



UPPSALA  
UNIVERSITET

Serienummer

Examensarbete 30 hp

Juni 2026

# Systemeffekter av överskottsvärme i fjärrvärmesystemen i Uppsala och Stockholm

En studie som undersöker potentialen att nyttja  
överskottsvärme från Forsmarks kärnkraftverk

---

Sofia af Ekenstam & Anna Sterner



UPPSALA  
UNIVERSITET

## System Effects of Surplus Heat in the District Heating Systems of Uppsala and Stockholm: A Study Investigating the Potential for Utilizing Surplus Heat from Forsmark Nuclear Power Plant.

---

Sofia af Ekenstam & Anna Sterner

### Abstract

This study analyzes the system effects of integrating surplus heat from Forsmark Nuclear Power Plant into the district heating systems of Stockholm and Uppsala. Using scenario-based modeling with a MATLAB-based simulation tool, the impact on production mix, system costs, and CO<sub>2</sub> emissions was examined under varying conditions.

Results show that surplus heat priced at 336-354 SEK/MWh reduces total system costs in both cities, primarily displacing biofuel-based production and oil while waste incineration remains as base load. Uppsala showed greater integration potential than Stockholm, where combined heat and power production stays highly competitive due to electricity revenues. Electricity and biofuel prices were identified as the most decisive factors for surplus heat competitiveness.

Scenarios without waste incineration yielded the largest CO<sub>2</sub> reductions but significantly higher costs, illustrating a tension between economic and climate optimization. However, in this scenario, the surplus heat was shown to be even more effective in reducing the total system cost. The study concludes that surplus heat from Forsmark has potential to improve both cost efficiency and climate performance, though its role remains strongly dependent on future energy prices, heat demand, and policy frameworks.

**Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten**

**Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala**

Handledare: Åse Linné Ämnesgranskare: Magnus Åberg

Examinator: Elísabet Andrésdóttir

# Populärvetenskaplig sammanfattning

Sverige står inför stora utmaningar i energiomställningen. Samhället elektrifieras i snabb takt samtidigt som klimatutsläppen behöver minska. En viktig del av energisystemet är fjärrvärmen, som idag står för ungefär hälften av all uppvärmning i landet. Samtidigt finns stora mängder energi som inte tas tillvara. Vid Forsmarks kärnkraftverk omvandlas endast ungefär en tredjedel av energin till el, medan resten försvinner som överskottsvärme till Östersjön.

Denna studie har undersökt möjligheten att använda denna överskottsvärme för att värma bostäder och lokaler i Uppsala och Stockholm genom fjärrvärmenäten. Genom simuleringar analyserades hur fjärrvärmesystemens kostnader, utsläpp och produktionsmix skulle påverkas om överskottsvärme från Forsmark integrerades i systemen. Detta gjordes med hjälp av olika scenarier om hur fjärrvärmesystemen kan se ut i framtiden, med överskottsvärmen integrerad.

Resultaten visar att överskottsvärmen framför allt skulle ersätta värmeproduktion baserad på biobränslen och olja. Avfallsförbränning, som idag utgör en viktig del av fjärrvärmens basproduktion, fortsätter däremot att vara konkurrenskraftig även när överskottsvärmen introduceras. Vidare blev effekterna av integreringen av överskottsvärmen tydligare i Uppsala än i Stockholm. Detta var bland annat på grund av att Stockholms fjärrvärmesystem innehåller fler kraftvärmeverk som samtidigt producerar och därmed säljer el, och på så sätt har starkare ekonomisk konkurrenskraft.

En av de viktigaste slutsatserna är att överskottsvärme har potential att minska kostnaderna i fjärrvärmesystem. Integreringen av överskottsvärme resulterade i lägre totala systemkostnader i samtliga analyserade scenarier jämfört med motsvarande scenario före integreringen. Besparingarna blev särskilt stora i scenarier där priserna på biobränslen var höga, när värmebehovet ökade samt när avfallsförbränningen exkluderades från systemet. Resultaten tyder därför på att överskottsvärme från Forsmark kan vara ett kostnadseffektivt komplement till dagens värmeproduktion.

Studien visar också att klimatpåverkan minskar när överskottsvärmen används. I alla undersökta scenarier sjönk koldioxidutsläppen från fjärrvärmeproduktionen vid integrering av överskottsvärmen. Detta beror främst på att överskottsvärmen ersätter produktion från anläggningar som använder bland annat olja och därmed ger upphov till utsläpp. Integrering av överskottsvärme kan därför bidra till Sveriges långsiktiga klimatmål och minska beroendet av bränslebaserad värmeproduktion.

Samtidigt finns viktiga frågor kvar att utreda. Denna studie har endast analyserat driften av fjärrvärmesystemen och inte ytterligare kostnader eller CO<sub>2</sub>-utsläpp för omkringliggande infrastruktur som krävs för att nyttja överskottsvärmen från Forsmark. Dessutom måste framtida lösningar ta hänsyn till driftsäkerhet och reservkapacitet, eftersom fjärrvärmesystemen behöver fungera även vid eventuella driftstopp i kärnkraftverket.

Sammanfattningsvis visar studien att överskottsvärme från Forsmarks kärnkraftverk har potential att bli en värdefull resurs för framtidens fjärrvärme. Genom att ta tillvara energi som idag går förlorad kan fjärrvärmesystemen minska både kostnader och klimatpåverkan. Hur stor nyttan blir i praktiken beror dock på flera faktorer, bland annat framtida bränslepriser, elpriser samt värmebehovet i fjärrvärmenäten. Resultaten pekar på att överskottsvärme från kärnkraft kan vara ett potentiellt komplement till dagens värmeproduktion och bidra till ett mer resurseffektivt energisystem.

# Innehållsförteckning

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Inledning.....</b>                                                | <b>1</b>  |
| 1.1 Syfte och frågeställningar.....                                     | 2         |
| 1.2 Avgränsningar.....                                                  | 2         |
| <b>2. Bakgrund.....</b>                                                 | <b>2</b>  |
| 2.1 Tidigare forskning.....                                             | 2         |
| 2.1.1 System med överskottsvärme från kärnkraft i fjärrvärmesystem..... | 3         |
| 2.1.2 Tidigare studier - Forsmarks överskottsvärme.....                 | 3         |
| 2.1.3 Forskningsgap.....                                                | 4         |
| 2.2 Fjärrvärme.....                                                     | 5         |
| 2.2.1 Bakgrund fjärrvärme.....                                          | 5         |
| 2.2.2 Fjärrvärme i Stockholm och Uppsala.....                           | 5         |
| 2.2.3 Bränslen för fjärrvärme.....                                      | 6         |
| <b>3. Metod.....</b>                                                    | <b>7</b>  |
| 3.1 Simuleringsverktyg.....                                             | 8         |
| 3.2 Data.....                                                           | 9         |
| 3.2.1 Fjärrvärmesystemen Uppsala och Stockholm.....                     | 9         |
| 3.2.2 Bränslekostnader.....                                             | 14        |
| 3.3 Fjärrvärmemodell.....                                               | 16        |
| 3.3.1 Uppsala.....                                                      | 16        |
| 3.3.2 Stockholm.....                                                    | 17        |
| 3.4 Validering.....                                                     | 18        |
| 3.4.1 Uppsala.....                                                      | 18        |
| 3.4.2 Stockholm.....                                                    | 19        |
| 3.5 CO <sub>2</sub> -beräkningar.....                                   | 21        |
| 3.6 Scenarier.....                                                      | 21        |
| 3.6.1 Val av scenarioanalys.....                                        | 21        |
| 3.6.2 Övergripande kring studiens scenarier.....                        | 22        |
| 3.6.3 Scenarion 1: Basfall.....                                         | 22        |
| 3.6.4 Scenario 2: Svenssons scenarier.....                              | 23        |
| 3.6.5 Scenario 3: Endast överskottsvärme.....                           | 23        |
| 3.6.6 Scenario 4: Överskottsvärme och avfall.....                       | 23        |
| 3.6.7 Scenario 5: Utan avfall.....                                      | 24        |
| 3.6.8 Scenario 6: Pensionerade anläggningar.....                        | 24        |
| 3.6.9 Sammanställning Scenarier.....                                    | 25        |
| 3.7 Känslighetsanalys.....                                              | 26        |
| 3.7.1 El- och bibränslepriser.....                                      | 26        |
| 3.7.2 Värmelast.....                                                    | 27        |
| 3.7.3 Avgränsningar.....                                                | 28        |
| <b>4. Resultat.....</b>                                                 | <b>28</b> |
| 4.1 Uppsala.....                                                        | 28        |
| 4.1.1 Scenario 1: Basfall.....                                          | 31        |
| 4.1.2 Scenario 2: Svenssons scenarier.....                              | 32        |
| 4.1.3 Scenario 3: Endast överskottsvärme.....                           | 33        |

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.4 Scenario 4: Överskottsvärme och avfall..... | 33        |
| 4.1.5 Scenario 5: Utan avfall.....                | 35        |
| 4.1.6 Scenario 6: Pensionerade anläggningar.....  | 36        |
| 4.2 Stockholm.....                                | 37        |
| 4.2.1 Scenario 1: Basfall.....                    | 40        |
| 4.2.2 Scenario 2: Svenssons scenarier.....        | 41        |
| 4.2.3 Scenario 3: Endast överskottsvärme.....     | 42        |
| 4.2.4 Scenario 4: Överskottsvärme och avfall..... | 42        |
| 4.2.5 Scenario 5: Utan avfall.....                | 44        |
| 4.2.6 Scenario 6: Pensionerade anläggningar.....  | 45        |
| 4.3 Känslighetsanalys.....                        | 46        |
| 4.3.1 El- och biobränslepriser.....               | 46        |
| 4.3.2 Värmelast.....                              | 51        |
| <b>5. Diskussion.....</b>                         | <b>52</b> |
| 5.1 Trovärdighet.....                             | 57        |
| <b>6. Slutsats.....</b>                           | <b>58</b> |

# 1. Inledning

Sveriges energisystem befinner sig i en omfattande omställning där elektrifiering, klimatmål och försörjningstrygghet är centrala frågor. Fjärrvärme spelar en viktig roll i det svenska energisystemet och står idag för omkring hälften av all uppvärmning i Sverige (Vattenfall, 2025b). Genom centraliserad värmeproduktion möjliggör fjärrvärmesystemen ett effektivt nyttjande av olika energikällor. Fjärrvärmesystemen har även en viktig funktion genom att avlasta elsystemet, eftersom stora delar av samhällets uppvärmningsbehov kan tillgodoses utan direkt elanvändning (Vattenfall, 2025b). Samtidigt har de ekonomiska förutsättningarna för fjärrvärme förändrats under senare år. Priserna på biobränslen har ökat kraftigt sedan 2022, bland annat till följd av Rysslands invasion av Ukraina och förändrade handelsflöden för skogsråvaror och bränslen (Hallman, 2025). I ljuset av biobränslets stora prisökning, i kombination med målet om nettonollutsläpp till år 2045 (Regeringskansliet, 2023), har incitamenten stärkts för att utreda alternativa, storskaliga och klimatneutrala värmekällor.

Parallellt har det skett en svängning i den politiska opinionen i Sverige, som idag uppvisar en betydligt mer positiv inställning till kärnkraftens roll i energisystemet (Svenska Näringsliv, 2025). Utöver elproduktion genererar kärnkraftverk enorma mängder termisk energi. Eftersom verkningsgraden i ett kärnkraftverk ligger på omkring 35 procent omvandlas endast en tredjedel av den frigjorda energin till elektricitet, medan resterande två tredjedelar leds bort som överskottsvärme via kylsystemet (Naturskyddsföreningen, 2021). Vid Forsmarks kärnkraftverk dumpas cirka 40 kubikmeter kylvatten per sekund direkt ut i Östersjön, med en temperatur som är ungefär 10 grader varmare än omgivningen (Länsstyrelsen, 2011). Det finns därmed incitament att undersöka potentialen av att tillvarata denna idag oanvända energi, för att öka det totala energisystemets resurseffektivitet.

Ett förslag på hur överskottsvärmen ska tillvaratas är genom att integrera den i fjärrvärmesystem. Det har genomförts tidigare studier på detta, som främst har fokuserat på den tekniska och ekonomiska genomförbarheten av att använda överskottsvärme från Forsmark. Elforsk (2011) analyserade projektets lönsamhet och konstaterade att de höga investeringskostnaderna för transmissionsledningar vid den tiden gjorde projektet svårt att motivera ekonomiskt. En nyare studie av Svensson (2025), visar däremot att förändrade bränslepriser och energipolitiska förutsättningar har förbättrat de ekonomiska möjligheterna att integrera överskottsvärmen i fjärrvärmesystemen.

Mot denna bakgrund har Vattenfall Research & Development (R&D) initierat en genomförbarhetsstudie som syftar till att vidare analysera tekniska, ekonomiska och systemrelaterade aspekter kopplade till möjligheten att utnyttja överskottsvärmen från Forsmark. Det genomförs därför tre examensarbeten inom ramen för detta projekt under våren 2026. Två av arbetena syftar till att undersöka projektets affärsmässiga förutsättningar respektive sociala, regelmässiga och miljömässiga aspekter av rörläggningen mellan Forsmark och Uppsala samt Stockholm. Det examensarbete som presenteras i denna rapport syftar till att analysera olika systemaspekter kopplade till implementering av överskottsvärme

från Forsmarks kärnkraftverk i Stockholms och Uppsalas fjärrvärmenät. Det finns ett intresse att undersöka hur överskottsvärmen påverkar produktionsmix, driftmönster, kostnader och klimatpåverkan i systemen. Studien fokuserar därför på att utvärdera dessa effekter och belysa vilka konsekvenser integreringen av överskottsvärmen får för fjärrvärmesystemen ur ett systemperspektiv.

## 1.1 Syfte och frågeställningar

Syftet med detta examensarbete är att analysera vilka systemmässiga förutsättningar som finns för att överskottsvärme från Forsmarks kärnkraftverk ska kunna integreras i fjärrvärmesystemen i Stockholm och Uppsala. Genom scenariobaserad modellering och simulering av fjärrvärmesystemen i de två städerna undersöks påverkan på produktionsmixen, systemkostnaderna och koldioxidutsläppen av en introduktion av överskottsvärmen från Forsmark. För att uppnå syftet ämnas följande frågeställningar att besvaras.

1. Hur förändras produktionsmixen i fjärrvärmesystemen i Uppsala och Stockholm när överskottsvärme från Forsmark introduceras?
2. Hur påverkas fjärrvärmesystemens totala produktionskostnader genom integreringen av överskottsvärme från Forsmark?
3. Vilka ekonomiska tröskelvärden avgör överskottsvärmens konkurrenskraft gentemot befintliga produktionsanläggningar?
4. Hur förändras de totala koldioxidutsläppen från fjärrvärmeproduktionen när överskottsvärmen från Forsmark introduceras?

## 1.2 Avgränsningar

Detta arbete syftar enbart till att undersöka hur integreringen av överskottsvärme från Forsmarks kärnkraftverk påverkar fjärrvärmesystemens drift. De kostnads- och utsläppsberäkningar som presenteras är därför begränsade till driftsrelaterade aspekter och omfattar varken underhåll, renovering eller utbyggnad av anläggningar. Försättningsvis inkluderas endast värmeproduktionen i arbetets utredning, och därmed har möjlig fjärrkyla- och ångproduktion från fjärrvärmesystemen utesluts.

## 2. Bakgrund

I detta kapitel presenteras den bakgrund som är nödvändig för att förstå studiens kontext och förutsättningar. Inledningsvis behandlas tidigare forskning relevant för ämnet. Därefter ges en övergripande beskrivning av fjärrvärme, följt av en kort introduktion till fjärrvärmesystemen i de två studerade städerna samt de bränslen som används i dessa system.

## 2.1 Tidigare forskning

I avsnittet om tidigare forskning presenteras inledningsvis exempel på befintliga fjärrvärmesystem där överskottsvärme från kärnkraftverk eller industrier används som värmekälla. Därefter redogörs för tidigare studier inom det projekt som denna rapport behandlar. Avslutningsvis identifieras och beskrivs det forskningsgap som föreliggande studie avser att undersöka.

### 2.1.1 System med överskottsvärme från kärnkraft i fjärrvärmesystem

Det finns exempel där överskottsvärme från kärnkraftverk tas tillvara i fjärrvärmesystem idag. Ett sådant exempel är vid Beznau kärnkraftverk i Schweiz, där överskottsvärme används i fjärrvärmenätet Refuna. Där tas värme från kraftverkets ångsystem tillvara och överförs via värmeväxlare till det regionala fjärrvärmenätet (Axpo, 2021). Systemet försörjer omkring 2600 byggnader i flera kommuner i regionen med värme och levererar omkring 170 GWh värme per år. Fjärrvärmesystemet Refuna byggdes specifikt för att tillvarata överskottsvärme från anläggningen. Överskottsvärmen integrerades därmed inte i konkurrens med andra värmeproduktionsanläggningar, utan fungerar istället som den huvudsakliga värmekällan i fjärrvärmesystemet (Axpo, 2021).

Fortsättningsvis, har intresset för att undersöka hur överskottsvärme kan tas tillvara för att öka energieffektiviteten i energisystemet ökat i Norden. I Finland har exempelvis ett samarbete mellan industriföretaget Lohja Oy och fjärrvärmebolaget Loviisan Lämpö Oy lett till att överskottsvärme från industriproduktion kan återvinnas och levereras till det lokala fjärrvärmenätet. Överskottsvärmen integreras därmed i ett redan befintligt fjärrvärmesystem, där den återvunna värmen uppskattas täcka upp till omkring en fjärdedel av stadens fjärrvärmebehov. Det i sin tur minskar behovet av värmeproduktion baserad på förbränning och bidrar till ett mer resurseffektivt energisystem (Lohja, u.å.).

