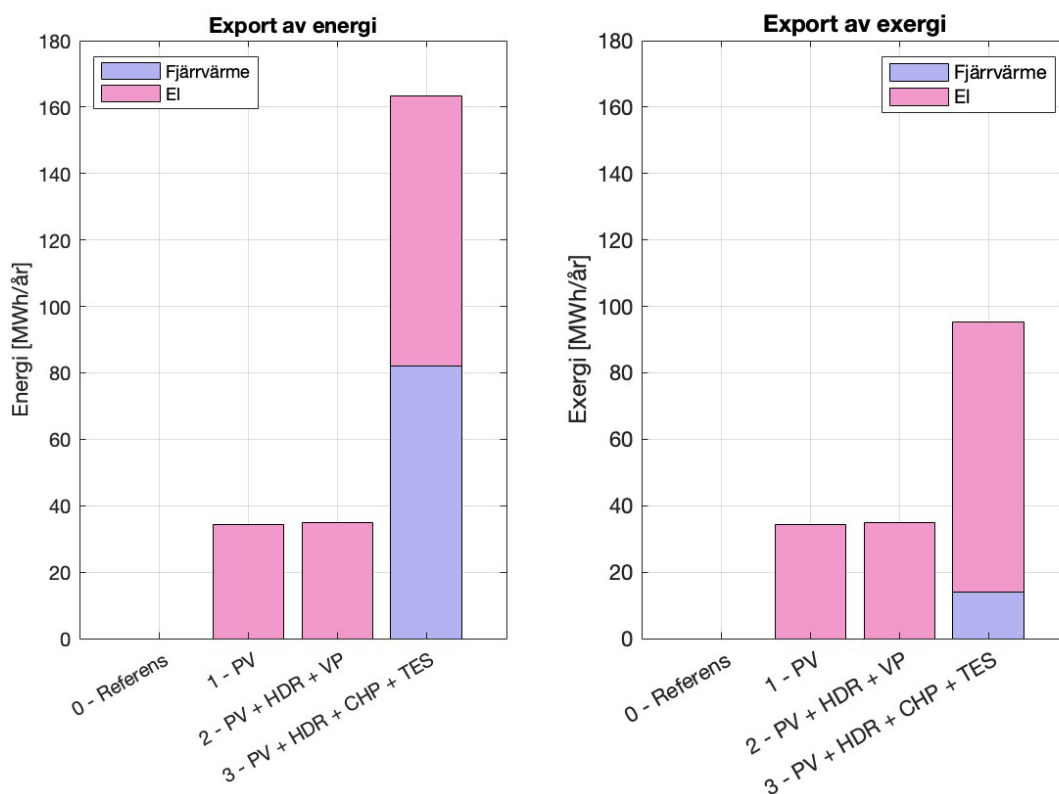
I figur 15 illustreras tidsvariationen av den exporterade energin från energigemenskapen till det omgivande nätet för respektive scenario. Överst visas exporterad energi för fjärrvärme, och i mitten visas motsvarande exergi. Nederst visas den exporterade elen.



Figur 15. Tidsvariationen av export för respektive scenario, fördelat mellan fjärrvärme och el, samt mellan energi och exergi.

Figur 15 visar att det endast sker export av fjärrvärme i Scenario 3, framför allt mellan timmarna 5500 och 7500 av året. Motsvarande exergi visas i det mittersta diagrammet. Det framgår att den maximala timvis exporterade energin uppgår till strax över 60 kWh, medan motsvarande exergi uppgår till strax över 10 kWh. I det nedre diagrammet visas exporterad el, och i detta diagram framgår att det sker export av el i Scenario 1, 2 och 3. Scenario 3 uppvisar den högsta exporten av el, som uppgår i maximalt cirka 40 kWh. Exporten av värme för Scenario 3 kan antas inträffa när värmelagret är fullt. Scenario 1 och 2 ger samma export av el vilket framgår av att deras grafer är identiska. För alla scenarier med elexport gäller att exporten sker framför allt mellan timmarna 2000 och 6000, alltså omkring sommartid. För samtliga grafer som uppvisar en export av energi uppvisas en tydlig och hög fluktuation av timvis export, vilket visas av de ljusare graferna bakom det glidande medelvärdet. Exporten av el sker framför allt sommartid, medan fjärrvärmeexporten sker under perioden efter sommaren.

Figur 16 visar den summerade exporten av energi respektive motsvarande exergi för varje studerat scenario, i syfte att tydliggöra skillnaden mellan scenariernas totala överproduktion av energi. Exporten delas upp i fjärrvärmeexport och elexport.



Figur 16. Total export av fjärrvärme respektive el för varje scenario. Diagrammet till vänster visar energi, medan diagrammet till höger visar motsvarande exergi.

Figur 16 visar att det inte sker någon export av energi och därmed inte heller av exergi i referensscenariot, där ingen egen energiproduktion finns. I Scenario 1 och Scenario 2 finns en identisk export av el, som uppgår till ungefär 35 MWh per år, men inget av dessa scenarier uppvisar export av fjärrvärme. Vidare kan observeras att Scenario 3 ger en

export av både fjärrvärme och el, och den totala exporten uttryckt i energi uppgår till nästan 165 MWh per år, där fjärrvärme utgör strax över 80 MWh och el står för resterande mängd exporterad energi.

Sett till total exporterad exergi visar figur 16 att den exporterade elen har samma storlek för alla scenarier när den uttrycks till både energi och exergi. För Scenario 3, som även har fjärrvärmeexport, kan utläsas att den exporterade exergin i form av fjärrvärme är lägre än motsvarande energi. Exporterad fjärrvärmeexergi uppgår i Scenario 3 till ungefär 15 MWh per år, vilket innebär att den totalt exporterade exergin i Scenario 3 uppgår till ungefär 95 MWh per år.

6. Diskussion

I detta kapitel diskuteras de resultat som presenterats i relation till studiens syfte och frågeställningar. Inledningsvis belyses självförsörjandegraden och självkonsumtionen samt den konflikt som identifieras mellan dessa prestationsmått och exergiverkningsgraden. Därefter diskuteras exergiverkningsgraderna för respektive scenario och vad som kan förklara dessa. Vidare analyseras energigemenskapens omgivningspåverkan i termer av import och export, samt systemgränsens betydelse för resultaten. Sedan problematiseras valet av metodologiska antaganden för att belysa hur dessa har påverkat studiens resultat. Slutligen lyfts några identifierade aspekter som skulle vara intressanta att undersöka i en framtida studie.

6.1 Konflikt mellan energi- och exergimått

Gällande de prestationsmått som undersöktes i termer av energi (självkonsumtion och självförsörjandegrad) syns en betydligt högre prestation i Scenario 2 och 3 än i referensfallet i båda avseenden, vilket visas i figur 12 och tabell 5. Detta resultat kan förklaras av att Scenario 2 och 3 innehåller lokal tillförsel av både el och värme, medan referensscenariot saknar båda dessa. Gällande Scenario 1, med solcellerna, syns en hög självkonsumtion men en låg självförsörjandegrad. Detta resultat indikerar att energigemenskapen använder en hög andel av den lokalt producerade elen i detta fall, medan den inte kan täcka lika stor andel av systemets totala energibehov. Med tanke på att scenariot endast har lokal eltillförsel och inte värmertilförsel, är detta resultat väntat.

Ett av de viktigaste resultaten med koppling till de beräknade prestationsmått är den direkta motsägelse som uppstår mellan traditionella energimått (självförsörjande och självkonsumtion) och exergiverkningsgraden. Detta illustreras i figur 12, där det kan observeras att de cirklar som är placerade högst upp till höger i diagrammet har lägst storlek, medan de cirklar som är placerade längst ned till vänster är större. Ur ett energiperspektiv framstår Scenario 2 och 3 som högt presterande då de uppvisar totala självförsörjandegrader på omkring 67% respektive 79%, samt självkonsumtionerna 99% respektive 92% (tabell 5). När samma scenarier utvärderas utifrån ett exergiperspektiv

vänds dock resultaten till det motsatta. Referensscenariot, som saknar lokal produktion och är helt importberoende, uppvisar den absolut högsta exergiverkningsgraden på cirka 94%, följt av Scenario 1 med 88%. Samtidigt visar Scenario 2 och 3 de lägsta exergiverkningsgraderna om cirka 43% respektive 31%. Dessa motsägande resultat illustrerar det perspektiv som bland annat Wall (1992) och Åberg (2024) betonar: att ett system som framstår som resurseffektivt och oberoende ur ett traditionellt energiperspektiv inte nödvändigtvis behöver prestera väl när energins kvalitet undersöks.

6.2 Exergibehov och exergiverkningsgrader

För att förstå energigemenskapens prestanda utifrån exergiperspektivet och varför detta perspektiv inte indikerar samma resultat som självförsörjandegraden, kan de bakomliggande fysikaliska faktorerna analyseras. Exergin i de undersökta energiflödena styrs av exergifaktorerna. Exergifaktorerna för de värmerelaterade delsystemen beror i sin tur direkt på temperaturskillnaden mellan framledningen och omgivningen, vilket illustreras i ekvation (3). Under sommarhalvåret när utetemperaturen stiger kan temperaturskillnaden mellan omgivningen och fjärrvärmenätet antas minska, och därmed minskar kontrasten i systemet. Detta är en förklaring till varför värmeflödenas exergifaktorer sjunker under sommaren och ibland rör sig mot noll, vilket visas i figur 9. Det faktum att exergiverkningsgraderna sjunker, bör tolkas som att även exergiinnehållet i sommarens energiflöden minskar, enligt ekvation 7.

Utöver exergifaktorerna, beror exergimängderna i systemet även på energiflödenas storlek, enligt ekvation (3). Medan figur 9 visar exergifaktorernas tydliga säsongsvariation, visar figur 10 en tydlig skillnad mellan det grundläggande energi- och exergibehovet, vilket innebär av att endast en liten del av energigemenskapens värmebehov faktiskt består av exergi. Skillnaden mellan energi- och exergibehovet visas även i varaktighetsdiagrammet i figur 11. Där illustreras att värmebehovets toppeffekt skiljer sig markant mellan energin och motsvarande exergi under ett fåtal av årets timmar. Dessa resultat indikerar att det är låg energikvalitet som faktiskt efterfrågas i ett uppvärmningsbehov. Ett traditionellt energifokus tar endast hänsyn till den kvantitativa energimängden, vilket gör att energigemenskapen idag sannolikt dimensionerats för ett betydligt högre exergibehov än den energikvalitet (exergi) som faktiskt behöver levereras. En ytterligare observation som kan göras i figur 11 är att maxlasten av energi har en tydligare spets i sin graf, i jämförelse med motsvarande exergi som hade en flackare kurva, vilket visar att exergibehovet motsvarar en mer jämn last över årets timmar. Figur 10 och 11 avslöjar därmed att det faktiska exergibehovet över året är betydligt mer stabilt och hanterbart än vad som syns i det energibehov som vanligtvis beaktas.