### 2.1.2 Tidigare studier - Forsmarks överskottsvärme

Möjligheten att introducera överskottsvärme från Forsmark till fjärrvärmesystemen i Stockholm och Uppsala har tidigare undersökts, främst med fokus på ekonomisk genomförbarhet. Elforsk genomförde 2011 en studie för att undersöka potentialen i ett sådant projekt. I studien testades två scenarier med en installerad kapacitet av överskottsvärmen på 1000 respektive 1500 MW i Stockholm, och resultaten jämfördes med ett basfall utan några förändringar. Även möjligheten att koppla ledningarna med överskottsvärme till Uppsalas fjärrvärmenät undersöktes, där de installerade kapaciteterna sattes till 50 respektive 100 MW. Studiens resultat visade att det vid denna tidpunkt inte bedömdes som lönsamt att använda överskottsvärmen i fjärrvärmenäten. Systemkostnaderna för fjärrvärmesystemen beräknades bli högre med introduktion av överskottsvärme, till stor del som en konsekvens av de stora investeringskostnader som skulle krävas för bygget av transmissionsledningar. Projektets lönsamhet förbättrades i scenariot med en högre installerad kapacitet samt när Uppsala kopplades in i systemet, men inte tillräckligt mycket för att det skulle bli ekonomiskt lönsamt i förhållande till basfallet. Genom en känslighetsanalys påvisade studien att resultaten

påverkas av förändrade bränslepriser, där en högre kostnad för bränslen skulle innebära ett bättre ekonomiskt incitament för att introducera överskottsvärmen (Elforsk, 2011).

Vidare genomfördes en liknande utredning genom ett examensarbete av Hampus Svensson 2025, där den tekniska och ekonomiska genomförbarheten av att använda överskottsvärmen från Forsmark i fjärrvärmenäten i Stockholm och Uppsala undersöktes. Svensson analyserade hur transmissionsledningarna kan utformas på ett tekniskt optimalt och samtidigt så kostnadseffektivt sätt som möjligt, samt vilken kostnad överskottsvärmen skulle ha under dessa förutsättningar. Studien utgick från samma scenarier som Elforsk analyserade, men inkluderade även ett scenario som optimerades utifrån kostnad. Till skillnad från Elforsks studie visade resultaten att det vid denna period fanns ekonomiska incitament att utnyttja överskottsvärmen, då de totala systemkostnaderna för fjärrvärmen sågs minska vid introduktionen av överskottsvärme. För scenariot med installerade effekter på 1000/50 MW, för Stockholm respektive Uppsala, beräknades kostnaden för överskottsvärmen till 354 kr/MWh, för scenariot med 1500/100 MW till 341 kr/MWh och för det kostnadsoptimala scenariot med installerade effekter på 1940/436 MW till 336 kr/MWh. I Svenssons kostnadsberäkningar ingår de investeringar i infrastruktur som projektet kräver, såsom rörledningar och dess dimensioner samt pumpstationer. Beräkningarna tar även hänsyn till systemets årliga driftkostnader samt dess förväntade livslängd.

Svensson beskriver hur de förändrade ekonomiska förutsättningarna sedan utredningen 2011 innebar en mer gynnsam situation för användning av överskottsvärmen, i och med höjda biobränslekostnader och utökade energipolitiska styrmedel för fossilfri energi. Vidare analyserades scenarier med minskad avfallsförbränning, mot bakgrund av ambitionen att reducera koldioxidutsläpp och nå nettonollutsläpp till 2045. I dessa scenarier blev överskottsvärme ännu mer konkurrenskraftig på fjärrvärmemarknaden, vilket innebär att dess värde och nytta bedömdes öka ytterligare i ett sådant framtidsscenario (Svensson, 2025).

### **2.1.3 Forskningsgap**

Att ta tillvara överskottsvärme i fjärrvärmesystem har, genom exemplen från Schweiz och Finland, visat sig vara genomförbart i praktiken. Dessa fall visar att värme som annars skulle gå förlorad kan nyttiggöras och därmed bidra till mer resurseffektiva fjärrvärmenät. Fjärrvärmesystemet Refuna i Schweiz byggdes specifikt för att ta tillvara överskottsvärme från kärnkraft, vilket innebär att det inte fanns befintliga fjärrvärmeproduktionsanläggningar som påverkades av den nya värmekällan. Systemeffekter från detta fall är därför inte direkt applicerbara på det aktuella projektet. I fallet med Loviisas fjärrvärmenät integreras dock överskottsvärmen i ett redan existerande fjärrvärmesystem. Samtidigt skiljer sig fjärrvärmesystemen i Stockholm och Uppsala från systemet i detta exempel, och det kan inte antas att förutsättningarna i dessa är lika. Vid en analys av möjligheten att använda överskottsvärme från Forsmark behöver därför specifika förutsättningar och egenskaper i fjärrvärmesystemen i Uppsala och Stockholm tas i beaktande.

Resultaten från Svenssons studie 2025 visar att det kan finnas ekonomiska incitament för att introducera överskottsvärmen i Stockholms och Uppsalas fjärrvärmesystem, vilket ger ett intresse att undersöka projektet vidare. De tidigare studierna kring att använda överskottsvärmen från Forsmark har främst erbjudit en analys kring den ekonomiska genomförbarheten av projektet, medan det saknas en vidare analys av möjliga systemeffekter på fjärrvärmesystemen som introduktionen av en ny värmekälla skulle innebära. En sådan analys syftar därför denna rapport att bidra med. De olika resultaten av Elforsks (2011) och Svenssons (2025) rapporter betonar också hur olika ekonomiska och politiska situationer påverkar förutsättningarna för projektet. Detta belyser vikten av en känslighetsanalys av studiens inparametrar.

## 2.2 Fjärrvärme

Avsnittet inleds med en kort introduktion till fjärrvärme. Därefter ges en övergripande beskrivning av fjärrvärmens roll och utformning i Stockholm och Uppsala. Avslutningsvis presenteras relevant information om de bränslen som idag utgör de huvudsakliga energikällorna i svenska fjärrvärmesystem.

### 2.2.1 Bakgrund fjärrvärme

Idag är fjärrvärme den vanligaste uppvärmningsmetoden i Sverige, då den står för ungefär hälften av all uppvärmning i landet. I ett fjärrvärmesystem produceras varmvatten i en central anläggning och distribueras därefter till fastigheterna, vilket innebär att fastigheterna inte behöver ha egna värmekällor (Energiföretagen, u.å.). Fjärrvärmens används både för att värma upp bostaden och förse den med varmvatten. Utöver detta används fjärrvärme bland annat till markvärme för att få undan snö och is från gator och torg (Vattenfall, u.å.f.). Idag består basproduktionen av fjärrvärme i Sverige främst av avfall och fasta biobränslen som skogsflis, pellets och returträ. Utöver det bidrar också värmepumpsanläggningar och förbränning av bioolja samt eldningsolja till fjärrvärmeproduktionen (Energiföretagen, 2024a).

Förutom att förse en stabil värmetillförsel utgör fjärrvärmens en viktig roll för att avlasta elnätet. Genom att fjärrvärmens står för en stor del av uppvärmningen i samhället kan elproduktionen istället användas inom andra sektorer än för uppvärmning. I och med energiomställningen och en ökad elektrifiering av samhället så är elnätet hårt belastat, och avlastningen från fjärrvärmens blir än mer betydande. Fjärrvärmesystemet kan också stötta upp elnätet genom att vissa anläggningar producerar kraftvärme, där både värme och el produceras. En sådan lokal och planerbar källa till elproduktion kan vara värdefull när behovet av el är som störst (Vattenfall, 2025b).

### 2.2.2 Fjärrvärme i Stockholm och Uppsala

Stockholms tätort är Sveriges mest befolkade, med cirka 1 650 000 invånare (NE, 2024). Fjärrvärme utgör en central del av uppvärmningen i Stockholm och täcker omkring 75 procent av länets totala värmebehov (REST, 2023). Fjärrvärmesystemet i Stockholm består av värmeproduktion från flera olika bolag, och 2024 uppgick värmeproduktionen till 12 073

GWh (Stockholm Exergi, 2026c; Söderenergi, 2024; Norrenergi, 2024; Vattenfall, u.å.d; E.ON, 2026). Kraftvärmeverken i Stockholms län bidrar med elproduktion som möter cirka 10% av länets totala elbehov (Region Stockholm, 2023). Den största delen av fjärrvärmeproduktionen i Stockholms län kommer från förbränning av biobränslen och biooljor, vilka 2024 stod för 40% av produktionen. Restavfall stod under samma år för 28% av värmeproduktionen, och den resterande produktionen kommer från bland annat värmepumpar och fossil olja (Stockholm Exergi, 2026; Söderenergi, 2025; Norrenergi, 2024; Vattenfall, u.å.d; E.ON, 2026).

Uppsala är beläget 70 km norr om Stockholm, och befolkningen i kommunen uppgår till omkring 250 000 invånare (Uppsala kommun, 2026). Fjärrvärme används i stor utsträckning i kommunen för uppvärmning av fastigheter, tappvarmvatten och uppvärmning av gator. Uppemot 95 procent av alla fastigheter i Uppsala värms med fjärrvärme, däribland cirka 76 000 hushåll (Vattenfall, u.å.h). Den totala fjärrvärmeproduktionen i kommunen uppgick 2024 till 1 812 GWh (SCB, 2024). Den största delen av den producerade värmen kommer från avfallsförbränning, vilken 2025 stod för omkring 60% av produktionen. Utöver det utgörs värmeproduktionen av förbränning av biobränslen, värmepumpar samt oljepannor som används för spetsproduktion (Uppsala kommun, 2025).

### **2.2.3 Bränslen för fjärrvärme**

Avfall är ett av de vanligaste bränslen att använda för att generera värme som nyttjas i fjärrvärmenätet. Det avfall som förbränns består huvudsakligen av material som inte kan återanvändas eller materialåtervinnas, och används därför för energiåtervinning (Vattenfall, u.å.g). Sverige är ledande i Europa vad gäller energiutvinning från avfall, med en genomsnittlig energiutvinning på cirka 3 MWh per ton (Avfall Sverige, 2025). Följaktligen importerar Sverige betydande mängder avfall från andra europeiska länder, som betalar för att få sitt avfall behandlat. Försättningsvis ansvarar kommunerna i Sverige för avfallshanteringen och betalar fjärrvärmebolagen för att omhänderta avfallet genom förbränning (Naturvårdsverket, 2025b). Denna ersättning, i form av en mottagaravgift, syftar till att bland annat täcka anläggningarnas driftkostnader (Sveriges Riksdag, 2017). Eftersom både importerat och inhemskt avfall hanteras av fjärrvärmebolagen mot ersättning, får avfall som bränsle en negativ kostnad och blir därmed ekonomiskt fördelaktigt. Det är samtidigt viktigt att ta hänsyn till avfallsförbränningens klimatpåverkan. År 2024 stod el- och fjärrvärmeproduktionen för cirka 8% av Sveriges totala koldioxidutsläpp, varav 81% kom från avfallsförbränning (Naturvårdsverket, 2025a).

Vidare används biobränsle i stor utsträckning för fjärrvärme. Biobränsle innefattar både oprocessat och processat trä samt bioolja. Oprocessat trä inkluderar exempelvis flis, stammar, grenar och returträ, och processat biobränsle syftar framförallt på pellets. Priserna för de olika biobränsletyperna har samtliga genomgått en tydlig prisökning de senaste åren. Prisökningarna kan kopplas till den stoppade handeln med Ryssland och Belarus till följd av kriget i Ukraina, vilket har inneburit ett minskat utbud av skogsråvaror och biprodukter som används för bränsle. Minskad sågverksproduktion och försämrade byggkonjunkturer har vidare

inneburit en minskad tillgång till viktiga biprodukter, och utgör därmed också betydande orsaker för den prisutveckling som skett (Hallman, 2025). Biobränslen anses vara en del av det gröna kretsloppet. Förbränningen leder fortfarande till utsläpp av koldioxid, men utsläppen beräknas ingå i ett naturligt kretslopp och därmed inte bidra till en ökad växthuseffekt (Naturvårdsverket, 2024).

Oljepannor används idag för spetslast på kalla dagar, då värmebehovet är som störst. I och med de höga utsläppen som fossil eldningsolja bidrar med, strävas det efter att minska användningen av denna i så stor utsträckning som möjligt. År 2024 stod eldningsoljan för endast 1,5 % av den tillförda energin i Sveriges fjärrvärmenät (Energiföretagen, 2024a). Eldningsolja är också ett mycket dyrt bränsle som belastas med flera avgifter, såsom koldioxidskatt, energiskatt och kostnader för utsläppsrätter (Skatteverket, 2026). Den höga kostnaden skapar också incitament att minska användningen av eldningsolja. Som ett alternativ används i allt större utsträckning bioolja. Bioolja räknas som en del av det gröna kretsloppet och är ett mer miljömässigt hållbart alternativ, men är också mycket dyrt i jämförelse med andra bränslen (USDA, 2024). Anledningen till att oljepannor fortfarande används är deras goda egenskaper som spetslast, vilket behövs vid extra höga värmebehov. En oljepanna kan startas upp snabbt, är lätt att reglera, och oljan är lagringstålig vilket är bra då det kan gå lång tid mellan drifttillfällena (Svensk Fjärrvärme, 2009).

Slutligen används även elektricitet för att driva fjärrvärmesystemets värmepumpar. Priset för el kan variera mycket baserat på olika faktorer, eftersom elpriset är rörligt. Först och främst påverkas priset av elmarknaden utifrån tillgång och efterfrågan, där en högre tillgång gör att priset minskar och en högre efterfrågan gör att priset ökar (Vattenfall, 2025a). Perioder med mycket nederbörd, starka vindar eller mycket sol är parametrar som ökar tillgången på el, tack vare Sveriges förnybara energikällor såsom vind-, vatten- och solkraft. Försättningsvis påverkar även utetemperaturen hur mycket el som efterfrågas, då uppvärmningsbehovet av landets byggnader ökar eller minskar beroende på hur varmt det är. I Sverige är elbehovet under en kall vintervecka ungefär dubbelt så stort som under en sommarvecka (Vattenfall, 2025a). Slutligen påverkas Sveriges elpriser av förutsättningar i andra europeiska länder, eftersom att den nordiska elmarknaden är en del av den europeiska. Alla länder i Europa har inte samma förutsättningar vad gäller fossilfria energikällor vilket i sin tur gör att de är mer beroende av bränslemarknaden för kol, gas och olja. Ökar priset för kol i ett europeiskt land, kan det därmed komma att påverka elpriserna i Norden (Vattenfall, 2025a).

### 3. Metod

I detta kapitel beskrivs den metod och data som använts för att genomföra studien. Först introduceras det simuleringsverktyg som använts. Därefter redovisas den insamlade data som använts för att modellera systemen, följt av en beskrivning av de fjärrvärmemodeller som utvecklats för Uppsala och Stockholm. Vidare presenteras metoden för beräkning av CO<sub>2</sub>-utsläpp samt de scenarier som undersökts. Slutligen beskrivs genomförandet av känslighetsanalysen och valideringen av de framtagna fjärrvärmemodellerna.

### 3.1 Simuleringsverktyg

För att besvara studiens syfte och forskningsfrågor har den huvudsakliga metoden baserats på en simuleringsmodell, utvecklad av Åberg och Widén (2013). Modellen är ett MATLAB-baserat verktyg som genom kostnadsoptimering simulerar fjärrvärmeproduktion med begränsad mängd indata. Modellen är utformad för att möjliggöra systemövergripande analyser av hur förändringar i värmeefterfrågan, bränslepriser eller tillförsel av nya produktionskällor påverkar energiflöde, bränsleanvändning och elproduktion.

Modellen beskriver fjärrvärmesystemet med en modellstruktur där olika noder representerar bränslekategorier, produktionsenheter, värmeefterfrågan och elmarknad. Produktionssidan omfattar kraftvärmeverk, värmeverk, värmepumpar samt industriell överskottsvärme. För respektive produktionsenhet specificeras installerad effekt, verkningsgrad, bränslekostnad, revisionsmånad samt, i förekommande fall, ett alfa-värde som anger relationen mellan el- och värmeproduktion i kraftvärmeanläggningar. Modellen har tre noder för kraftvärmeverk (CHP1-3), tre noder för värmeverk (HO1-3), en nod för värmepumpar (HP) och slutligen en nod för industriell överskottsvärme (IWH). Den sistnämnda noden är den som kommer användas vid integrering av överskottsvärmen från Forsmarks kärnkraftverk. Det begränsade antalet noder innebär att förenklingar i vissa fall måste göras av de verkliga fjärrvärmesystemen, genom att aggregera bränslen och produktionsanläggningar i kategorier.

I modellen formuleras ett linjärt optimeringsproblem där målet är att minimera den totala kostnaden för värmeproduktion genom att vid varje tidssteg använda de produktionsenheter som ger lägst kostnad och samtidigt täcker värmebehovet. Optimeringen sker under grundläggande tekniska villkor, där värmeproduktionen i varje tidssteg måste motsvara systemets efterfrågan samtidigt som varje produktionsenhet drivs inom ramen för sin installerade kapacitet och givna verkningsgrad. För kraftvärmeanläggningar kopplas el- och värmeproduktion samman genom ett fast proportionellt samband, vilket innebär att el genereras i direkt relation till producerad värme. Själva optimeringen genomförs med timvis upplösning över ett helt år. Detta möjliggör analys av säsongsvariationer i värmebehov samt variationer i elpris.

Överskottsvärmen från Forsmarks kärnkraftverk representeras som en extern värmekälla i modellen, representerad som industriell överskottsvärme. Genom att inkludera överskottsvärmen som en ytterligare produktionskälla kan modellen beräkna hur den kostnadsoptimalt integreras i systemet och vilka befintliga produktionsenheter som trängs undan. På så sätt har förändringar i bränsleanvändning, kraftvärmeproduktion, elproduktion och totala systemkostnader analyserats.