Som följd av säsongsförändringar i omgivningen, visar resultaten att även exergiverkningsgraden varierar mycket över året. Resultatet för den beräknade exergiverkningsgraden presenterades både som total procentuell verkningsgrad för respektive scenario (tabell 5), och grafiskt där den timvisa variationen illustrerades (figur

13). Gällande de totala exergiverkningsgraderna uppvisade referensscenariot högst värde, följt av Scenario 1 med värmepumpen. Vidare uppvisades betydligt lägre exergiverkningsgrader hos de scenarier som inkluderade lokal värmetillförsel, där Scenario 3 uppvisade lägst prestation. För att förstå dessa totala verkningsgrader kan de timvisa variationerna analyseras för respektive scenario.

Figur 13, som illustrerar exergiverkningsgradens variation över året, indikerar en säsongsmässig obalans inom energigemenskapen. Exergiverkningsgraden i Scenario 1, 2 och 3 varierar tydligt, medan referensscenariot håller en jämnare nivå. Exergiverkningsgraden visar sig vara lägre i Scenario 1 än i referensscenariot över hela året, vilket indikerar att solelproduktionen har en negativ inverkan på denna parameter. I figuren kan observeras att exergiverkningsgraden sjunker sommartid i Scenario 1. En möjlig förklaring till detta är att medan mer solel tillförs sommartid, kvarstår ungefär samma konstanta elbehov (visas i figur 10), men uppvärmningsbehovet är sänkt som följd av högre utetemperaturer. Det sker alltså en ökad tillförsel av högvärdig el från solceller (hög exergi) utan att det finns ett ökat exergibehov i byggnaderna. Detta leder, av resultaten att döma, till en mismatchning mellan exergibehov och exergitillförsel för Scenario 1 sommartid, vilket sänker scenariots totala exergiverkningsgrad (se ekvation (6)). Högvärdig el som tillförs detta system verkar således ha begränsade möjligheter att timvis omsätta exergitillförseln till nyttigt arbete inom gemenskapen, särskilt då det inte finns någon batterilagring för att förskjuta överskottet till perioder med högre elbehov.

Vidare visar figur 13 däremot en motsatt trend gällande tidsvariationen för exergiverkningsgraden i Scenario 2 och 3, där den ökar sommartid och sjunker under de kallare månaderna. Det sker i dessa scenarier samma tillförsel av solel som i Scenario 1, så den motsatta trenden bör förstås som en effekt av övriga ingående komponenter. I Scenario 2 finns en värmepump utöver de redan diskuterade solcellerna. Värmebehovet i energigemenskapen försörjs då av el till värmepumpen i stället för importerad fjärrvärme, vilket innebär att en import av låg energikvalitet (fjärrvärme) har ersatts med en tillförsel av högsta energikvalitet (el), samtidigt som byggnadernas exergibehov förblir lågt över året. Detta resulterar i att exergitillförseln blir betydligt högre än exergibehovet, särskilt under vinterhalvåret när värmepumpen levererar mer värme och därmed använder mer högvärdig energi (el). Trots att uppvärmningsbehovet samtidigt ökar vintertid, bör den tillförda elen påverka värmepumpens exergiverkningsgrad starkare, eftersom elens exergi är betydligt högre än exergin i uppvärmningsbehovet. Detta är en tänkbar förklaring till varför grafen för Scenario 2 i figur 13 visar en lägre exergiverkningsgrad vintertid (se ekvation (6)). Motsvarande logik kan sannolikt förklara varför exergiverkningsgraden i stället stiger under sommarhalvåret. När utemperaturen ökar minskar byggnadernas uppvärmningsbehov markant, vilket bör reducera elbehovet till värmepumpen kraftigt. Systemets kvarvarande exergibehov domineras då av elbehovet (se figur 10). Eftersom detta elbehov har högsta energikvalitet och kan försörjas av solel och import med samma höga kvalitet, uppstår en god exergimatchning för elen. Den mismatchning mellan hög- och lågvärdig energi som sänkte verkningsgraden vintertid, där högvärdig el användes för

ett lågvärdigt värmebehov, försvinner alltså sannolikt nästan helt sommartid. Kvar blir en betydligt bättre exergimatchning som höjer systemets totala exergiverkningsgrad.

Gällande Scenario 3 visas i figur 13 en liknande trend, där exergiverkningsgraden ökar sommartid. Förklaringen ligger sannolikt i att kraftvärmeverkets energiproduktion styrs av energigemenskapens elbehov. Vintertid, när ingen solel tillförs, måste kraftvärmeverket täcka en stor del av elbehovet så länge dess kapacitet tillåter detta. Detta innebär att en stor mängd högvärdig energi i form av bränsle tillförs energigemenskapen. Det kan antas ske en god exergimatchning mellan elbehovet och bränsletillförseln, eftersom de båda har högt exergiinnehåll. Men då kraftvärmeverket parallellt även producerar mer värme med låg exergi under vintertid, sker en mismatchning där högvärdigt bränsle försörjer ett lågvärdigt uppvärmningsbehov. Denna mismatchning bör sannolikt sänka exergiverkningsgraden. Under sommarhalvåret tillförs i stället mer solel, vilket ofta kan antas täcka byggnadernas elbehov. Som följd kan kraftvärmeverket antas minska sin elproduktion drastiskt, vilket minskar tillförseln av högvärdigt bränsle till gemenskapen. Samtidigt är uppvärmningsbehovet reducerat. Eftersom det höga bränsleintaget (tillförd exergi) reduceras kraftigt samtidigt som systemets kvarvarande elbehov matchas direkt av högvärdig solel, förbättras exergiverkningsgraden under sommarhalvåret.