En central styrka med simuleringsverktyget är dess balans mellan förenkling och systemrepresentation. Modellen är tillräckligt detaljerad för att fånga samspelet mellan värmeproduktion och elproduktion, samtidigt som den är tillräckligt generell för att möjliggöra scenariostudier och jämförelser mellan olika system. Detta gör den särskilt lämplig för att analysera systemeffekter av att tillföra en ny, storskalig värmekälla till befintliga fjärrvärmesystem. Samtidigt innebär modellens linjära och statiska karaktär att

resultaten bör tolkas som en analys av strukturella effekter snarare än en exakt simulering av faktisk operativ drift.

## 3.2 Data

Detta avsnitt redogör för den data som samlats in för att utgöra indata till de modellerade fjärrvärmesystemen. Först presenteras fjärrvärmesystemens uppbyggnad och produktionsanläggningar i Uppsala respektive Stockholm. Därefter redovisas kostnaderna för de olika bränslena som används i fjärrvärmesystemen.

### 3.2.1 Fjärrvärmesystemen Uppsala och Stockholm

I detta avsnitt presenteras data för fjärrvärmesystemen i Uppsala och Stockholm. Data har i första hand samlats in genom e-postkontakt med de fjärrvärmeföretag som äger de studerade anläggningarna. För att säkerställa respondenternas anonymitet hänvisas dessa i arbetet som ”representant” för respektive företag. Representanternas yrkesroller anges i referenslistan. Utöver detta har även publicerade årsredovisningar använts. Viss data har inte varit möjlig att ta del av, vilket visas i de kommande tabellerna genom avsaknad av värde.

#### Uppsala

I Uppsala ägs alla fjärrvärmeanläggningar av Vattenfall. 2024 uppgick den totala fjärrvärmeproduktionen i Uppsala till cirka 1812 GWh (SCB, 2024), vilket är den värmelast som har använts i simuleringarna av Uppsalas fjärrvärmesystem. En stor majoritet av den värme som produceras på anläggningarna är fossilfri, medan oljepannor fortfarande används för spetslastproduktion. Den största delen av den värme som tillförs i fjärrvärmenätet, basproduktionen, produceras i anläggningarna som tillhör Bolandsverket, beläget i Boländerna. De aktiva enheterna i verket består av två avfallsförbränningsanläggningar, två anläggningar som eldar fasta biobränslen samt en enhet som eldar bioolja. Den senaste anläggningen som byggdes var Carpe Futurum, som togs i drift 2022. Carpe Futurum är en biobränsleanläggning som drivs av flis, och har ersatt användningen av torv i produktionen. I dagsläget används anläggningen endast för fjärrvärmeproduktion, men den är förberedd för elproduktion så att kraftvärme kan produceras (Vattenfall, u.å.b). Anläggningen använder rökgaskondensering för att ta tillvara på värme från rökgaserna som produceras, vilket resulterar i en verkningsgrad som är högre än 100%. Även de två avfallsanläggningarna, Avfallsblock 5 och Avfallsblock 1-4, är utrustade med rökgaskondensering. I avfallsblocken eldas utsorterat hushållsavfall (Uppsala kommun, 2025). Båda anläggningarna är kopplade till fjärrvärmenätet, och Avfallsblock 5 är även kopplad till en ångturbin som genererar el. Vidare utgörs Bolandsverket av en Hetvattencentral (HVC), vilken främst används som spetslast, och drivs av pellets. Slutligen består Bolandsverket av oljepannorna H3-H4, som eldar bioolja och används vid höga värmebehov (Representant 1 Vattenfall, 2026).

Utöver Bolandsverket bidrar även Hysbyborgsverket och Stallängsverket till fjärrvärmeproduktionen i Uppsala. Husbyborgsverket består av tre oljepannor som används som spetsproduktion vid behov. Stallängsverket är en värmepumpsanläggning bestående av tre värmepumpar som är belägen vid reningsverket i Uppsala, och producerar både värme och

kyla. Reningsverkets avloppsbassänger är delvis det som används som temperaturkälla, och tillgången till avloppsvatten varierar ofta mellan dagtid och nattetid, vilket leder till varierande kapacitet för värmepumparna under ett dygn (Åberg m.fl., 2012).

Värdena för de olika anläggningarna har tillhandahållits via representant 1, från Vattenfall (2026), och redovisas i Tabell 1.

*Tabell 1. Uppsalas fjärrvärmeanläggningar med produktionstyp, kapacitet, verkningsgrad och alfa-värde.*

| Vattenfall       |                           |           |               |            |
|------------------|---------------------------|-----------|---------------|------------|
| Anläggning       | Produktionstyp            | Kapacitet | Verkningsgrad | Alfa-värde |
| Avfallsblock 5   | Avfallspanna              | 70/10     | 0.95          | 0.14       |
| Avfallsblock 1-4 | Avfallspanna              | 62        | 1.1           | -          |
| Carpe Futurum    | Biobränslepanna (flis)    | 90        | 1.11          | -          |
| HVC              | Biobränslepanna (pellets) | 120       | 0.91          | -          |
| Stallängsverket  | Värmepump                 | 45 (25)   | 2.5           | -          |
| H3-H4            | Biooljepannor             | 120       | 0.87          | -          |
| Husbyborgsverket | Fossiloljepannor          | 150       | 0.87          | -          |

## Stockholm

Stockholms fjärrvärmesystem är större och mer komplext än Uppsalas. År 2024 uppgick Stockholms fjärrvärmeproduktion till 12 073 GWh, vilket har använts som stadens värmelast i simuleringsmodellen (Stockholm Exergi, 2026c; Söderenergi, 2025; Norrenergi, 2024; Vattenfall, u.å.d; E.ON, 2026). Idag är det framförallt fem olika företag som driver anläggningar i Stockholm kopplade till fjärrvärmenätet; Stockholm Exergi, Norrenergi, Söderenergi, Vattenfall och E.ON. Stockholms fjärrvärmesystem är idag uppdelat i tre separata delsystem. Det finns dock planer på att sammankoppla dessa till ett gemensamt system (Stockholm Exergi, u.å.b), vilket i detta arbete antas ha genomförts.

Stockholm Exergi äger flest anläggningar och står för den största andelen av Stockholms fjärrvärmenät. Företaget driver fem verk i olika delar av Stockholm, som i sig innehåller flera olika anläggningar. Värtaverket är beläget i centrala Stockholm och dess största anläggning är kraftvärmeverket KVV8, som eldar flis och andra restprodukter från skogs-och sågverksindustrin. Därutöver omfattar systemet ett antal pannor eldade med eldningsolja och bioolja, samt en värmepumpsanläggning (Stockholm Exergi, 2023a). Bristaverket består av två kraftvärmeanläggningar, en som eldar avfall och en där både avfall och flis eldas (Stockholm Exergi, 2023b). Hammarbyverket är den största värmepumpsanläggningen i systemet, där värme hämtas ur renat avloppsvatten från Henriksdals reningsverk. Anläggningen omfattar också två biooljeeldade pannor (Stockholm Exergi, 2026a). Vidare består Högdalenverket av fem pannor, varav fyra är avfallseldade medan den femte eldas med bioolja och endast används för spetslastproduktion. (Stockholm Exergi, 2026b). Slutligen

består Hässelbyverket av en kraftvärmeanläggning som eldar pellets (Stockholm Exergi, 2023c). Information om anläggningarnas kapaciteter, alfa-värden och verkningsgraden för värmepumparna har hittats i årsredovisningarna för respektive anläggning (Stockholm Exergi, 2023a; Stockholm Exergi, 2023b; Stockholm Exergi, 2024; Stockholm Exergi, 2023c; Stockholm Exergi, 2026b), och redovisas i Tabell 2.

*Tabell 2. Stockholm Exergis fjärrvärmeanläggningar i Stockholm.*

| Stockholm Exergi |                                  |           |               |            |
|------------------|----------------------------------|-----------|---------------|------------|
| Anläggning       | Produktionstyp                   | Kapacitet | Verkningsgrad | Alfa-värde |
| Bristaverket 1   | Biobränslepanna (flis, returträ) | 73/42     | -             | 0.55       |
| Bristaverket 2   | Avfallspanna                     | 60/20     | -             | 0.33       |
| Hammarbyverket   | Värmepumpar                      | 225       | 2.7           | -          |
|                  | Biooljepannor                    | 200       | -             | -          |
| Högdalenverket   | Avfallspannor                    | 294/71    | -             | 0.24       |
|                  | Biooljepannor                    | 90        | -             | -          |
| Hässelbyverket   | Biobränslepanna (pellets)        | 180/65    | -             | 0.36       |
| Värtaverket      | Biobränslepanna (flis, returträ) | 365/135   | -             | 0.37       |
|                  | Eldningsoljepanna                | 256       | -             | -          |
|                  | Eldnings- och biooljepanna       | 693       | -             | -          |
|                  | Eldnings- och biooljepanna       | 330/210   | -             | 0.64       |

Söderenergis anläggningar levererar främst värme till de södra delarna av Stockholms fjärrvärmenät. Deras basproduktion av värme kommer från Igelsta kraftvärmeverk samt panna 1 och 3 tillhörande Igelsta värmeverk. Kraftvärmeverket eldar restprodukter från skogsindustrier och återvinningsindustrier, panna 1 förbränner utsorterat avfall och panna 3 returträ. Vidare används pellets som bränsle i Fittja värmeverk, vilken i regel endast är i drift i november- mars. Andra anläggningar som används som spetslast är Skogås värmeverk och panna 2 i Igelsta värmeverk, vilka båda eldar bioolja (Söderenergi, 2026). Information om anläggningarnas kapaciteter och deras verkningsgrader har givits av en representant för Söderenergi (2026), och dessa presenteras i Tabell 3.

*Tabell 3. Söderenergis fjärrvärmeanläggningar i Stockholm.*

| Söderenergi            |                            |           |               |            |
|------------------------|----------------------------|-----------|---------------|------------|
| Anläggning             | Produktionstyp             | Kapacitet | Verkningsgrad | Alfa-värde |
| Igelsta Kraftvärmeverk | Biobränslepanna (flis)     | 210/85    | 1.06          | 0.4        |
| Igelstaverket          | Avfallspanna               | 90        | 1.03          | -          |
|                        | Biobränslepanna (returträ) | 95        | 1.07          | -          |
|                        | Biooljepanna               | 95        | 0.91          | -          |
| Fittjaverket           | Biobränslepanna (pellets)  | 380       | 0.91          | -          |
| Skogås panncentral     | Biooljepanna               | 50        | 0.9           | -          |

Norrenergi producerar fjärrvärme i Solnaverket och Sundbybergsverket, samt i Hagastationen som de samäger med Stockholm Exergi (Norrenergi, u.å). Deras anläggningar består av värmepumpar som använder värme från renat avloppsvatten från Bromma reningsverk, pellets pannor, biooljepannor och pannor som eldas fossil olja. Information om de anläggningar Norrenergi driver samt deras kapaciteter har givits av en representant för Norrenergi (2026), och presenteras i Tabell 4.

*Tabell 4. Norrenergis fjärrvärmeanläggningar i Stockholm.*

| Norrenergi                        |                            |           |               |            |
|-----------------------------------|----------------------------|-----------|---------------|------------|
| Anläggning                        | Produktionstyp             | Kapacitet | Verkningsgrad | Alfa-värde |
| Solnaverket och Sundbybergsverket | Värmepumpar                | 100       | -             | -          |
|                                   | Biobränslepannor (pellets) | 190       | -             | -          |
|                                   | Biooljepannor              | 80        | -             | -          |
|                                   | Fossiloljepannor           | 50        | -             | -          |

Vattenfall driver tre fjärrvärmeverk belägna i södra Stockholm (Vattenfall, u.å.d). Vattenfalls verk med störst kapacitet är Jordbro kraftvärmeverk, som förbränner främst träflis och träavfall, och som producerar både värme och el (Vattenfall, u.å.e). De andra två verken, Fisksätra värmeverk och Bollmora värmeverk, drivs på bioolja (Vattenfall, u.å.c; Vattenfall, u.å.a). Kompletterande uppgifter om verken har givits av representant 2 för Vattenfall (2026). Värdena för Vattenfalls anläggningar redovisas i Tabell 5.

Tabell 5. Vattenfalls fjärrvärmeanläggningar i Stockholm.

| Vattenfall |                            |           |               |            |
|------------|----------------------------|-----------|---------------|------------|
| Anläggning | Produktionstyp             | Kapacitet | Verkningsgrad | Alfa-värde |
| Jordbro    | Biobränsle                 | 283/20    | -             | 0.07       |
|            | Biobränslepannor (pellets) | 190       | -             | -          |
|            | Biooljepannor              | 80        | -             | -          |
|            | Fossiloljepannor           | 50        | -             | -          |

Eon driver kraftvärmeverket Högbytorp som primärt använder verksamhetsavfall som bränsle. Information om verket och dess kapacitet har givits av en representant för E.ON (2026), och presenteras i Tabell 6.

Tabell 6. E.ONs fjärrvärmeanläggningar i Stockholm.

| E.ON                           |                |           |               |            |
|--------------------------------|----------------|-----------|---------------|------------|
| Anläggning                     | Produktionstyp | Kapacitet | Verkningsgrad | Alfa-värde |
| Högbytorp Kretsloppsanläggning | Avfallspanna   | 90/29     | -             | 0.32       |

### 3.2.2 Bränslekostnader

I detta avsnitt presenteras bränslekostnaderna för respektive bränsle i fjärrvärmesystemen, och hur dessa har tagits fram. En sammanställning av samtliga bränslekostnader presenteras i slutet av avsnittet, i Tabell 7.

#### Avfall

Generellt har avfallskostnaden i Sverige varit stabil under det senaste året, med en liten ökning under de två senaste inrapporterade kvartalen (kvartal 3 och 4 år 2025). Det finns tre olika kategorier för avfallskostnad; hushållsavfall, verksamhetsavfall och importavfall. Dessa tre kategorier ligger alla på ungefär samma kostnad. Vid en beräkning av medelvärdet, baserat på värden från 2025 och de tre olika avfallskategorierna, uppgår kostnaden på avfall till -185 kr/MWh (Energimyndigheten, 2026a). Försättningsvis leder förbränning av avfall till koldioxidutsläpp, vilket måste betalas för i form av utsläppsrätter. Under 2026 har priset på utsläppsrätter uppgått till cirka 90 euro per ton koldioxid (Zeromission, 2026), vilket med en genomsnittlig valutakurs på 11 kr/euro det senaste året motsvarar 990 kr per ton CO<sub>2</sub> (Europeiska Centralbanken, 2026). Förbränning av avfall bidrar till ett utsläpp på 160.6 CO<sub>2</sub> kg/MWh, vilket innebär en kostnad på 159 kr/MWh för utsläppsrätterna. Vidare tillkommer en kostnad för askhantering vid förbränning av avfall. Med avseende på avfallets värmevärde och askhalt, samt en antagen deponikostnad för aska på 500 kr/ton, uppskattas kostnaden för askhantering till 20 kr/MWh (Lundegård, 2018; Avfall Sverige, 2019). Detta resulterar i en slutlig kostnad för avfall på -6 kr/MWh.

### **Flis och returträ**

Efter en markant kostnadsökning som påbörjades 2022, har kostnaden för skogsflis sedan 2024 stabiliserats och pendlat mellan 350-390 kr/MWh. Under 2025 var medelvärdet på skogsflis 376 kr/MWh (Energimyndigheten, 2026b), vilket är det värde som använts i modelleringen. Medelvärdet för returträ var under år 2025 255 kr/MWh (Energimyndigheten, 2026b), vilket är det värde som använts i studien.

### **Pellets**

Pellets har genomgått en tydlig prisökning sedan 2022. År 2024 noterades de hittills högsta priserna, med en topp på 587 kr/MWh. Därefter har priset legat kring 500 kr/MWh. Under 2025 var medelpriset 510 kr/MWh (Energimyndigheten, 2026b), vilket är det värde som används i modelleringen.

### **Bioolja**

Det finns en begränsad mängd information om priser på bioolja, och att bestämma ett trovärdigt pris på biooljan som används i fjärrvärmesystemen är därför svårt. En av de vanligaste biooljorna som används i fjärrvärmesystemen är tallbecksolja, och priset på denna har därför använts som måttstock. Enligt en rapport från 2024 av United States Department of Agriculture (USDA) låg priset på tallbecksolja, som exporterades till Sverige vid denna tid, på omkring 1150 USD per ton. Med en växelkurs på 9,6 kr/USD blir priset på tallbecksolja 11040 kr/ton (Sveriges Riksbank, 2026). Ett ton bioolja har ett energiinnehåll på cirka 10,2 MWh (Vegoil, u.å). Detta innebär ett pris på cirka 1082 kr/MWh för bioolja.

### **Eldningsolja**

Brentolja, som kan fungera som ett globalt riktmärke för priset på olja, låg under 2025 i genomsnitt på cirka 68 USD per fat (Dagens Industri, 2026). Med den genomsnittliga växelkursen på 9,6 kr/USD under samma år innebär det ett pris på 652 kr per fat (Sveriges Riksbank, 2026). Värmeinnehållet i eldningsolja är omkring 10 MWh per 1000 liter olja, och ett fat innehåller 200 liter (Energimyndigheten, u.å). Med dessa värden beräknas priset på eldningsolja till 326 kr/MWh.