Vidare visade figur 13 stora fluktuationer av exergiverkningsgraderna, särskilt hos Scenario 2 och 3 sommartid. I Scenario 2 kan detta härledas till att värmeproduktionen styrs av energigemenskapens varierande värmebehov. Detta gör att även eltillförseln för att driva värmepumpen fluktuerar i takt med värmebehovet. När den tillförda elen med hög exergi varierar kraftigt, medan värmebehovet med låg exergi varierar mindre, kan detta ge tydlig effekt på exergiverkningsgraden timvis (ekvation (6)). Gällande Scenario 3 med kraftvärmeverket och det termiska lagret syns en mer markant fluktuation av exergiverkningsgraden sommartid i figur 12. Detta kan förklaras av att kraftvärmeverkets produktion styrs av elbehovet, efter att tillskottet från solel har dragits av. Dagtid under sommaren kan det antas ske hög tillförsel av solel vissa timmar, vilket tvingar ner kraftvärmeverkets produktion av både el och värme timvis. Samtidigt finns ett lågt exergibehov för uppvärmning (figur 10). Under dessa timmar kan det antas ske en bättre exergi-matchning mellan elbehov och eltillförsel, samt mellan värmebehov och värmertilförsel, vilket höjer exergiverkningsgraden timvis. Nattetid, när solcellerna i stället upphör att tillföra el, måste kraftvärmeverket ensamt täcka elbehovet. Detta ökar produktionen av både el och värme, vilket antas leda till en tydlig tillförsel av exergi från högvärdigt bränsle, och en resulterande sänkning av exergiverkningsgraden (ekvation (6)). Detta resultat indikerar en känslighet för säsongsvariationer och dygnsvariationer, vilket illustrerar att det kan fungera missvisande att enbart utvärdera värmeproducerande komponenter i energigemenskaper utifrån konstanta årsmedelvärden. Således belyses vikten av att även ta hänsyn till säsongsvariationer av exergiverkningsgraden vid utformning av energigemenskaper, för att effektivt utnyttja tillgänglig exergi året runt och anpassa de tekniska komponenterna bättre till omgivande klimat. Detta skulle kunna leda till en höjd årlig exergiverkningsgrad.

Vidare uppvisas även ett avvikande resultat i figur 13, där exergiverkningsgraderna under vissa sommartimmar uppvisar värden som överstiger 100%. Detta är i verkligheten omöjligt för en verkningsgrad, och kan sannolikt förklaras som en matematisk känslighet i beräkningarna. När utomhustemperaturen fluktuerar och närmar sig det lokala fjärrvärmenätets returledningstemperatur, går nämnaren i exergifaktorformeln (ekvation (3)) mot noll, vilket gör att det beräknade exergivärdet på värmen in till det lokala nätet blir lägre än den exergi som faktiskt nyttjas i byggnaderna. Detta belyser ytterligare hur känslig exergianalysen är för påverkan från omgivningsfaktorer.

Hittills har det kunnat konstateras att det finns tydliga variationer mellan de olika scenarierna med avseende på exergiverkningsgrad, där Scenario 2 och 3 uppvisar de lägsta och mest fluktuerande resultaten. Den gemensamma nämnaren som urskiljs mellan dessa fall är att energitillförseln till värmeproduktionen består av energi med exergifaktor 1, alltså ren exergi, för att tillgodose ett lokalt uppvärmningsbehov med ett lågt temperaturberoende exergivärde. Det verkar således vara just kring värmepumpen respektive kraftvärmeverket som en betydande missmatchning av exergi sker. Att använda el eller bränsle för att producera värme visar sig därmed, trots sin positiva inverkan på energimässigt oberoende mot omgivningen (tabell 5), leda till tydliga kvalitetsförluster. Som kontrast har visats att de två övriga scenarierna försörjer sina värmebehov med importerad fjärrvärme direkt från det externa nätet. Denna fjärrvärme bär på ett lågt exergivärde, och matchar bättre med exergin i byggnadernas värmebehov. Då exergiverkningsgraden beror på just denna matchning, blir exergiverkningsgraden naturligt högre i Scenario 1 och referensscenariot än i Scenario 2 och 3.

Detta resonemang stöds av resultaten i tabell 4 där värmepumpens och kraftvärmeverkets exergiverkningsgrader visas. Resultaten indikerar en väldigt tydlig likhet mellan hela energigemenskapens exergiverkningsgrad och de specifika komponenternas exergiverkningsgrader i respektive scenario (värmepumpens 44,5% i jämförelse med systemets 43%, samt kraftvärmeverkets 31,8% i jämförelse med systemets 31,39%). Den minimala differensen mellan dessa verkningsgrader indikerar att komponenternas prestation kan vara styrande när det kommer till hela gemenskapens prestation i termer av exergi. Detta då högvärdig energi omvandlas till lågvärdig energi. Resultaten indikerar samtidigt att distributionsförlusterna i det lokala fjärrvärmenätet samt eventuella kvalitetsförluster i radiatorsystem och det termiska lagret är relativt försumbara i förhållande till de som sker i värmepumpen respektive kraftvärmeverket. Gällande distributionsförlusterna stöds detta resonemang av att de håller konstant låga exergivärden, under 20 kWh (se figur 11), vilket indikerar att de bör ha en minimal påverkan på de totala kvalitetsförlusterna i energigemenskapen. Resultaten indikerar därmed att de avgörande energikvalitetsförlusterna inte sker i distributionen, utan verkar nästan uteslutande vara koncentrerade till själva energiomvandlingarna inuti värmepumpen och kraftvärmeverket, där det sker en missmatchning av energikvalitet.