Fortsättningsvis är förbränning av olja belagt med koldioxidskatt och energiskatt. Om oljan har ett svavelinnehåll på högre än 0,05 viktprocent ska även svavelskatt betalas (Skatteverket, 2026), men för det framtidsscenario som modelleras i denna studie antogs inte sådan olja användas. Skattesatserna kan skilja sig åt beroende av egenskaperna hos oljan. För eldningsolja som har försetts med märk-och färgämnen eller omärkta sådana som ger mindre än 85 volymprocent destillat vid 350 grader C uppgår energiskatten till 318 kr/m<sup>3</sup> och koldioxidskatten till 3642 kr/m<sup>3</sup>, vilket motsvarar 31,8 kr/MWh samt 364, 2 kr/MWh. För eldningsolja som inte försetts med dessa ämnen, som ger minst 85 volymprocent destillat samt tillhör miljöklass 1 är energiskatten 1150 kr/m<sup>3</sup> och koldioxidskatten 2811 kr/m<sup>3</sup>, motsvarande 115 kr/MWh och 281,1 kr/MWh (Skatteverket, 2026). För båda typerna av olja blir den totala skatten cirka 396 kr/MWh.

Utöver detta innebär utsläppet av koldioxid en kostnad i form av utsläppsrätter. Eldningsolja 1, vilken är den fossila oljan som förväntas användas i störst utsträckning i framtiden, släpper ut 290 kg/MWh (Drivkraft Sverige, 2024). Med ett pris för utsläppsrätter på 90 euro per ton, och en genomsnittlig växelkurs på 11 kr/euro, innebär detta en kostnad på 287 kr/MWh i utsläppsrätter.

Det totala priset för eldningsolja uppgår därmed till 1009 kr/MWh.

## El

I simuleringarna har timvisa elpriser från 2024 använts (entso-e, 2024). Elpriser från 2024 används då det är den senast tillgängliga datan som erhållits för ett helt år. Efter de kraftiga svängningarna och höga elpriserna under 2022 och 2023 stabiliserades priserna under 2024, och kan därmed ses som mer representativa för ett normalår. Medelvärde för spotpriserna i elområde SE3, där Uppsala och Stockholm ingår, låg under året på 35,83 öre/kWh, med en topp på 707,52 öre/kWh och ett lägsta värde på -59,96 öre/kWh. Utöver själva priset på el, tillkommer även en elskatt som ligger på 45 öre/kWh från och med 1 januari 2026 (Energimarknadsbyrån, 2025).

*Tabell 7. Priser för bränslen i fjärrvärmesystemen.*

| Bränslepriser |                          |
|---------------|--------------------------|
| Bränsle       | Pris (kr/MWh)            |
| Avfall        | -6                       |
| Flis          | 376                      |
| Returträ      | 255                      |
| Pellets       | 510                      |
| Bioolja       | 1082                     |
| Eldningsolja  | 1009                     |
| El            | Elpris 2024 +<br>Elskatt |

## 3.3 Fjärrvärmemodell

I detta avsnitt presenteras de slutgiltiga modellerna för fjärrvärmesystemen i Uppsala och Stockholm, vilka har använts som indata i simuleringarna.

### 3.3.1 Uppsala

För de tre noderna som representerar värmeverk ingår H3-H4, HVC och Avfallsblock 1-4. Därutöver ingår även Husbyborgsverket, men eftersom antalet värmeverksnoder är begränsat har det i stället placerats i en av noderna för kraftvärmeverk och tilldelats ett alfa-värde på noll, vilket innebär att det i praktiken fungerar som ett värmeverk i modellen. Nästkommande nod för kraftvärmeverken används för att representera Carpe Futurum. Anläggningen är i dagsläget ett renodlat värmeverk, men den är konstruerad för att även kunna möjliggöra elproduktion i framtiden. I simuleringen har dock Carpe Futurum endast modellerats som ett värmeverk, med ett alfa-värde på noll. Fortsättningsvis representeras Avfallsblock 5 av nästa

nod för kraftvärmeverk, eftersom anläggningen producerar el med hjälp av en ångturbin. Slutligen representerar Stallängsverket noden för värmepumpar. Här har en viktning räknats fram för att ta hänsyn till den varierade kapaciteten över ett dygn.

Under året kan det inträffa både planerade och oplanerade stopp hos anläggningarna som står för baslasten, vilket gör dem otillgängliga för drift. För avfallspannorna och biobränslepannorna antas en tillgänglighet på 90%, vilket har implementerats i simuleringarna. Anläggningarna stängs också i regel ner i omkring en månad för revision varje år. Detta görs under sommarhalvåret då värmebehovet är som lägst. Fjärrvärmebolagen genomför sina revisioner växelvis för att säkerställa att någon produktion alltid är i drift. I modellen har därför revisionsmånaderna för de olika noderna förlagts till olika månader under sommaren. Värdena för Uppsalas fjärrvärmemodell presenteras i Tabell 8.

*Tabell 8. Uppsalas fjärrvärmemodell som används för simulering.*

| Fjärrvärmemodell - Uppsala |              |                |               |            |                |                  |
|----------------------------|--------------|----------------|---------------|------------|----------------|------------------|
| Nod                        | Anläggningar | Kapacitet (MW) | Verkningsgrad | Alfa-värde | Revisionsmånad | Pris (kr/MWh)    |
| HO1                        | Bioolja      | 120            | 0.87          | -          | 5              | 1082             |
| HO2                        | Pellets      | 120            | 0.91          | -          | 7              | 510              |
| HO3                        | Avfall       | 62             | 1.1           | -          | 8              | -6               |
| CHP1                       | Eldningsolja | 150            | 0.87          | -          | 5              | 1009             |
| CHP2                       | Flis         | 110            | 1.11          | -          | 7              | 376              |
| CHP3                       | Avfall       | 70             | 0.95          | 0.14       | 6              | -6               |
| HP                         | Värmepump    | 32             | 2.5           | -          | -              | Elpris + Elskatt |

### 3.3.2 Stockholm

För att fjärrvärmesystemet i Stockholm ska kunna appliceras på simuleringssmodellen har anläggningarna delats in i olika kategorier baserat på vilken typ av bränsle respektive anläggning använder. Vidare finns det anläggningar i Stockholms fjärrvärmesystem där data över verkningsgrader saknas. I dessa fall har istället generella värden, baserade på bränsle- och anläggningstyp, antagits. För oljepannorna antogs därför en verkningsgrad på 0,9, och för anläggningar med rökgaskondensering en verkningsgrad på 1,05 (Frederiksen & Werner, 2014).

För värmeverken (HO), står den första noden för alla oljepannor, den andra står för biobränsle och den tredje noden representerar avfallsförbränningsanläggningar. Biobränslet utgörs av både flis och pellets, vilket har beaktats vid beräkningen av nodens kostnad.

Vidare, för kraftvärmeverken (CHP), står den första noden för de kraftvärmeverk som förbränner pellets, nod nummer två representerar de kraftvärmeverk som bränner flis samt returträ och den tredje noden representerar avfallseldade kraftvärmeverk. Slutligen består noden (HP) av Stockholms värmepumpar.

Eftersom majoriteten av noderna representerar flera anläggningar avser den angivna kapaciteten den sammanlagda installerade effekten för samtliga anläggningar inom respektive nod. Nya värden för kostnader och verkningsgrader har beräknats genom viktning. Detta har gjorts genom att multiplicera bränslepriset med den andel som det bränslet utgör inom sin tillhörande nod. På motsvarande sätt har även nya, viktade verkningsgrader beräknats. Som i modellen för Uppsala har revisionsmånaderna förlagts omlott under sommarmånaderna, och avfallspannor samt biobränslepannor simulerats med en tillgänglighet på 90%. Indatan för Stockholms fjärrvärmemodell redovisas i Tabell 9.

*Tabell 9. Stockholms fjärrvärmemodell som används för simulering.*

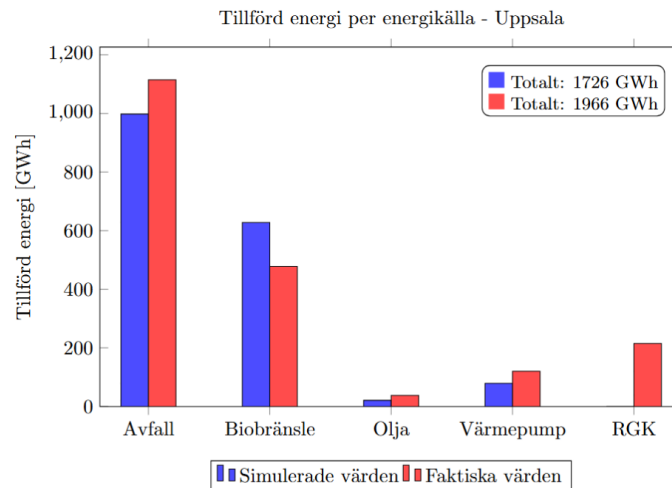
| Fjärrvärmemodell - Stockholm |                 |                |               |            |                |                  |
|------------------------------|-----------------|----------------|---------------|------------|----------------|------------------|
| Nod                          | Bränsle         | Kapacitet (MW) | Verkningsgrad | Alfa-värde | Revisionsmånad | Pris (kr/MWh)    |
| HO1                          | Olja            | 1570           | 0.9           | -          | -              | 1052             |
| HO2                          | Pellets + Flis  | 665            | 0.93          | -          | 5              | 474              |
| HO3                          | Avfall          | 90             | 1.03          | -          | 7              | -6               |
| CHP1                         | Pellets         | 330            | 0.9           | 0.64       | 5              | 510              |
| CHP2                         | Flis + Returträ | 1115           | 1.05          | 0.31       | 6              | 316              |
| CHP3                         | Avfall          | 538            | 1.05          | 0.27       | 8              | -6               |
| HP                           | Värmepump       | 481            | 2.7           | -          | -              | Elpris + Elskatt |

## 3.4 Validering

För att validera att de simulerade fjärrvärmemodellerna överensstämmer med verkligheten jämfördes de med data från de faktiska systemen. Den tillförda energin från respektive bränsle i det simulerade basfallet jämfördes med motsvarande verklig data. I valideringen har energikällorna delats upp i kategorierna avfall, biobränsle, olja, värmepumpar och rökgaskondensering. I biobränsle ingår alla fasta biobränslen som returträ, skogsflis och pellets, och under olja ingår både fossil olja och bioolja. I de simulerade modellerna är rökgaskondensering redan inräknad i bränsleanvändningen i de fall den förekommer, medan den i data från de verkliga systemen redovisas som en separat energikälla. Därför presenteras rökgaskondenseringen som en egen kategori för den faktiska datan, men inte för den simulerade.

### 3.4.1 Uppsala

Faktiska värden på den tillförda energin i Uppsalas fjärrvärmesystem har lästs av från ett Sankey-diagram från Vattenfall (Representant 1 Vattenfall, 2026), som visar tillförd och producerad energi. Datan är från 2022, men eftersom inga större förändringar av systemet har genomförts sedan dess antas den ge en rättvisande bild av systemet idag. I Figur 1 presenteras jämförelsen av de simulerade och de faktiska värdena, där de blåa staplarna visar de simulerade och de röda staplarna visar de faktiska värdena.



Figur 1. Tillförd energi per energikälla för simulerade och faktiska värden, i Uppsala.

Överlag stämmer värdena bra överens, och bränslena förhåller sig till varandra på liknande sätt för de simulerade värdena som för de faktiska. Vissa skillnader mellan staplarna kan dock noteras. Den totala mängden tillförd energi är över 200 GWh högre för de faktiska värdena jämfört med de simulerade. Detta kan förklaras av att en del av den tillförda energin i det faktiska systemet också bidrar med produktion till fjärrkylanätet och ångnätet. Enligt Sankey-diagrammet uppgick produktionen av ånga och fjärrkyla till 168 GWh under det presenterade året. Eftersom modellen enbart omfattar fjärrvärmebehovet uppstår därmed en skillnad i tillförd energi. Detta kan också vara en förklarande faktor till varför energin från avfall och värmepumparna är något högre i det verkliga systemet jämfört med det simulerade.

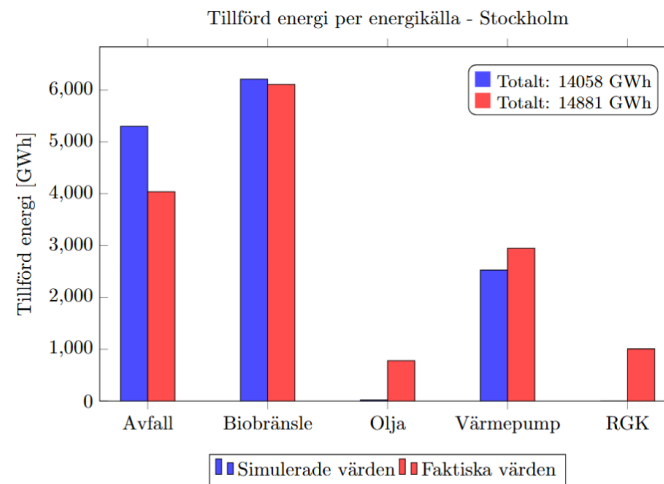
Vidare bör värdet för RGK från de faktiska värdena adderas till tillhörande staplar för biobränsle och avfall. Detta innebär att skillnaden i tillförd energi från biobränsle mellan simulerade och verkliga värdena skulle minska.

Staplarna för olja avviker också något. Simuleringsmodellen baseras på kostnadsoptimering, och då oljan är det dyraste bränslet kommer den alltid prioriteras sist i körordningen. Oljan används därför i modellen endast när efterfrågan överstiger vad bas- och mellanproduktionen klarar av. I verkligheten används oljepannor även vid driftstörningar, både planerade och oplanerade, vilket leder till en högre användning än i de simulerade värdena.

### 3.4.2 Stockholm

För Stockholmssystemet har den faktiska datan för tillförd energi erhållits från Elforsk (2023). Källan presenterar mängden tillförd energi för samtliga bränsletyper som olika företag använder i sin bränslemix för värme- och elproduktion. Från datan har värden hämtats ut för Stockholm Exergi, Norrenergi, Vattenfall och E:ON. Då Söderenergis tillförda energi inte var dokumenterad i denna källa har information om deras data hämtats från interna årsredovisningar (Söderenergi, 2024). Samtliga inhämtade värden beskriver mängden tillförd

energi från år 2023. I Figur 2 presenteras jämförelsen mellan de värden som erhållits från egen simulering, och de inhämtade faktiska värdena.



Figur 2. Tillförd energi per energikälla för simulerade och faktiska värden, i Stockholm.

I stapeldiagrammet kan vissa avvikelser noteras. Först och främst, noteras en skillnad vad gäller mängden tillförd avfall. Precis som tidigare nämnt är den rökgaskondensering som finns i simuleringen inräknad i både stapeln för avfall och biobränsle. Med det sagt kan RGK minska skillnaden som noteras mellan simulerade och faktiska värden kopplade till avfallsanvändningen.

Vidare avviker staplarna för olja, vilket kan förklaras på samma sätt som i valideringen för Uppsala. I det verkliga systemet tas oljan i drift i fler situationer än för de simulerade värdena, exempelvis vid olika typer av driftstörningar, vilket leder till en högre användning än vad simuleringen visar.

Slutligen syns även en mindre skillnad för värmepumparna. De simulerade och faktiska värdena uppgick till 2527 respektive 2947 GWh, vilket innebär att de ligger i samma storleksordning. Den totala tillförda energin för hela systemet är något högre för de faktiska värdena, vilket kan vara en faktor till att värdet för värmepumparna också blir något högre. Skillnaden mellan de simulerade och faktiska värdena för värmepumparna kan även bero på att simuleringarna baseras på elpriser från år 2024, medan de faktiska värdena avser år 2023. Trots en viss skillnad bedöms resultatet ge en tillräckligt representativ bild av det verkliga systemet.

Valideringen för både Uppsala och Stockholm visar att fjärrvärmemodellerna ger en representativ bild av de verkliga systemen. De avvikelser som har noterats har beaktats vid analysen av resultaten, för att uppmärksamma om dessa faktorer påverkar utfallet.

### 3.5 CO<sub>2</sub>-beräkningar

För varje scenario har de totala koldioxidutsläppen från fjärrvärmeproduktionen beräknats. I beräkningarna inkluderas utsläppen från förbränningen av respektive bränsle. För värmepumpar beräknas de utsläpp som uppstår från den el som används för att driva dem. De utsläpp som motsvarar den el som producerats genom kraftvärmeverken subtraheras från de totala utsläppen. Koldioxidutsläppen,  $X_{CO_2}$ , beräknas enligt

$$X_{CO_2} = f_i Q_i + \dots + f_n Q_n + f_{el} (Q_{elanv} - Q_{elprod}) \quad (1)$$

Koldioxidfaktorn för bränsle  $i$  beskrivs av  $f_i$ , och  $Q_i$  beskriver hur mycket av motsvarande bränsle som använts för fjärrvärmeproduktionen under ett år. I  $f_i$  ingår såväl de direkta utsläppen från förbränningen, samt utsläppen från produktionen och transporten av bränslet. Elen som används för värmepumparnas värmeproduktion under ett år representeras av  $Q_{elanv}$ , och  $Q_{elprod}$  motsvarar mängden el som producerats av kraftvärmeverken. Koldioxidfaktorn för el,  $f_{el}$ , är baserad på den nordiska elmixen 2023 (IVL, 2025). Koldioxidfaktorerna för de olika bränslena är hämtade från data från Energiföretagen (2024b). Överskottsvärmen från Forsmark antas inte bidra med några utsläpp vid drift. Samtliga faktorer presenteras i Tabell 10.

Tabell 10: Koldioxidfaktorer

| Koldioxidfaktorer |                        |
|-------------------|------------------------|
| Bränsle           | CO <sub>2</sub> kg/MWh |
| Avfall            | 160.6                  |
| Flis              | 11                     |
| Returträ          | 3                      |
| Pellets           | 18                     |
| Bioolja           | 5                      |
| Eldningsolja 1    | 290                    |
| El                | 59                     |
| Överskottsvärme   | 0                      |

### 3.6 Scenarier

I detta avsnitt motiveras valet av analysmetod. Därefter presenteras samtliga scenarier som undersöks i studien, vilka slutligen sammanställs i Tabell 12.

#### 3.6.1 Val av scenarioanalys

För att undersöka systemeffekterna på fjärrvärmesystemen i Stockholm och Uppsala vid integrering av överskottsvärme från Forsmarks kärnkraftverk har olika scenarier utvecklats. Scenarier och simuleringar används ofta inom energisystemanalys för att undersöka hur olika förändringar i ett system kan påverka dess framtida utveckling. Genom scenariobaserad modellering möjliggörs en mer omfattande analys av hur förändringar i systemet kan påverka

olika faktorer, som exempelvis kostnader, utsläpp och resursanvändning (Börjeson et al., 2006).

Börjeson et al. (2006) beskriver hur scenarier används inom framtidsstudier för att beskriva möjliga framtida tillstånd eller utvecklingsvägar för ett system, snarare än att förutsäga en exakt framtid. Författarna beskriver hur scenarier kan användas för att analysera tre typer av framtidsfrågor: vad som kommer att hända, vad som kan hända och hur ett specifikt mål kan uppnås. Författningssvis kategoriseras scenarier i tre huvudtyper: prediktiva, explorativa och normativa scenarier. Prediktiva scenarier syftar till att analysera vad som sannolikt kommer att ske i framtiden baserat på givna antaganden. Explorativa scenarier används för att undersöka olika möjliga utvecklingsvägar och analysera osäkerheter i systemet. Normativa scenarier utgår istället från ett definierat mål och analyserar vilka förändringar i system som krävs för att uppnå detta mål (Börjeson et al., 2006).

I denna studie har framförallt explorativa scenarier utvecklats, där systemet testas utifrån olika antaganden. De utformade scenarierna syftar till att undersöka flera olika faktorer såsom ekonomiska och miljömässiga. Scenarierna är beskrivna nedan under punkterna 3.6.3 - 3.6.8. Resultaten från scenarierna kan därmed bidra till en ökad förståelse för hur överskottsvärme kan komplettera befintliga produktionsanläggningar för att uppnå olika systemmål, såsom kostnadseffektiv drift, minskade utsläpp eller minskat beroende av externa bränslen.

### **3.6.2 Övergripande kring studiens scenarier**

För en nyanserad bild av hur överskottsvärmen påverkar städernas fjärrvärmesystem har sex olika scenarier utvecklats. Huvudsyftet med samtliga scenarier är att undersöka hur mycket överskottsvärme som används i systemet, vilka produktionsenheter som trängs undan, hur den totala systemkostnaden och de totala koldioxidutsläppen påverkas.

Vid integration av överskottsvärmen, för Scenario 2 och 3, har givna kapaciteter använts, se avsnitt 3.6.4 och 3.6.5. För Scenario 4-6 har en bestämd kapacitet på 500 MW respektive 2000 MW antagits för Uppsala och Stockholm, vilka presenteras i avsnitt 3.6.7-3.6.9. Valet av kapaciteterna baseras delvis på tidigare studier, där dessa utgjorde de högsta undersökta kapaciteterna (Svensson, 2025). Vidare är de valda kapaciteterna tillräckligt stora för att täcka värmebehovet under större delen av året i respektive stad. Valet av kapaciteter motiveras av att denna studie främst syftar till att analysera systemeffekter av varierande kostnader för överskottsvärmen, utan att begränsas av dess kapacitet.

### **3.6.3 Scenarion 1: Basfall**

Inledningsvis har basfall av vardera fjärrvärmesystem simulerats, där överskottsvärme från Forsmark inte inkluderats och inga andra förändringar av systemen gjorts. Detta är samma system som simulerades i valideringen. Basfallen representerar hur fjärrvärmesystemen i Uppsala och Stockholm ser ut idag, och har fungerat som referenser vid jämförelse med de andra scenarierna.

### 3.6.4 Scenario 2: Svenssons scenarier

I detta scenario har överskottsvärmen från Forsmark inkluderats i de nuvarande fjärrvärmesystemen. Svensson (2025) genomförde beräkningar för vad värdet på överskottsvärme från Forsmark skulle vara på Uppsala och Stockholms fjärrvärmemarknader vid olika installerade kapaciteter. Svensson tog fram tre scenarier, där två baserades på de installerade kapaciteter som Elforsk undersökt 2011, samt ett kostnadsoptimerat scenario (Svensson, 2025). Värdena som togs fram kan ses som realistiska estimeringar av vad överskottsvärmen skulle kosta om projektet genomförs. I detta scenario användes de tre olika kostnaderna på överskottsvärmen för respektive kapacitet som Svensson redovisar, vilka benämns som Scenario 2a-2c. Syftet med scenariot är att undersöka hur fjärrvärmeproduktionen skulle förändras av integrationen av överskottsvärme till ett realistiskt uppskattat pris. Överskottsvärmens kapacitet och kostnad för dessa scenarier redovisas i Tabell 11.

Tabell 11. Scenario 2. Svenssons scenarier med installerad kapacitet och kostnad.

| Svenssons scenarier     |                                              |                  |
|-------------------------|----------------------------------------------|------------------|
| Svenssons tre scenarier | Installerad kapacitet Uppsala/Stockholm [MW] | Kostnad [kr/MWh] |
| 2a                      | 50/1000                                      | 354              |
| 2b                      | 100/1500                                     | 341              |
| 2c                      | 436/1940                                     | 336              |

### 3.6.5 Scenario 3: Endast överskottsvärme

I detta scenario undersöks vilket pris överskottsvärmen behöver ligga på för att uppnå mer kostnadseffektiva fjärrvärmesystem jämfört med dagens system i Uppsala och Stockholm, om värmelasten bara skulle försörjas av överskottsvärme.

För att räkna ut vad överskottsvärmen maximalt får kosta per MWh i detta scenario dividerades den totala systemkostnaden för basfallet med totala värmeproduktionen för året, enligt

$$Kostnad_{IWH} [kr/MWh] = \frac{Totalkostnad_{Basfall} [kr]}{Fjärrvärmeproduktion_{\text{år}} [MWh]} \quad (2)$$

### 3.6.6 Scenario 4: Överskottsvärme och avfall

Det billigaste bränslet som används i fjärrvärmesystemen är avfall, som i dagsläget ligger på ett negativt pris. Detta scenario syftar till att undersöka hur produktionen påverkas när överskottsvärme ersätter alla anläggningar förutom de som förbränner avfall. I scenariot undersöks därför vid vilken kostnad på överskottsvärmen som detta uppfylls, för att skapa ett kostnadsoptimalt fall för överskottsvärmens integration.

Förutom att simulera scenariot med timvisa elpriser genomfördes även simuleringar där elpriset sattes till ett konstant värde motsvarande medelpriset för el under 2024. Syftet med dessa simuleringar är att tydliggöra den genomsnittliga kostnaden för de produktionsenheter vars drift påverkas av elpriset under året. Eftersom kostnaderna för värmepumparna och kraftvärmeverken varierar kraftigt med elpriset används den genomsnittliga kostnaden för att eliminera effekten av extrema prisvariationer.

### **3.6.7 Scenario 5: Utan avfall**

I bränslemixen för fjärrvärme har avfallsförbränningen stor påverkan på koldioxidutsläppen. Ett möjligt sätt att bidra till Sveriges mål om nettonollutsläpp till 2045 är därför att minska avfallsförbränningen och istället öka användningen av överskottsvärme. Det aktuella scenariot syftar därför till att simulera ett fall där allt avfall tas bort från fjärrvärmesystemet och överskottsvärmen från Forsmark är integrerad.

Scenariot simulerades både med och utan överskottsvärme, för att möjliggöra en jämförande analys av dess påverkan på systemet. Överskottsvärmen sattes till ett fast pris på 340 kr/MWh, baserat på Svenssons (2025) resultat och kan således anses verklighetstroget. För en mer nyanserad analys genomfördes även simuleringar där priset på överskottsvärmen varierades till 300 kr/MWh respektive 380 kr/MWh.

### **3.6.8 Scenario 6: Pensionerade anläggningar**

Det sista scenariot syftar till att simulera fjärrvärmesystemen utifrån hur de kan tänkas se ut i framtiden. Vissa anläggningar är mer utdaterade än andra, och det kommer krävas stora investeringar av fjärrvärmebolagen för att rusta upp dessa. Av den anledningen finns det incitament från företagen att pensionera vissa anläggningar, och därmed ta dem ur drift. I scenariot undersöks överskottsvärmens inverkan på ett system där vissa anläggningar pensionerats.

Vilka anläggningar som antas pensioneras i detta arbete är baserat på information om hur gamla de är, och när de senast renoverades. Det har gjorts ett antagande om en livslängd på ca 50 år för samtliga anläggningar.

I Uppsala antas Avfallsblock 1-4, med en kapacitet på 62 MW, pensioneras då det är den äldsta anläggningen i systemet, och behövs livstidsförlängas eller bytas ut runt 2035-2040 (Representant 2 Vattenfall, 2026). I Stockholm har ett flertal anläggningar och pannor identifierats som gamla. Först och främst Hässelbyverket som togs i drift 1959, där inga större renoveringar har dokumenterats (Stockholm Exergi, u.å.a). Hela anläggningen antas därmed pensioneras, vilket motsvarar 330 MW baserat på pelletsförbränning. Fortsättningsvis har även några av värmepumparna från Hammarbyverket antagits pensioneras, på totalt 150 MW, då dessa togs i drift 1983 (Stockholm Exergi, 2026a). Vidare, pensioneras oljepannan P5 på 90MW som är en del av Högdalenverket, eftersom dess år för idrifttagande var 1979 (Stockholm Exergi, 2026b). Utöver dessa anläggningar har även värmepumpar på 100 MW

från Norrenergi, och biooljepannan i Fisksätra på 20MW från Vattenfall att pensionerats (Norrenergi, 2023; Vattenfall, u.å.c)

Även i detta scenario simulerades systemen både med och utan överskottsvärme. Priset på överskottsvärmen sattes till 300, 340 och 380 kr/MWh.

### 3.6.9 Sammanställning Scenarier

I Tabell 12 redovisas en sammanställning av samtliga scenarier som undersöks i studien.

*Tabell 12. Sammanställning av arbetets samtliga scenarier.*

| Scenarier                    |                                                              |                                   |                                                                                                                                     |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Scenario                     | Installerad kapacitet överskottsvärme [MW] Uppsala/Stockholm | Pris överskottsvärme [kr/MWh]     | Scenariobeskrivning                                                                                                                 |
| 1. Basfall                   | -                                                            | -                                 | Fjärrvärmesystemen idag - utan överskottsvärme                                                                                      |
| 2a. Svensson                 | 50/1000                                                      | 354                               | Integrering av överskottsvärme med pris och kapacitet från Svenssons låga scenario.                                                 |
| 2b. Svensson                 | 100/1500                                                     | 341                               | Integrering av överskottsvärme med pris och kapacitet från Svenssons höga scenario.                                                 |
| 2c. Svensson                 | 436/1940                                                     | 336                               | Integrering av överskottsvärme med pris och kapacitet från Svenssons optimerade scenario.                                           |
| 3. Endast överskottsvärme    | Fullt                                                        | Beräknas. Se resultat.            | Beräknar vilket maximalt pris överskottsvärmen kan ha för att ensamt skapa ett mer kostnadseffektivt fjärrvärmesystem än basfallet. |
| 4. Överskottsvärme & avfall  | 500/2000                                                     | Undersöks iterativt. Se resultat. | Undersöker vid vilket pris överskottsvärme konkurrerar ut samtliga produktionslag förutom avfallsförbränning.                       |
| 5. Utan avfall               | 500/2000                                                     | 300/340/380                       | Fjärrvärmesystem utan avfallsförbränning där överskottsvärme integreras till varierande kostnader.                                  |
| 6. Pensionerade anläggningar | 500/2000                                                     | 300/340/380                       | Fjärrvärmesystem där äldre produktionsanläggningar pensioneras och överskottsvärme integreras till varierande kostnader.            |

## 3.7 Känslighetsanalys

En känslighetsanalys är en metod som används för att undersöka hur känsligt ett resultat är vid förändringar av indatan (Kindbom, Gustafsson, 2017). Syftet med en känslighetsanalys är att förstå vilka faktorer som har störst påverkan på resultatet och hur osäkerhet i indata kan påverka slutsatserna. Resultaten beror av antaganden och uppskattningar som kan vara mer

eller mindre osäkra. Genom att systematiskt ändra värdena på vissa variabler, som bedöms rymma osäkerheter, visas hur stabilt och robust resultatet är mot förändringar i dessa. För att undersöka dessa osäkerheter kommer systemkostnader och värmeproduktion från överskottsvärmen att analyseras.

### **3.7.1 El- och biobränslepriser**

I denna studie har kostnaden för el och biobränsle identifierats som de främsta osäkerhetsfaktorerna. Elprismarknaden är rörlig och påverkas av många olika faktorer vilket resulterar i fluktuerande priser (Vattenfall, 2025a). Biobränslepriserna har sedan år 2022, på grund av geopolitiska faktorer, ökat drastiskt, och därmed är det osäkert hur dess prissättning kommer att se ut i framtiden (Hallman, 2025). De priser som används i simuleringarna bygger på nutida data och kan därför skilja sig från de kostnader som gäller när överskottsvärmen börjar användas. Eftersom simuleringsmodellen syftar till att ge det mest kostnadsoptimala utfallet, är prissättningen för dessa två bränslen centralt för resultatets utfall.

I känslighetsanalysen simuleras fjärrvärmesystemen med olika värden på el och fasta biobränslen för att undersöka hur detta påverkar resultaten. Priset på bioolja inkluderades inte i prisvariationerna, eftersom det är betydligt högre och inte bedöms påverka användningen av överskottsvärmen i samma utsträckning. Elpriser från åren 2020, 2022 och 2024, vilka har olika prisbild, har använts i simuleringarna. Elpriserna från 2024, som använts i arbetets ursprungliga scenarier, representerar medelhöga elpriser. Vidare användes elpriser från 2020 som ett lägre analysfall, och elpriser från 2022 som ett högre. Elpriserna för 2020 och 2022 är inhämtade från Energi Data Service (2020, 2022). Eftersom dessa värden presenterades i euro omräknades de till SEK med hjälp av de växelkurser som gällde för respektive dag under de aktuella åren, vilka hämtades från Exchange Rates UK (2020, 2022). Priset på biobränsle analyserades också utifrån ett lågt, ett medelhögt och ett högt analysfall. Fallet med medelhöga biobränslepriser utgår från dagens aktuella prisnivåer, vilka har använts i arbetets ursprungliga scenarier. Värdena för det lägre analysfallet är baserat på hur priserna för biobränslen såg ut innan prishöjningarna 2022, vilka har hämtats från Energimyndigheten (2026b). I det sista analysfallet antas en prisökning på 50%. Storleken på prisökningen har valts utifrån bedömningen att dagens biobränslepriser redan befinner sig på relativt höga nivåer. En prisökning på uppemot 100%, motsvarande den utveckling som observerats under de senaste fem åren, bedöms därför som mindre sannolik. En ökning på 50% anses i stället representera ett rimligt men samtidigt tydligt analysfall, där effekterna av högre biobränslepriser kan analyseras utan att prisnivåerna blir orealistiska. De olika värdena på biobränslena presenteras i Tabell 13.

Totalt undersöktes nio olika analysfall, där respektive pris på biobränslena simulerades med respektive elpris. För varje fall simulerades fjärrvärmesystemens basfall för Uppsala och Stockholm, både utan överskottsvärme och med överskottsvärme prissatt till 340 kr/MWh, med en installerad kapacitet på 500 respektive 2000 MW. Resterande värden, bortsett från elpriset och biobränslepriserna, överensstämmer med det ursprungliga basfallet. Genom

simuleringarna undersöktes hur mycket överskottsvärme som användes i systemen vid de olika analysfallen, och hur detta påverkade de totala systemkostnaderna.

Slutligen undersöktes de genomsnittliga produktionskostnaderna för de olika noderna som påverkades av de olika prisförändringarna, för att identifiera trösklar för överskottsvärmen att förhålla sig till. För att göra detta sattes elpriset för hela året till det genomsnittliga elpriset för respektive år, vilka presenteras i Tabell 13. Detta för att synliggöra vilka produktionskostnader på biobränslen och värmepumpar som överskottsvärmen generellt skulle konkurrera med vid de olika analysfallen.

*Tabell 13. El- och biobränslepriser som används i känslighetsanalysen.*

| El- och biobränslepriser |                |                     |                  |                      |
|--------------------------|----------------|---------------------|------------------|----------------------|
| Prisnivå                 | El<br>[kr/MWh] | Pellets<br>[kr/MWh] | Flis<br>[kr/MWh] | Returträ<br>[kr/MWh] |
| Lågt                     | 224            | 300                 | 200              | 100                  |
| Medel                    | 360            | 510                 | 376              | 255                  |
| Högt                     | 1379           | 765                 | 564              | 383                  |

### 3.7.2 Värmelast

Fortsättningsvis har även den totala värmelasten för Stockholm respektive Uppsala identifierats som en osäkerhetsfaktor. Vid högre värmelaster ökar behovet av värmeproduktion i fjärrvärmesystemet, medan det minskar vid lägre värmelaster. I januari 2026 publicerade Boverket en rapport som presenterar framtidsmål- och estimeringar vad gäller olika energibesparingar. Det har identifierats en historisk trend sedan 2009 som indikerar att energianvändningen för uppvärmning och tappvarmvatten i byggnadsbeståndet kan förväntas minska med cirka 13 procent mellan 2020 och 2050 (Boverket, 2026). För att undersöka hur fjärrvärmesystemen med och utan överskottsvärme påverkas av olika värmelaster har två analysfall tagits fram. Det ena fallet analyserar effekterna vid en lägre värmelast, där en minskning på 13% antagits. Det andra fallet avser belysa konsekvenserna vid en högre värmelast, genom en motsvarande ökning på 13%. De olika värmelasterna simulerades först som nya basfall utan överskottsvärme, och därefter med inkludering av överskottsvärme till ett pris på 340 kr/MWh samt en installerad kapacitet på 500 MW respektive 2000 MW för Uppsala och Stockholm. Dessa analysfall har därefter jämförts med det ursprungliga basfallet, där värmelasten benämns som medel. Genom simuleringarna undersöktes hur mycket överskottsvärme som användes i systemen vid de olika fallen, och hur detta påverkade de totala systemkostnaderna. De olika värmelasterna som använts presenteras i Tabell 14.