6.3 Omgivningspåverkan

Diskussionsavsnittet har hittills belyst scenariernas prestationer sett till energimässigt oberoende och exergiprestanda, samt den skillnad som identifierats mellan dessa. När exergianalysen utvidgas till att studera energigemenskapens import och export mot externa nät blir det tydligt att bedömningen av vilket scenario som presterar bäst inte bara beror på om ett energi- eller exergiperspektiv antas, utan även på hur systemgränsen definieras.

Ett av de mest intressanta resultaten i detta avseende är figur 14, som visar hur stor andel av den totala fjärrvärmeimporten som består av energi utan exergi innehåll i respektive scenario. Scenario 3 uppvisar det absolut lägsta totala importbehovet, och denna import består dessutom till en majoritet av fjärrvärme med låg eller obefintlig exergi. Det syns dessutom i figur 14 att detta scenario är det alternativ vars import resulterar i störst andel exergifri energi. Medan detta vid en första anblick skulle kunna indikera att det importeras onödiga mängder energi som ändå inte kan uträtta arbete, kan det tolkas som positivt ur ett bredare energisystemperspektiv. En import som består av energi utan exergi innehåll innebär att energigemenskapen lyckas tillgodose sina behov efter lokal energitillförsel genom import av fjärrvärme med låg exergi, snarare än el. Denna fjärrvärme kan exempelvis bestå av spillvärme från industrier som därmed kan ha uträttat arbete på annan plats innan importen, vilket belystes av Power Circle (u.å.) och Vattenfall (2024) i avsnitt 2, *Bakgrund*. Att energigemenskapen i Scenario 3 klarar sig med denna typ av lågexergiimport innebär att gemenskapen avlastar elnätet, då högvärdig energi i form av el i stället kan användas i sektorer där den gör större nytta, exempelvis inom transportsektorn eller industrin. Detta står i kontrast mot Scenario 2, vars importberoende nästan helt består av el. Gällande referensscenariot och Scenario 1 syntes en tydlig import av både el och värme, och medan denna visserligen består till stor del av fjärrvärme med låg exergi, kvarstår ett stort beroende av importerad el från nätet.

Det kan observeras en korrelation mellan exergiverkningsgraden för respektive scenario och förmågan att minska importbehovet av energi från externa nät, där en lägre import även motsvarar en lägre exergiverkningsgrad. Detta indikerar att de lösningar som energimässigt avlastar externa nät bäst, är de scenarier som samtidigt hanterar energiresurser på ett termodynamiskt ineffektivt sätt lokalt. Detta väcker frågor kring hur exergiverkningsgraden bör användas som analysverktyg i lokala energisystem, där ett lågt värde i detta sammanhang inte nödvändigtvis verkar negativt sett till energigemenskapens omgivningspåverkan. Denna identifierade målkonflikt indikerar att strävan efter maximal självförsörjning kan leda till lokala energiomvandlingar och processer som oundvikligen ökar exergiförlusterna inom gemenskapen. Ur ett bredare systemperspektiv skulle en lägre exergiverkningsgrad därför kunna uppfattas som acceptabel om det huvudsakliga syftet med energigemenskapen är att avlasta elnätet och maximera användningen av egenproducerad energi. Samtidigt är detta resultat en god indikator på att det finns ett behov av att hitta fler termodynamiskt effektiva lösningar för energigemenskaper, som inte kompromissar med målet att sänka importbehovet. Exergiverkningsgraden skulle

eventuellt vara mer jämförbar med övriga parametrar om analysen expanderades till ett mer brett systemperspektiv, då en verkningsgrad för hela energikedjan potentiellt visar tydligare hur gemenskapen presterar i relation till sin omgivning.

6.4 Metoddiskussion

En aspekt relaterad till exergiverkningsgraden, som sannolikt påverkat dessa resultat är hur export hanterats. I detta arbete beaktades inte exporterad energi vid beräkning av exergiverkningsgraden. Detta då systemgränsen avser den lokala energigemenskapen och inte de externa näten, och exporterad energi transporteras utanför denna systemgräns. Men som visas i figur 14 sker en betydande och varierande årlig export i respektive scenario. I figuren framgår att scenario 3 genererar en betydande överproduktion av både el och fjärrvärme årligen, och att detta är det enda scenariot som även exporterar värme. Gällande exportens tidsvariation (figur 15) sker fjärrvärmeexporten framför allt under perioden efter sommaren. Detta beror sannolikt på det termiska lagret som ger en förskjutning av exporten, där överproduktion av värme under sommaren i första hand lagras, och sedan exporteras när lagret är fullt, vilket rimligtvis inträffar i slutet av sommaren. Om exporten av el och värme i stället skulle antas användas till nytta i det externa energisystemet hade de scenarier med hög export betraktats som mer exergieeffektiva, eftersom exporten skulle kunna subtraheras från exergitillförseln till gemenskapen (ekvation (6)). Detta då denna exergi inte förts till energigemenskapen utan i stället exporterats, och således inte tillförts för att förse energigemenskapens lokala behov. Då el har exergifaktorn 1 och Scenario 3 exporterar mest el av alla fall, skulle dess exergiverkningsgrad kunna höjas avsevärt och sannolikt överstiga Scenario 2, som exporterar en lägre mängd exergi (figur 16). Att inkludera exporten vid beräkningar av exergiverkningsgraden skulle eventuellt göra att de resulterande värdena bättre kunnat matcha de resultat som uppvisades angående scenariernas prestationer i termer av energimässigt oberoende.

De varierande resultaten mellan energimässigt oberoende och exergiverkningsgrad samt import av exergi hos de olika scenarierna belyser vikten av en systemgräns vid exergianalys av en energigemenskap. I detta fall begränsades analysen till den lokala energigemenskapen, men då syftet med energigemenskaper generellt kopplas till just omgivningen med dess el- och fjärrvärmenät, vore det även av relevans att undersöka energigemenskaper utifrån ett bredare exergiperspektiv. Utvärderingen av energigemenskaper skulle därför med fördel kunna omfatta hela kedjan, inklusive alla steg från exergin i energikällan till den slutgiltiga användningen på lokal nivå. Energigemenskapen skulle då på ett mer tydligt och omfattande sätt kunna bedömas i termer av hur väl den integreras och samverkar med det omgivande energisystemet. Med en bredare systemgräns skulle även exporten kunna inkluderas i analysen. Dessutom kan hänsyn då tas till att den importerade fjärrvärme som ledde till den lokalt höga exergiverkningsgraden i Scenario 0 och 1 i stället produceras externt, vilket kan antas medföra externa exergiförluster. Exergiverkningsgraden tog i detta fall hänsyn till exergiförluster vid produktion av lokal värme, men inte till att den importerade

fjärrvärmens produktion kan ha skett med liknande förluster. I takt med den utveckling som idag sker, där energigemenskaper spelar en avgörande roll, bör denna aspekt ses som avgörande för att säkerställa att den utveckling som sker kring smarta energilösningar i energisystemet faktiskt verkligen ger optimal systemnytta. Resultaten och den analys som hittills har gjorts bekräftar det som Wall (1992) lyfter angående systemgränsens stora betydelse i exergisammanhang.

En annan aspekt som med hög sannolikt påverkat resultaten i denna studie är att all data baserades på just Uppsala. Detta ger visserligen resultat som återspeglar en verklig och begränsad referensomgivning, men minskar samtidigt den geografiska generaliserbarheten eftersom exergiberäkningarna så starkt påverkas av omgivningstemperaturerna som används. Studien skulle kunna utökas med att jämföra olika referensomgivningars inverkan på motsvarande undersökta scenarier. Detta för att dra mer generella slutsatser som i högre grad kan appliceras på energigemenskaper som generellt koncept.

Vidare antogs att det lokala distributionsnätet var identiskt i alla scenarier, vilket är en förenkling. I verkligheten skulle skillnader i värmepumpen och kraftvärmeverkets tekniska funktion påverka temperaturerna i det lokala nätet, vilket i sin tur skulle ge upphov till varierande distributionsförluster. Att denna studie använde data med distributionsförluster som var identiska i Scenario 2 och 3 är därför inte helt realistiskt, och i framtida studier skulle en mer detaljerad analys göras med precisa data beroende på scenario och tekniska komponenter.

6.5 Framtida forskning

Resultaten indikerar några aspekter som är kan vara viktiga att beakta vid utformning av framtida energigemenskaper. Vid framtida utformning av energigemenskaper är det av stor vikt att inte endast optimera systemet mot hög självförsörjandegrad och självkonsumtion, då detta kan leda till att termodynamiska kvalitetsförluster (exergi) förbises och onödig användning av högvärdiga energikällor. Utifrån analysen i detta kapitel har flera intressanta spår för framtida forskning identifierats.

För det första vore det intressant att i en framtida studie utöka studiens komplexitet genom att använda olika framledningstemperaturer för olika byggnadstypers radiatorsystem och tappvarmvattenanvändning. Detta skulle potentiellt ge en mer realistisk bild av de exergiförluster som sker i radiatorsystemet, vilka i denna studie verkade vara små i förhållande till de värmeproducerande komponenternas förluster. Dessutom skulle distributionsförluster i det lokala nätet kunna anpassas efter respektive scenario, för att bättre återspegla verkligheten.

Framför allt vore det i en framtida studie intressant att inkludera en bredare systemgräns för att tydliggöra energigemenskapens omgivningspåverkan i de olika scenarierna. I en sådan studie vore det relevant att även göra antaganden kring hur exporterad energi används och hur detta påverkar olika prestandamått. Detta skulle med fördel kunna

kombineras med andra analyser såsom livscykelanalyser och utsläppsberäkningar, för att på en djupare nivå avgöra systemets prestanda i relation till omgivningen. Dessutom vore det av intresse att inkludera batterilagring av el i scenarierna med egen elproduktion, för att undersöka om detta skulle öka exergiverkningsgraden eller ytterligare minska belastningen på elnätet. Med koppling till exergiverkningsgraden vore det även intressant att undersöka hur värmepumpar och kraftvärmeverk kan optimeras för att öka den termodynamiska effektiviteten i de lokala systemen. Baserat på studiens resultat är detta något som sannolikt skulle öka möjligheterna att kombinera en hög exergiverkningsgrad med en hög självförsörjandegrad.

7. Slutsatser

Genom att analysera studiens mest framträdande resultat visas att den tekniska utformningen av en energigemenskap har en avgörande påverkan på dess prestanda, men att bedömningen av denna prestanda tydligt beror på vilket mått som tillämpas.

Det kan konstateras att det finns en tydlig konflikt mellan traditionella energimått för oberoende (självförsörjandegrad och självkonsumtion) och exergiverkningsgraden. Energigemenskaper med lokal värmeproduktion i kombination med solel (Scenario 2 och 3) uppvisade det högsta energimässiga oberoendet, medan de samtidigt resulterade i de lägsta exergiverkningsgraderna. Resultaten indikerar att de mest betydande termodynamiska förlusterna i dessa scenarier sker i värmepumpen respektive kraftvärmeverket, då dessa komponenter använder högvärdig energi i form av el och bränsle för att tillgodose lågvärdiga uppvärmningsbehov. Övriga exergiförluster i det lokala distributionsnätet, det termiska lagret och radiatorsystemen verkar i detta sammanhang ha en försumbar effekt på exergiverkningsgraden. Omvänt uppvisar det importberoende referensscenariot den högsta exergiverkningsgraden, vilket beror på att värmebehovet försörjs direkt av fjärrvärme med ett lågt exergivärde, vilket ger lägre energikvalitetsförluster inom energigemenskapen. Samtidigt kvarstår ett högt importberoende.