Tabell 14. Värmelaster som används i känslighetsanalysen.

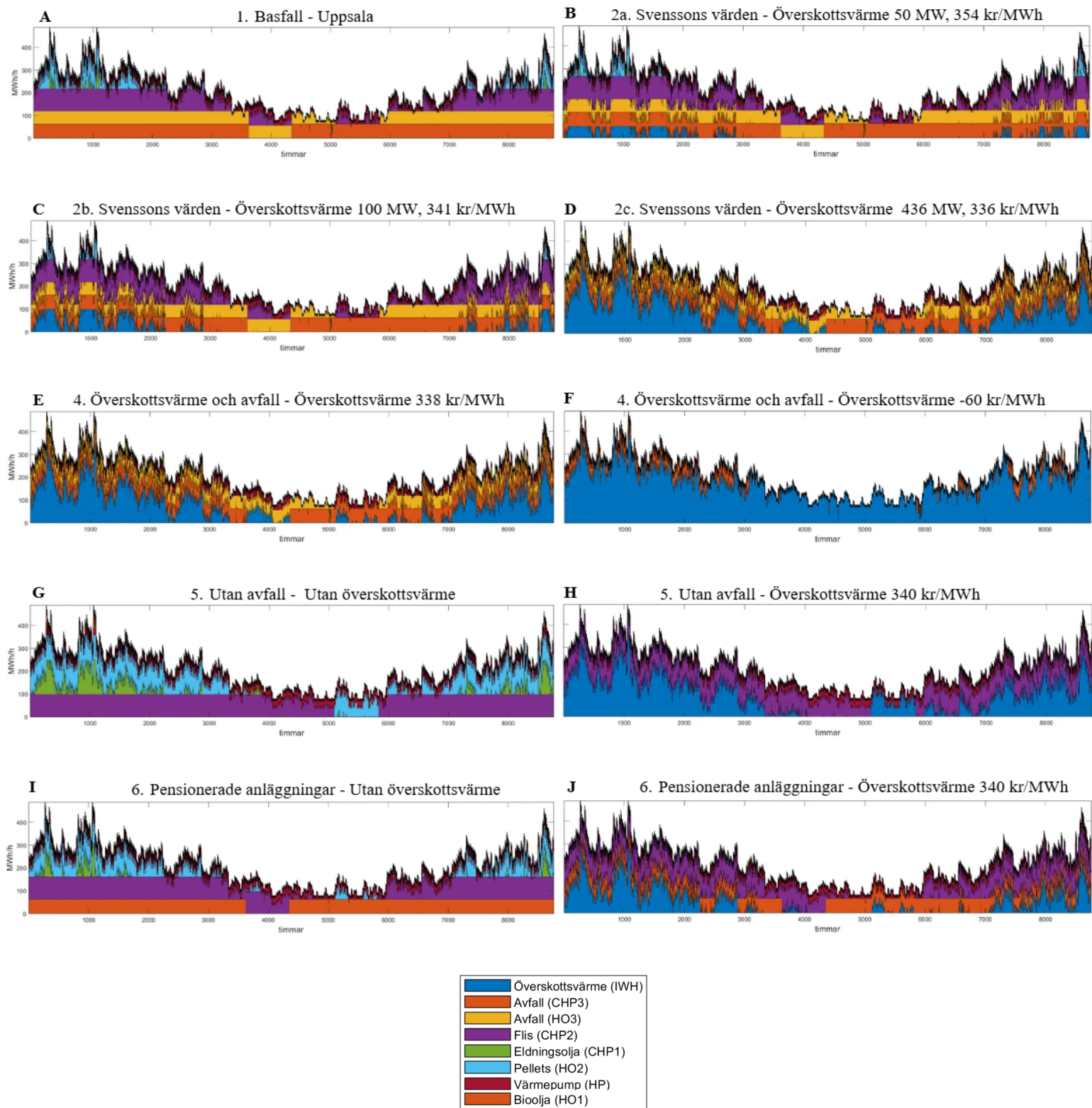
| Värmelaster   |                  |                    |
|---------------|------------------|--------------------|
| Värmelastnivå | Uppsala<br>[GWh] | Stockholm<br>[GWh] |
| Lågt          | 1576             | 10504              |
| Medel         | 1812             | 12073              |
| Högt          | 2048             | 13642              |

## 4. Resultat

I detta avsnitt presenteras arbetets resultat. Avsnittet är uppdelat mellan Uppsala och Stockholm, där det för respektive stad redovisas resultat för varje scenario. Presentationen av resultaten inleds med en sammanställning av grafer som visar värmeproduktionen från de genomförda simuleringarna, följt av figurer som visar produktionsmixen, systemkostnaderna och CO<sub>2</sub>-utsläppen i respektive scenario. Vidare redovisas ett scenario i taget där de tillhörande figurerna kommenteras. För varje scenario presenteras en tabell med en sammanställning av värmeproduktion, systemkostnader och CO<sub>2</sub>-utsläpp för samtliga simuleringar inom scenariot.

### 4.1 Uppsala

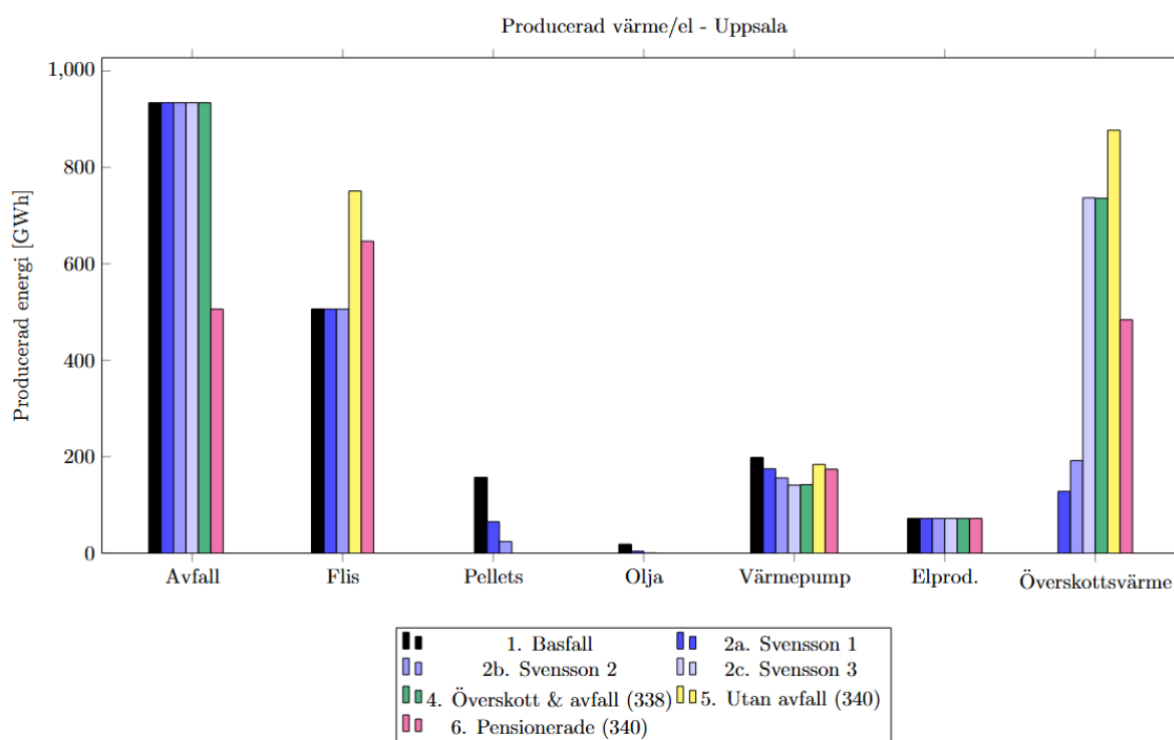
Nedan presenteras tio grafer från arbetets scenarier för Uppsala. Alla grafer visar värmeproduktionen över ett år, där varje färg representerar ett bränsleslag, vilket beskrivs i rutan längst ner i Figur 3. I graf A presenteras basfallet (Scenario 1), följt av Svenssons tre scenarier (Scenario 2a, 2b, 2c) i graf B-D. Graf E-F visar två utfall från Scenario 4. Graf E presenterar när överskottsvärmen ersätter allt biobränsle i systemet. Graf F visar när överskottsvärmen även ersätter all produktion från värmepumparna. Graf G-H visar värmeproduktionen när fjärrvärmesystemet inte har någon avfallsförbränning (Scenario 5), där graf G visar systemet utan överskottsvärmen och graf H när överskottsvärmen är integrerad. Slutligen presenteras scenariot med pensionerade anläggningar (Scenario 6) i graferna I-J. Graf I representerar scenariots system utan överskottsvärmen integrerad, och graf J när den sedan är integrerad. Scenario 3, med endast överskottsvärme, inkluderas inte i dessa grafer eller i kommande figurer 4-6, eftersom dess analys enbart baseras på beräkningar. Resultaten för Scenario 3 redovisas i avsnitt 4.1.3.



Figur 3. Värmeproduktion över ett år för olika scenarier - Uppsala.

I Figur 4 presenteras produktionen från respektive bränsleslag i Uppsalas fjärrvärmesystem för olika scenarier. De olika scenarierna representeras av staplar i olika färger, se förklarande textruta i Figur 4. I vissa scenarier har flera olika värden på överskottsvärmen simulerats, men i figuren visas endast produktionen för en av simuleringarna, där det använda värdet anges inom parentes i textrutan. I Scenario 4, överskottsvärme och avfall, konkurreras värmepumparna helt ut av överskottsvärmen i Figur 3F. För att uppnå detta scenario krävdes att överskottsvärmen tilldelades ett negativt pris. Ett sådant lågt pris bedöms som orealistiskt och illustrerar främst svårigheten i att helt ersätta värmepumparnas produktion i Uppsalas fjärrvärmesystem. Resultatet från den simuleringen inkluderas därför inte i figuren nedan.

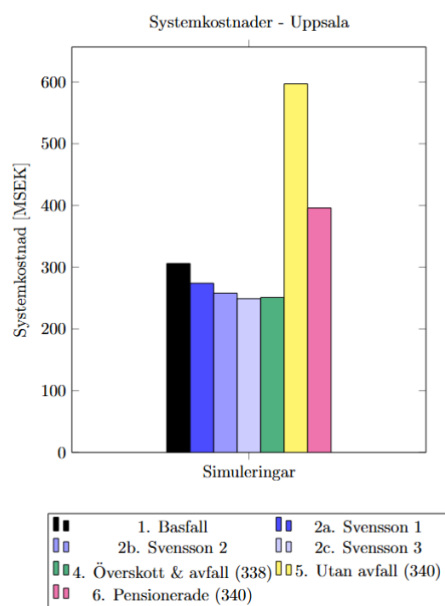
Figur 4 visar att avfallsförbränningen används till full kapacitet så länge den inte aktivt reduceras i systemet. Resultaten visar vidare att användningen av överskottsvärmen varierar mellan de olika scenarierna. När avfallsförbränningen reduceras används överskottsvärmen i betydligt större utsträckning. Överskottsvärmen utgör även en stor del av produktionen när den konkurrerat ut flisförbränning, se de ljusblåa och gröna staplarna. Pelletsförbränningen kvarstår till viss del i Scenario 2a och 2b, Svenssons scenarier, medan både pellets- och oljeförbränning helt trängs undan i de övriga scenarierna. Elproduktionen i Uppsalas fjärrvärmenät är kopplad till Avfallsblock 5 och visas vara lika stor i alla scenarier, förutom då Avfallsblock 5 tagits bort från systemet, i Scenario 5.



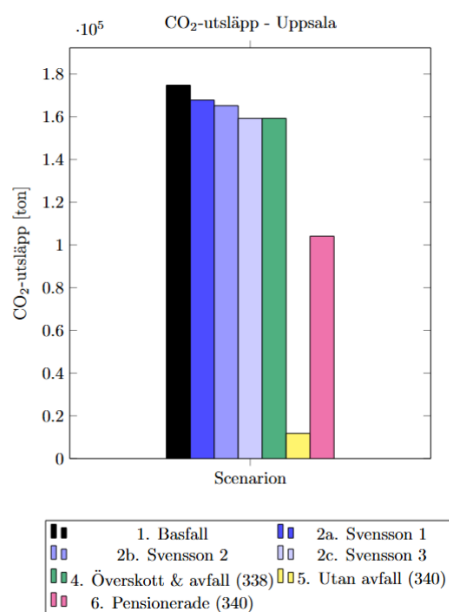
Figur 4. Producerad energi från varje bränsleslag för arbetets olika scenarier - Uppsala.

I Figur 5 och Figur 6 presenteras systemkostnaderna respektive CO<sub>2</sub>-utsläppen för de olika scenarierna. I jämförelse med basfallet noteras en minskning av systemkostnaderna för Scenario 2a-2c och för Scenario 4 när överskottsvärmen är prissatt till 338 kr/MWh. När

avfallet tas bort, i Scenario 5, kan däremot en markant kostnadsökning noteras, där systemkostnaden fördubblas i förhållande till basfallet. Även fallet med pensionerade anläggningar, Scenario 6, då avfallet reducerats, resulterar i en kostnadsökning jämfört med dagens system. I samtliga scenarier minskar CO<sub>2</sub>-utsläppen vid integrering av överskottsvärme, med särskilt stora minskningar då avfallsförbränningen reduceras. I Scenario 5, där avfallsförbränningen helt har tagits bort, återstår endast mycket låga utsläppsnivåer, se Figur 6.



Figur 5. Systemkostnader för arbetets olika scenarier - Uppsala.



Figur 6. CO<sub>2</sub>-utsläpp för arbetets olika scenarier - Uppsala.

#### 4.1.1 Scenario 1: Basfall

I Figur 3A går det att läsa av värmeproduktionen under ett år för respektive nod, och därmed bränsleslag, för Uppsalas fjärrvärmesystem. I figuren går det att notera att avfallsförbränning står för majoriteten av baslasten, tillsammans med delar av värmepumpen, framförallt vid lägre värmebehov. Vid växande värmebehov används flisförbränning i stor utsträckning, och vid höga värmebehov används även pellets och eldningsolja. I mitten av grafen kan avbrott från vissa anläggningar observeras, exempelvis en avfallsanläggning. Dessa avbrott uppstår i samband med att anläggningarna genomgår revision.

I Tabell 15 presenteras mängden värmeproduktion från respektive nod tillsammans med den totala systemkostnaden, som uppgick till 306 miljoner SEK för ett år. Tabellen presenterar även systemets totala CO<sub>2</sub>-utsläpp, på 174 775 ton.

*Tabell 15. Produktion, CO<sub>2</sub>-utsläpp och systemkostnad för Scenario 1: Basfall - Uppsala.*

| Basfall - Uppsala        |              |                       |                    |
|--------------------------|--------------|-----------------------|--------------------|
| Nod                      | Bränsle      | Värmeproduktion (GWh) | Elproduktion (GWh) |
| HO1                      | Bioolja      | 0                     | -                  |
| HO2                      | Pellets      | 157                   | -                  |
| HO3                      | Avfall       | 428                   | -                  |
| CHP1                     | Eldningsolja | 18                    | -                  |
| CHP2                     | Flis         | 506                   | -                  |
| CHP3                     | Avfall       | 506                   | 72                 |
| HP                       | Värmepump    | 198                   | -                  |
| CO <sub>2</sub> -utsläpp | 174 775 ton  |                       |                    |
| Total kostnad            | 306 MSEK/år  |                       |                    |

#### 4.1.2 Scenario 2: Svenssons scenarier

I Figur 3B respektive Figur 3C presenteras värmeproduktionen för simuleringarna där överskottsvärmen, IWH, har satts till ett pris på 354 respektive 341 kr/MWh. I dessa fall används överskottsvärmen endast vid kallare månader där värmebehovet är stort. När värmebehovet är som störst används överskottsvärmen till sin högsta kapacitet. Förutom avfallet prioriteras även flisförbränningen i Carpe Futurum, CHP 2, som har en produktionskostnad på 338 kr/MWh, före överskottsvärmen i dessa simuleringar. Även värmepumparna hamnar före överskottsvärmen i körordningen vid tillräckligt låga elpriser.

I Scenario 2c, när överskottsvärmen satts till ett pris på 336 kr/MWh och en installerad kapacitet på 436 MW, konkurreras flisförbränningen ut, vilket kan observeras i Figur 3D. I detta fall räcker också den installerade kapaciteten till att helt ersätta förbränningen av pellets och olja. I simuleringen ersätts alltså allt förutom avfallet och värmepumparna av överskottsvärmen. Överskottsvärmen används i det här fallet aldrig till sin fulla kapacitet, utan producerar som mest ungefär 350 MWh/h.

I Tabell 16 presenteras produktionen från respektive nod och de totala systemkostnaderna, för samtliga simuleringar i scenariot. Alla fallen resulterar i en lägre systemkostnad än för basfallet, med lägre kostnad ju lägre pris på överskottsvärmen. Samma mönster noteras för CO<sub>2</sub>-utsläppen, som i alla fall är lägre än i basfallet, och som minskar ju mer överskottsvärme som används.