Gällande möjligheten att kombinera energimässigt oberoende med lokal exergieffektivitet kan slutsatsen dras att det med en snäv systemgräns är svårt att kombinera energimässigt självförsörjande energigemenskaper utan betydande lokala exergiförluster. Denna slutsats är dock starkt beroende av hur systemgränsen definieras. Om överskottsenergin som exporteras hade beaktats vid beräkning av exergiverkningsgraden skulle gemenskapens exergiverkningsgrad öka för de scenarion som leder till export av exergi. I detta fall skulle Scenario 3 med kraftvärmeverket sannolikt prestera bättre energimässigt, eftersom denna lösning visade sig leda till en stor export av el med hög exergi, samtidigt som mängden importerad exergi reducerades kraftigt. Resultaten indikerar således att energigemenskaper kan gynnas av att minimera importen av högvärdig energi och samtidigt möjliggöra export av el med högt exergivärde. Detta kan bidra till att både avlasta- och leverera till det omgivande elnätet

och på så sätt spara högvärdig energi till andra sektorer där den gör större nytta. Samtidigt kvarstår utmaningen med de exergiförluster som sker inom kraftvärmeverket, till följd av tillförd högvärdig energi i form av bränsle. Detta är en utmaning som behöver beaktas vid framtida planering av energigemenskaper.

Sammanfattningsvis visar studien att en utvärdering av energigemenskaper som endast baseras på självkonsumtion och självförsörjandegrad riskerar att förbise viktiga aspekter av resurseffektivitet. För att stödja utvecklingen av hållbara energisystem bör därför exergiperspektivet inkluderas som komplement till energimått vid planering av nya energigemenskaper. Studien stödjer därmed tidigare forskning av bland annat Åberg (2024) och Jansen (2014) som efterfrågar ökad användning av exergianalyser i lokala energisystem. Vidare indikerar resultaten att framtida forskning särskilt behöver fokusera på hur värmeproducerande komponenter kan utvecklas för att minska exergiförluster, samt hur exporterad el och fjärrvärme kan nyttjas runt om en energigemenskap. På så sätt kan bättre förutsättningar skapas för att kombinera energimässigt oberoende med lokal resurseffektivitet.

Referenser

- Borglund, Ann-Sofie. (2024) Mångsidig fastighet med smart energidelning. *Tidningen Energi*, 2024-09-12. Tillgänglig online: <https://www.energi.se/artiklar/2024/september-2024/mangsidig-fastighet-med-smart-energidelning/> [Hämtad: 15 maj 2026]
- Energimarknadsinspektionen (2020) *Kapacitetsutmaningen i elnäten*. Eskilstuna: Energimarknadsinspektionen. EiR2020:06. <https://ei.se/download/18.5b0e2a2a176843ef8f56cb0a/1611643287162/Kapacitetsutmaningen-i-elnet-C3%A4ten-Ei-R2020-06.pdf> [Hämtad: 2026-05-02].
- Energimyndigheten (2025) *Stora förändringar i energisystemet och utmaningar för svensk kraftvärme*. Energimyndigheten. Tillgänglig online: <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2025/stora-forandringar-i-energisystemet--och-utmaningar-for-svensk-kraftvarme/> [Hämtad: 2026-03-03].
- Europeiska kommissionen (u.å.) *Energy communities*. Europeiska Kommissionen. Tillgänglig online: https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-consumers-and-prosumers/energy-communities_en [Hämtad: 2026-06-01].
- Jansen, Sabine (2014). *Exergy Guidebook for Building Professionals*. Delft: Delft University of Technology. Tillgänglig online: https://klimapedia.nl/wp-content/uploads/2014/10/Exergy-Guidebook-for-Building-Professionals_version-2.1_Nov2014.pdf [Hämtad: 2026-04-14].
- Johari, Fatemeh, Shadram, Farshid och Widén, Joakim (2023). Urban building energy modeling from geo-referenced energy performance certificate data: Development, calibration, and validation. *Sustainable Cities and Society*, 96. doi: 10.1016/j.scs.2023.104664.
- Karim, Azharul, Burnett, Ashley och Fawzia, Sabrina (2018). Investigation of Stratified Thermal Storage Tank Performance for Heating and Cooling Applications. *Energies*, 11, s. 1049. doi: 10.3390/en11051049.
- Levin, Per (2010). *Brukarindata för energiberäkningar i kontor - vägledning*. Stockholm: Sveby. Tillgänglig online: <https://www.sveby.org/wp-content/uploads/2012/01/Brukarindata-Kontor.pdf> [Hämtad: 2026-04-07].
- Levin, Per (2016) *Sveby PM - hantering av tappvarmvattenenergianvändning i beräkning, mätning och verifiering*. Tillgänglig online: <https://www.sveby.org/wp-content/uploads/2016/07/Sveby-PM-tappvarmvatten-160621.pdf> [Hämtad: 2026-05-07].
- Mahian, Omid, Reza Mirzaie, Mohammad, Kasaeian, Alibakhsh och Hossein Mousavi, Seyed (2020). Exergy analysis in combined heat and power systems: A review. *Energy Conversion and Management*, 226. doi: 10.1016/j.enconman.2020.113467.