*Tabell 16. Produktion, CO<sub>2</sub>-utsläpp och systemkostnad för Scenario 2: Svenssons scenarier - Uppsala.*

| Svenssons scenarier - Uppsala  |                 |                           |                          |                          |
|--------------------------------|-----------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Nod                            | Bränsle         | 2a. 50 MW<br>354 kr/MWh   | 2b. 100 MW<br>341 kr/MWh | 2c. 436 MW<br>336 kr/MWh |
|                                |                 | Producerad värme/cl [GWh] |                          |                          |
| HO1                            | Bioolja         | 0                         | 0                        | 0                        |
| HO2                            | Pellets         | 65                        | 24                       | 0                        |
| HO3                            | Avfall          | 428                       | 428                      | 428                      |
| CHP1                           | Eldningsolja    | 4                         | 0.3                      | 0                        |
| CHP2                           | Flis            | 506                       | 506                      | 0                        |
| CHP3                           | Avfall          | 506/72                    | 506/72                   | 506/72                   |
| HP                             | Värmepump       | 175                       | 156                      | 141                      |
| IWH                            | Överskottsvärme | 128                       | 192                      | 737                      |
| CO <sub>2</sub> -utsläpp [ton] |                 | 167 807                   | 165 202                  | 159 254                  |
| Total kostnad [MSEK/år]        |                 | 274                       | 258                      | 249                      |

#### 4.1.3 Scenario 3: Endast överskottsvärme

Den genomsnittliga produktionskostnaden för värme i dagens fjärrvärmesystem i Uppsala beräknades med ekvation (2) enligt

$$\frac{306 \cdot 10^6 \text{ kr}}{1812 \cdot 10^3 \text{ MWh}} = 168,9 \text{ kr/MWh}$$

I Scenario 3, där överskottsvärmen utgör den enda värmekällan i systemet, behöver priset alltså understiga 168,9 kr/MWh för att systemet ska bli mer kostnadseffektivt än dagens fjärrvärmesystem.

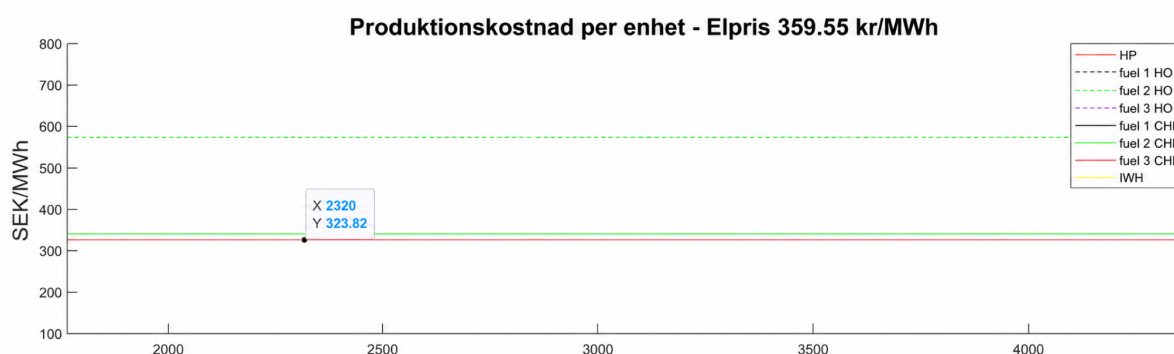
Eftersom detta system endast består av överskottsvärme hade det inte resulterat i något CO<sub>2</sub>-utsläpp.

#### 4.1.4 Scenario 4: Överskottsvärme och avfall

För att ersätta allt förutom avfall med överskottsvärmen har en kostnad på -60 kr/MWh identifierats, se Figur 3F. Det är vid detta pris som överskottsvärmen konkurrerar med värmepumpen vid elprisets billigaste timme som låg på -599.6 kr/MWh. Vid detta låga pris konkurreras dock även majoriteten av avfallsförbränningen ut, med endast viss produktion kvar från den avfallseldade kraftvärmen. Vidare har ytterligare trösklar identifierats, där

överskottsvärmen ersätter delar av den återstående produktionen utöver avfallsförbränning. Carpe Futurum (CHP2, flisförbränning) har en produktionskostnad på 338 kr/MWh i simuleringen, vilket innebär att överskottsvärmen konkurrerar ut allt biobränsle när den kostar mindre än 338 kr/MWh. Vid denna kostnad är pelletsförbränninegn (HO2) redan utkonkurrerad. Den anläggning som fortfarande är kvar, utöver avfallet, vid denna kostnad är värmepumpen, se Figur 3E. Vidare undersöktes när majoriteten av produktionen från värmepumparna konkurrerades ut. Om överskottsvärmen kostar 180 kr/MWh är det drygt 10% kvar av värmepumpen, jämfört med dess produktion från basfallet. Denna tröskel inträffar när elpriset ligger på 0 kr/MWh. Om överskottsvärmen kostar 180 kr/MWh kommer värmepumpen därmed gå före vid negativa elpriser, och bli utkonkurrerad vid positiva elpriser.

Vid simulering med det genomsnittliga elpriset för 2024, på 359.55 kr/MWh, kostar värmepumpen 323.82 kr/MWh. Det innebär att överskottsvärmen, vid det genomsnittliga elpriset, kan konkurrera ut samtliga produktionsslag utom avfall vid en kostnad på 323 kr/MWh, se Figur 7.



Figur 7. Produktionskostnad per enhet vid genomsnittligt elpris.

I Tabell 17 presenteras produktionen från respektive nod, CO<sub>2</sub>-utsläppen och de totala systemkostnaderna, för samtliga simuleringar från Scenario 4. Resultaten presenteras för olika prisnivåer på överskottsvärmen, utifrån de tröskelvärden som identifierats. Systemkostnaden minskar markant för varje fall. CO<sub>2</sub>-utsläppen uppvisar en marginell minskning mellan de första två simuleringarna, medan en markant minskning observeras när avfallet i stor utsträckning konkurrerats ut i den tredje simuleringen.

Tabell 17: Produktion, CO<sub>2</sub>-utsläpp och systemkostnad för Scenario 4: Överskottsvärme och avfall - Uppsala.

| Överskottsvärme och avfall - Uppsala |                 |                               |                               |                               |
|--------------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Nod                                  | Bränsle         | Överskottsvärme<br>338 kr/MWh | Överskottsvärme<br>180 kr/MWh | Överskottsvärme<br>-60 kr/MWh |
|                                      |                 | Producerad värme/el [GWh]     |                               |                               |
| HO1                                  | Bioolja         | 0                             | 0                             | 0                             |
| HO2                                  | Pellets         | 0                             | 0                             | 0                             |
| HO3                                  | Avfall          | 428                           | 428                           | 0                             |
| CHP1                                 | Eldningsolja    | 0                             | 0                             | 0                             |
| CHP2                                 | Flis            | 0                             | 0                             | 0                             |
| CHP3                                 | Avfall          | 506/72                        | 506/72                        | 193/28                        |
| HP                                   | Värmepump       | 142                           | 22                            | 0                             |
| IWH                                  | Överskottsvärme | 736                           | 856                           | 1619                          |
| CO <sub>2</sub> -utsläpp [ton]       |                 | 159 286                       | 156 452                       | 35 596                        |
| Total kostnad [MSEK/år]              |                 | 251                           | 126                           | -119                          |

#### 4.1.5 Scenario 5: Utan avfall

När avfallsanläggningarna och överskottsvärmen inte inkluderas som en del av Uppsalasystemet utgör biobränslen en större del av värmeproduktionen, vilket kan observeras i Figur 3G. Både användningen av pellets, HO2, och flis, CHP2 ökar i jämförelse med basfallet. Biobränslena täcker dock inte hela värmebehovet, utan det krävs även förbränning av eldningsolja, CHP1 och bioolja, HO1 för att möta efterfrågan.

I Figur 3H presenteras värmeproduktionen, utan avfall, när överskottsvärmen är med i systemet, prissatt till 340 kr/MWh. Från figuren observeras att olja och pellets helt konkurrerats ut från bränslemixen. Värmeproduktionen kommer därmed endast från överskottsvärme, flisförbränning och värmepumpar. Vid detta pris på överskottsvärmen prioriteras den efter flisförbränningen från Carpe Futurum, vilken kostar 338 kr/MWh. Om överskottsvärmen skulle hamna på ett pris under 338 kr/MWh hade den alltså valts före Carpe Futurum i körordningen.

I Tabell 18 presenteras systemkostnaderna, CO<sub>2</sub>-utsläppen, samt produktionen från de olika noderna, både utan överskottsvärme och med överskottsvärme prissatt till 380, 340 samt 300 kr/MWh. Systemkostnaderna blir mycket högre utan avfallet, men en stor kostnadsförbättring kan identifieras vid införandet av överskottsvärmen. Ju lägre pris på överskottsvärmen, desto större andel av produktionen från värmepumparna ersätts. I simuleringen med det lägsta priset på 300 kr/MWh har även flisförbränningen helt fasats ut.

Fortsättningsvis går det att identifiera att ett fjärrvärmesystem utan avfall har betydligt lägre CO<sub>2</sub>-utsläpp vid jämförelse med basfallet. Vid integrering av överskottsvärmen minskar utsläppen markant.

Tabell 18. Produktion, CO<sub>2</sub>-utsläpp och systemkostnad för Scenario 5: Utan avfall - Uppsala.

| Utan avfall - Uppsala          |                 |                           |                               |                               |                               |
|--------------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Nod                            | Bränsle         | Utan<br>överskottsvärme   | Överskottsvärme<br>380 kr/MWh | Överskottsvärme<br>340 kr/MWh | Överskottsvärme<br>300 kr/MWh |
|                                |                 | Producerad värme/el [GWh] |                               |                               |                               |
| HO1                            | Bioolja         | 8                         | 0                             | 0                             | 0                             |
| HO2                            | Pellets         | 583                       | 0                             | 0                             | 0                             |
| HO3                            | Avfall          | -                         | -                             | -                             | -                             |
| CHP1                           | Eldningsolja    | 196                       | 0                             | 0                             | 0                             |
| CHP2                           | Flis            | 751                       | 751                           | 751                           | 0                             |
| CHP3                           | Avfall          | -                         | -                             | -                             | -                             |
| HP                             | Värmepump       | 274                       | 204                           | 184                           | 155                           |
| IWH                            | Överskottsvärme | -                         | 857                           | 877                           | 1657                          |
| CO <sub>2</sub> -utsläpp [ton] |                 | 90 932                    | 12 254                        | 11 783                        | 3 668                         |
| Total kostnad [MSEK/år]        |                 | 905                       | 631                           | 597                           | 532                           |

#### 4.1.6 Scenario 6: Pensionerade anläggningar

I ett framtida fjärrvärmesystem, med Avfallsblock 1-4 pensionerat, används mer biobränsle och olja i värmeproduktionen. I Figur 3I presenteras hur produktionen ser ut innan överskottsvärmen är integrerad.

Vid integrering av överskottsvärmen med en kostnad på 340 kr/MWh minskar produktionen av olja och biobränsle. Avfallsblock 5, värmepumpen och Carpe Futurum utgör resterande värmeproduktion utöver överskottsvärmen, se Figur 3J.

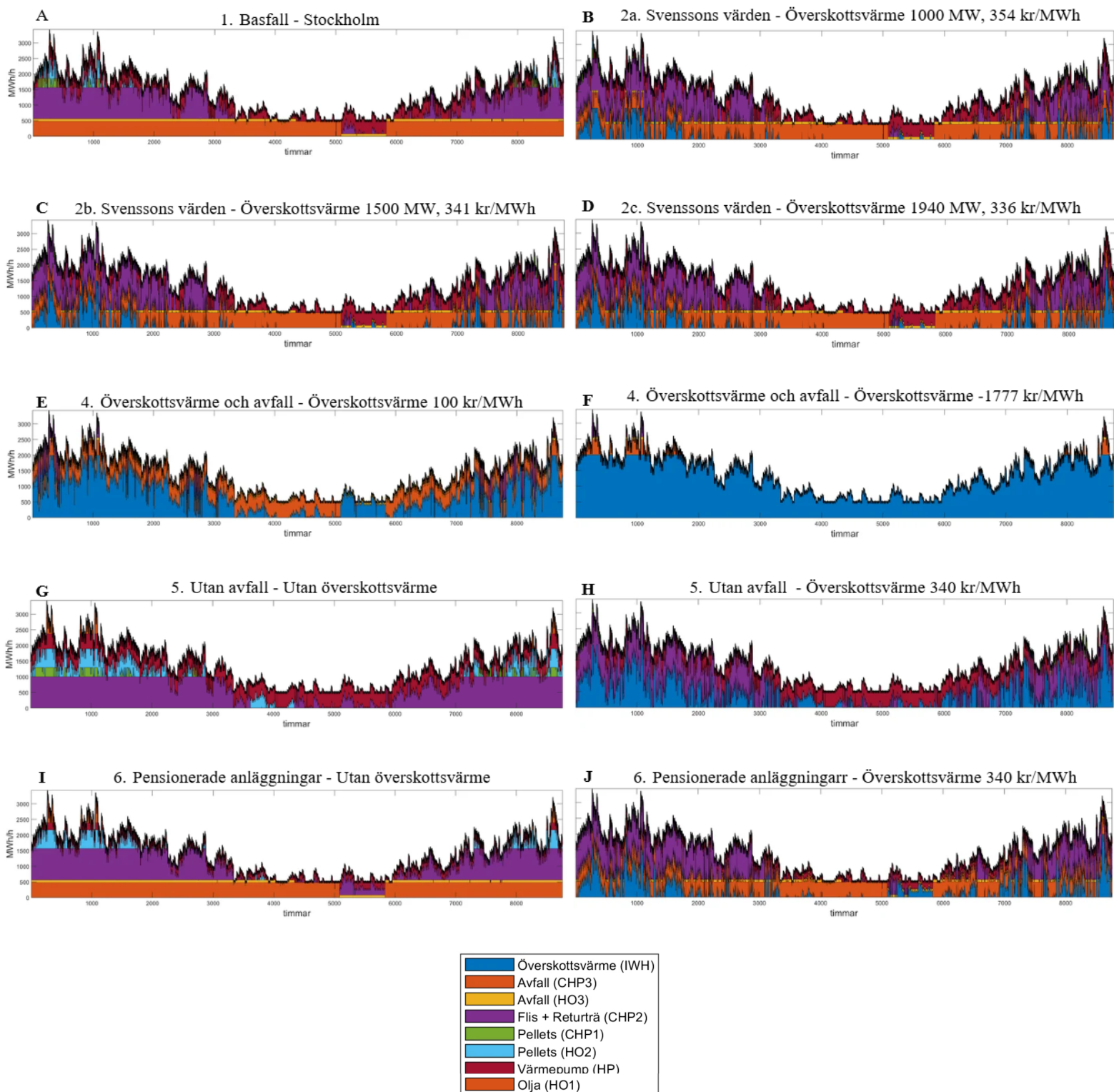
I Tabell 19 presenteras systemkostnaderna, koldioxidutsläppen samt produktionen från de olika noderna, både utan överskottsvärme och med överskottsvärme prissatt till 380, 340 och 300 kr/MWh. Vid integrering av överskottsvärmen framgår hur systemkostnaden minskar jämfört med simuleringen utan överskottsvärmen. Utan dess integrering används biobränslen och olja mer, och på så sätt ökar den totala systemkostnaden. Liksom i Scenario 5 observeras en markant minskning av CO<sub>2</sub>-utsläppen jämfört med basfallet i samtliga simuleringar, med ytterligare förbättringar vid integrering av överskottsvärme.

Tabell 19. Produktion, CO<sub>2</sub>-utsläpp och systemkostnad för Scenario 6: Pensionerade anläggningar - Uppsala.

| Pensionerade anläggningar - Uppsala |                 |                           |                               |                               |                               |
|-------------------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Nod                                 | Bränsle         | Utan<br>överskottsvärme   | Överskottsvärme<br>380 kr/MWh | Överskottsvärme<br>340 kr/MWh | Överskottsvärme<br>300 kr/MWh |
|                                     |                 | Producerad värme/el [GWh] |                               |                               |                               |
| HO1                                 | Bioolja         | 0.5                       | 0                             | 0                             | 0                             |
| HO2                                 | Pellets         | 347                       | 0                             | 0                             | 0                             |
| HO3                                 | Avfall          | -                         | -                             | -                             | -                             |
| CHP1                                | Eldningsolja    | 59                        | 0                             | 0                             | 0                             |
| CHP2                                | Flis            | 647                       | 647                           | 647                           | 0                             |
| CHP3                                | Avfall          | 506/72                    | 506/72                        | 506/72                        | 506/72                        |
| HP                                  | Värmepump       | 251                       | 192                           | 174                           | 147                           |
| IWH                                 | Överskottsvärme | -                         | 466                           | 484                           | 1159                          |
| CO <sub>2</sub> -utsläpp [ton]      |                 | 132 602                   | 104 524                       | 104 109                       | 97 044                        |
| Total kostnad [MSEK/år]             |                 | 529                       | 414                           | 396                           | 351                           |

## 4.2 Stockholm

För Stockholm presenteras tio grafer i Figur 8, kopplade till arbetets olika scenarier. Graferna visar, precis som för Uppsala, värmeproduktionen under ett år, där respektive färg representerar ett specifikt bränsleslag. Färgerna för bränsleslagen skiljer sig något från i Uppsalas simuleringar, se rutan längst ner i Figur 8. Basfallet (Scenario 1) redovisas i graf A, följt av Svenssons tre scenarier (Scenario 2a, 2b, 2c) i graf B-D. I graf E-F presenteras två utfall från scenariot med enbart överskottsvärme och avfall (Scenario 4). I graf E presenteras ett utfall där cirka 90% av all produktion, förutom från avfallsförbränning, trängts undan. Graf F visar när överskottsvärmen konkurrerar ut all produktion förutom avfallet. Graferna G-H visar värmeproduktionen i ett fjärrvärmesystem utan avfallsförbränning (Scenario 5). Graf G illustrerar systemets sammansättning före integration av överskottsvärme, medan graf H visar systemet efter att överskottsvärmen har integrerats. Vidare presenteras scenariot med pensionerade anläggningar (Scenario 6) i graferna I-J. Graf I visar systemets värmeproduktion före integration av överskottsvärme, medan graf J illustrerar situationen efter att överskottsvärmen har införts i systemet. Avslutningsvis inkluderas inte Scenario 3, som enbart bygger på överskottsvärme, i dessa grafer eller i de kommande figurerna 9-11. Liksom i fallet med Uppsala, baseras resultatet i scenariot endast på beräkningar, vilka presenteras i avsnitt 4.2.3.