- Morén, Göran, Upphagen, Marie, Carlén, Anna, Nässén, Per och Tedebrand, Lars (2025). *Energidelning*. Eskilstuna: Energimarknadsinspektionen. Ei R2025:01. Tillgänglig online: <https://ei.se/download/18.7d378150193deb65c61181ac/1737382889566/Energidelning-Ei-R2025-01.pdf> [Hämtad: 2026-04-26].
- Napolitano, Davide. (2026) Load changes and heat temperature demands in future Swedish energy communities. I: *2026 ECEEE Summer study on Energy Efficiency*, Center Parcs, Lac d'Ailette, Frankrike, 1-6 juni. Under publicering.
- Nationalencyklopedin (u.å. a) Exergi. Tillgänglig online: <https://www-ne-se.ezproxy.its.uu.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/exergi?isSearchResult=true> [Hämtad 2026-04-26].
- Nationalencyklopedin (u.å. b) Termodynamik. Tillgänglig online: <https://www-ne-se.ezproxy.its.uu.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/termodynamik?isSearchResult=true> [Hämtad: 2026-06-01].
- Naturvårdsverket (2024) *Klimatet och energin*. Naturvårdsverket. Tillgänglig online: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/omraden/klimatet-och-energin/> [Hämtad: 2023-06-03].
- Olsson, Marika och Hansson, Julia (2024). *Kritiska råmaterial i energisystemet ur ett miljöperspektiv - en översikt i ljuset av Ukrainakriget*. IVL Svenska Miljöinstitutet. Tillgänglig online: https://energiforsk.se/media/33146/1_2024_pm_ukrainakriget-och-kritiskaramaterial.pdf [Hämtad: 2026-06-09].
- Persson, Agneta och Larsson, Ola (2009). *Syntes om energieffektivisering - En syntes av ett urval rapporter från forskningsprogrammet Fjärrsyn 2006-2009*. Svensk fjärrvärme. 2009:40. Tillgänglig online: <https://www.energimyndigheten.se/4a4cd2/contentassets/3db885888eb44113971b10e4568d8941/syntes-om-energieffektivisering---2009.pdf> [Hämtad: 2026-05-08].
- Power Circle (u.å.) *Smart förnybart i energisystemet*. Länsstyrelsen Skåne. Tillgänglig online: https://powercircle.org/wp-content/uploads/2021/08/2_Vind-och-sol-beho%CC%88ver-smart-integrering-i-energisystemet_k4.pdf [Hämtad: 2026-05-02].
- Region Stockholm (2025). *Fjärrvärme för framtiden – en nyckel till ett robust och hållbart energisystem*. Stockholm: Region Stockholm. Tillgänglig online: <https://www.regionstockholm.se/496d27/contentassets/5b01f60d89e0408bbb0b4813af09b46f/fjarrvarme-for-framtiden---en-nyckel-till-ett-robust-och-hallbart-energisystem.pdf> [Hämtad: 2026-04-26].
- Rosen, Marc A (2004). Exergy Analysis of Energy Systems. *Encyclopedia of Energy*. s. 607–621. doi: doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00129-7.

- Rosen, Marc A (2001). The exergy of stratified thermal energy storages. *Solar Energy*, 71(3), s. 173–185. Doi: 10.1016/S0038-092X(01)00036-6.
- Rydegran, Eva (2021). *Kraftvärme*. Energiföretagen. Tillgänglig online: <https://www.energiforetagen.se/energifakta/elsystemet/produktion/kraftvarme/> [Hämtad: 2026-06-03].
- Samoteeva, Oxana (2022). *Termisk energilargring*. KTH. Tillgänglig online: <https://www.energy.kth.se/sv/applied-thermodynamics/key-research-areas/thermal-energy-storage-1.1082351> [Hämtad: 2026-05-23].
- Stockholm Exergi AB (u.å.) *Fjärrvärmens avlastar elsystemet*. Stockholm Exergi AB. Tillgänglig online: <https://www.stockholmexergi.se/vi-bidrar-till-att-halla-elsystemet-stabilt/fjarrvarmen-och-elen/> [Hämtad: 2026-04-07].
- Sundelöf, Johanna (2026). *Energigemenskaper för ett mer robust energisystem*. Energimyndigheten. Tillgänglig online: <https://www.energimyndigheten.se/energisystem-och-analys/energisystem-och-analys/energigemenskaper-en-viktig-del-av-framtidens-energisystem/> [Hämtad: 2026-05-04].
- Vattenfall (2024) *Välj rätt värmekälla - expertens tips*. Tillgänglig online: Vattenfall. <https://www.vattenfall.se/fokus/tips-rad/olika-varmekallor/> [Hämtad: 2026-04-20].
- Vattenfall (u.å.) *Kapacitet och flexibilitet*. Vattenfall. Tillgänglig online: <https://www.vattenfalleldistribution.se/var-verksamhet/om-elnetet/kapacitet/> [Hämtad: 2026-06-03].
- Wall, Göran (1992) *Exergi, helhetssyn och intelligens - en tillämpning på Västerås*. Västerås: Mälardalens högskola. Tillgänglig online: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:318568/FULLTEXT01.pdf> [Hämtad: 2026-02-27].
- Åberg, Magnus (2024). *Exergigemenskaper - för ett resurseffektivt energisystem*. Stockholm: Energiforsk. 2024:1064. Tillgänglig online: <https://energiforsk.se/media/34266/2024-1064-exergigemenskaper-fo-r-ett-resurseffektivt-energisystem.pdf> [Hämtad: 2026-02-27].