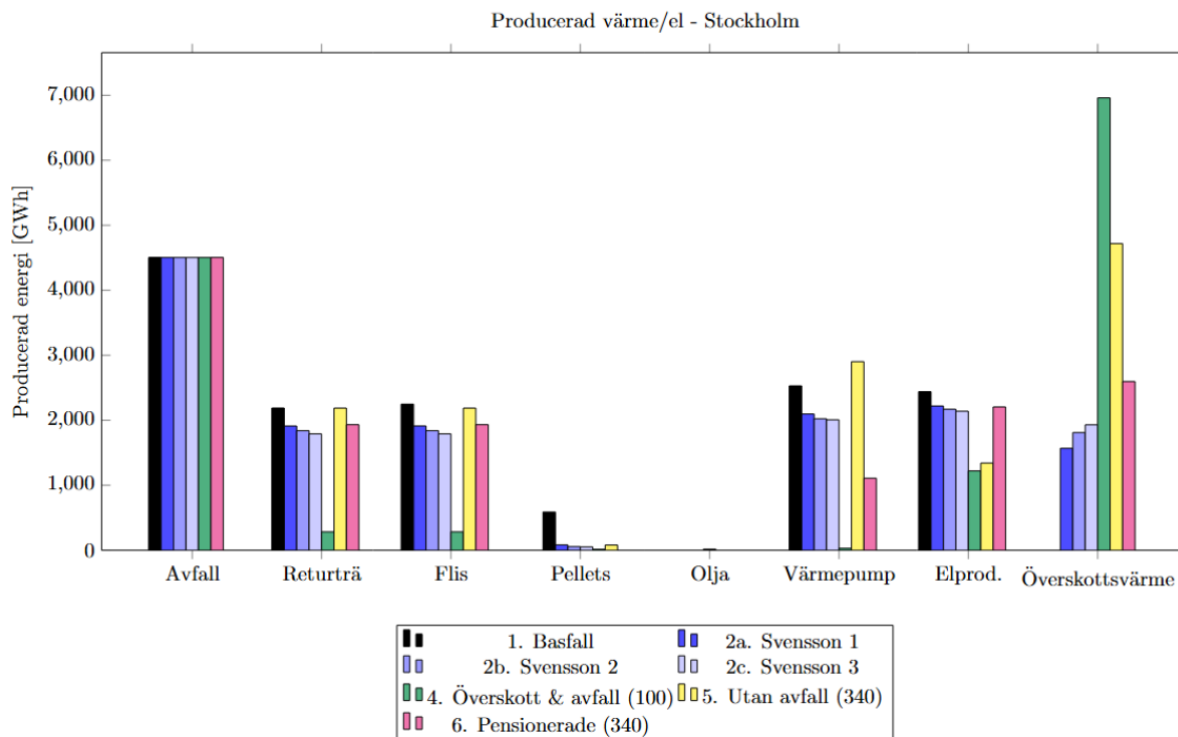


Figur 8. Värmeproduktion över ett år för olika scenarier - Stockholm.

Liksom i Uppsalas fjärrvärmesystem krävdes negativa kostnader för överskottsvärmen för att uppnå ett system baserat enbart på överskottsvärme och avfall, vilket gör detta scenario orealistiskt. Resultaten från simuleringen som presenteras i Figur 8F, med överskottsvärmen till ett pris på -1777 kr/MWh, redovisas därför inte i Figur 9-11. Däremot redovisas simuleringen där cirka 90% av all annan produktion fasats ut, se Figur 8E, i kommande figurer.

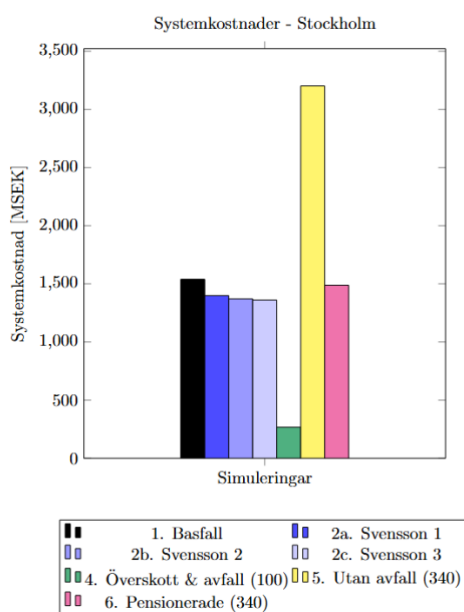
I Figur 9 presenteras värmeproduktionen för respektive bränsleslag i Stockholms fjärrvärmesystem för olika simuleringar av arbetets scenarier. Vid analys av produktionsmixen kan det i första hand observeras hur avfallet används till dess fulla kapacitet om den är inkluderad i systemet. Fortsättningsvis framgår det att både olja och pellets utgör en marginell andel i ett så stort fjärrvärmesystem som Stockholms, och de gör därmed inga större anspråk i något av scenarierna.

Vid jämförelse av den totala produktionsmixen mellan de olika scenarierna går det att identifiera hur mixen är mer eller mindre jämnt fördelad för Svenssons tre olika scenarier, Scenario 2a-2c. Liknande observation går att göra för systemet med pensionerade anläggningar, i Scenario 6, med en viss minskning av produktionen från värmepumpar och en ökning av användningen av överskottsvärme. När avfallet exkluderas från systemet, i Scenario 5, observeras en signifikant ökning av produktionen av överskottsvärme, vilket är en direkt konsekvens av att avfallsförbränningen inte längre ingår. Vidare identifieras en ännu större ökning av överskottsvärmens produktion i Scenario 4, med överskottsvärme och avfall. Det är viktigt att ha i åtanke att överskottsvärmen här är satt till 100 kr/MWh, vilket är relativt lågt. I detta scenario är det biobränslena som konkurreras ut och därmed utgör mindre del av produktionsmixen. Slutligen kan det även noteras hur elproduktionen minskar när överskottsvärmen introduceras. Ju högre andel överskottsvärme i systemet, desto mindre el produceras från kraftvärmeverken.

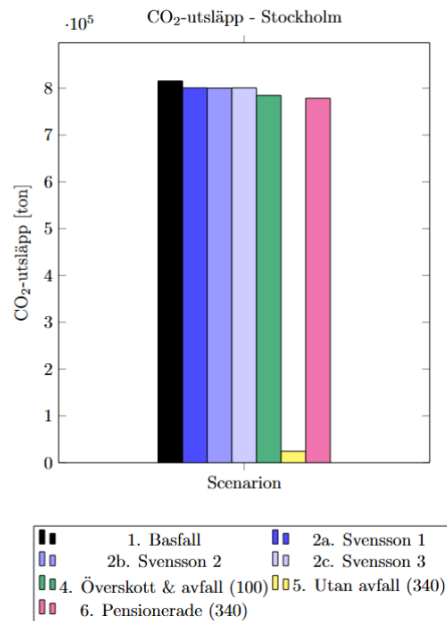


Figur 9. Producerad energi från varje bränsleslag för arbetets olika scenarier - Stockholm.

I Figur 10 presenteras systemkostnader för de redovisade scenarierna, och i Figur 11 CO<sub>2</sub>-utsläppen för motsvarande scenarier. Det mest framträdande resultatet är den betydande kostnadsökningen och den stora reduktionen av CO<sub>2</sub>-utsläpp i scenariot utan avfallsförbränning. I samtliga övriga fall observeras en viss minskning av både systemkostnader och CO<sub>2</sub>-utsläpp jämfört med basfallet.



Figur 10. Systemkostnader för arbetets olika scenarier - Stockholm.



Figur 11. CO<sub>2</sub>-utsläpp för arbetets olika scenarier - Stockholm.

#### 4.2.1 Scenario 1: Basfall

I Figur 8A går det att läsa av hur mycket som har producerats under ett år för respektive nod i Stockholms fjärrvärmesystem, som det är utformat idag. Vid högre värmebehov kan det observeras att HO1, HO2 och CHP1 används, vilka drivs med olja respektive pellets och därmed utgör dyrare produktionsalternativ. Vid lägre värmebehov räcker i stor utsträckning produktionen från avfallsförbränning. Värmepumpen används i ungefär lika stor utsträckning över hela året. CHP2 representerar kraftvärmeproduktion från flisförbränning, och utnyttjas i hög grad i basfallet.

I Tabell 20 presenteras mängden värmeproduktion från respektive nod, tillsammans med den totala systemkostnaden, som uppgick till 1539 miljoner SEK för ett år, samt de totala CO<sub>2</sub>-utsläppen, som uppgick till 815 533 ton.

Tabell 20. Produktion, CO<sub>2</sub>-utsläpp och systemkostnad för Scenario 1: Basfall - Stockholm.

| Basfall - Stockholm      |                 |                       |                    |
|--------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------|
| Nod                      | Bränsle         | Värmeproduktion (GWh) | Elproduktion (GWh) |
| HO1                      | Olja            | 17                    | -                  |
| HO2                      | Pellets + Flis  | 421                   | -                  |
| HO3                      | Avfall          | 630                   | -                  |
| CHP1                     | Pellets         | 227                   | 82                 |
| CHP2                     | Flis + Returträ | 4375                  | 1312               |
| CHP3                     | Avfall          | 3876                  | 1046               |
| HP                       | Värmepump       | 2529                  | -                  |
| CO <sub>2</sub> -utsläpp | 815 533 ton     |                       |                    |
| Total kostnad            | 1539 MSEK/år    |                       |                    |

#### 4.2.2 Scenario 2: Svenssons scenarier

I Figur 8B, Figur 8C och Figur 8D redovisas värmeproduktionen i Stockholms fjärrvärmesystem vid integrering av överskottsvärme prissatt till 354, 341 respektive 336 kr/MWh. Då kraftvärmen och värmepumparna varierar i pris med avseende på elpriset finns det i detta system inga tydliga trösklar för när överskottsvärmen går före dessa anläggningar i körordningen. Inte i någon av simuleringarna ersätts kraftvärmen eller värmepumparna helt, men vid lägre pris på överskottsvärmen trängs mer av dessa undan. Oljan är ersatt i alla simuleringar, men endast i Scenario 2c räcker den installerade kapaciteten på överskottsvärmen till för att helt ta bort värmeverken som förbränner bibränslen, HO2, från produktionsmixen.

I Tabell 21 presenteras produktionen för varje nod, den totala systemkostnaden och CO<sub>2</sub>-utsläppen, för Scenario 2a, 2b och 2c. Liksom i motsvarande scenarier för Uppsala resulterar alla scenarier till lägre systemkostnader jämfört med basfallet, där Scenario 2c, se Figur 8D, leder till det mest kostnadseffektiva systemet. Det går även att notera en minskning av CO<sub>2</sub>-utsläppen för samtliga simuleringar, vid jämförelse med basfallet.

Tabell 21. Produktion, CO<sub>2</sub>-utsläpp och systemkostnad för Scenario 2: Svenssons scenarier - Stockholm.

| Svenssons scenarier - Stockholm |                 |                           |                           |                           |
|---------------------------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Nod                             | Bränsle         | 2a. 1000 MW<br>354 kr/MWh | 2b. 1500 MW<br>341 kr/MWh | 2c. 1940 MW<br>336 kr/MWh |
|                                 |                 | Producerad värme/el [GWh] |                           |                           |
| HO1                             | Olja            | 0                         | 0                         | 0                         |
| HO2                             | Pellets + Flis  | 10                        | 0.06                      | 0                         |
| HO3                             | Avfall          | 631                       | 631                       | 631                       |
| CHP1                            | Pellets         | 74/27                     | 56/20                     | 52/19                     |
| CHP2                            | Flis + Returträ | 3821/1146                 | 3679/1104                 | 3581/1074                 |
| CHP3                            | Avfall          | 3873/1046                 | 3873/1046                 | 3873/1046                 |
| HP                              | Värmepump       | 2096                      | 2023                      | 2007                      |
| IWH                             | Överskottsvärme | 1569                      | 1811                      | 1930                      |
| CO <sub>2</sub> -utsläpp [ton]  |                 | 800 852                   | 800 277                   | 800 787                   |
| Total kostnad [MSEK/år]         |                 | 1399                      | 1371                      | 1361                      |

#### 4.2.3 Scenario 3: Endast överskottsvärme

Kostnaden för överskottsvärme för att skapa ett minst lika kostnadseffektivt system som idag, i ett scenario där det skulle vara den enda värmekällan i Stockholms fjärrvärmesystem, beräknades med hjälp av ekvation (2) enligt

$$\frac{1539 \cdot 10^6 \text{ kr}}{12073 \cdot 10^3 \text{ MWh}} = 127,5 \text{ kr/MWh}$$

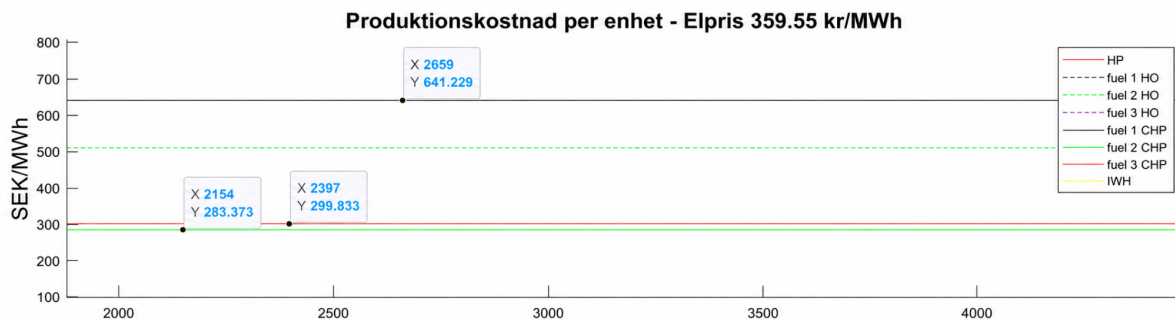
I Scenario 3 skulle överskottsvärmen alltså behöva ha en kostnad under 127,5 kr/MWh.

Eftersom detta fjärrvärmesystem endast består av överskottsvärme, hade det inte resulterat i något CO<sub>2</sub>-utsläpp.

#### 4.2.4 Scenario 4: Överskottsvärme och avfall

För att överskottsvärmen ska ersätta all produktion utöver avfallsförbränningen krävs en kostnad på -1777 kr/MWh, se Figur 8F. Det är vid det dyraste elpriset år 2024, på 7075.2 kr/MWh, som överskottsvärmen behöver kosta -1777 kr/MWh för att konkurrera ut kraftvärmen. Vid denna kostnad prioriteras överskottsvärmen även framför avfallet, men eftersom den installerade kapaciteten inte överskrider 2000 MW kan överskottsvärmen inte stå för hela värmebehovet. Eftersom en kostnad på -1777 kr/MWh är ett högst orimligt pris, och även baserat på ett specifikt elpris, har fler olika trösklar identifierats. De anläggningar som är svårast att konkurrera ut med överskottsvärmen är värmepumpen och kraftvärmen. När överskottsvärmen kostar 100 kr/MWh är det knappt 10% kvar av all produktion från värmepumpen och de biobränslebaserade kraftvärmeverken i jämförelse med basfallet, se Figur 8E. Vid denna kostnad konkurrerar värmepumpen när elpriset är lägre än -180 kr/MWh, och kraftvärmeverken CHP1 och CHP2 konkurrerar när elpriset är högre än 967 kr/MWh respektive 1637 kr/MWh.

Vid simulering med det genomsnittliga elpriset för 2024, på 359,55 kr/MWh, kostar värmepumpen 299,8 kr/MWh och CHP2 283,4 kr/MWh, se Figur 12. Det innebär att överskottsvärmen, vid det genomsnittliga elpriset, kan konkurrera ut samtliga produktionsslag utom avfall vid en kostnad på 283 kr/MWh.



Figur 12. Produktionskostnad per enhet vid genomsnittligt elpris.

I Tabell 22 presenteras produktionen för varje nod samt den totala systemkostnaden och CO<sub>2</sub>-utsläppen för respektive simulering i Scenario 4, undantaget simuleringen med det genomsnittliga elpriset 2024. Utöver de tidigare presenterade simuleringarna genomfördes även en simulering där överskottsvärmen prissattes till 0 kr/MWh. Resultatet visade endast marginella skillnader i produktionen jämfört med scenariot där priset sattes till 100 kr/MWh.

Samtliga simuleringar resulterade i låga totala systemkostnader, vilket kan förklaras av det låga priset på överskottsvärmen. CO<sub>2</sub>-utsläppen var dessutom lägre än i basfallet för alla simuleringar. En mindre ökning av CO<sub>2</sub>-utsläppen observerades dock när överskottsvärmen prissattes till 0 kr/MWh jämfört med 100 kr/MWh, vilket beror på förändringar i elanvändningen och elproduktionen från värmepumpar och kraftvärmeverk.

Den sista simuleringen uppvisade den största minskningen av CO<sub>2</sub>-utsläpp, då nästan all biobränslebaserad produktion och värmepumpsdrift konkurrerades ut.

Tabell 22. Produktion, CO<sub>2</sub>-utsläpp och systemkostnad för Scenario 4: Överskottsvärme och avfall - Stockholm.

| Överskottsvärme och avfall - Stockholm |                 |                               |                             |                                 |
|----------------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Nod                                    | Bränsle         | Överskottsvärme<br>100 kr/MWh | Överskottsvärme<br>0 kr/MWh | Överskottsvärme<br>-1777 kr/MWh |
|                                        |                 | Producerad värme/el [GWh]     |                             |                                 |
| HO1                                    | Olja            | 0                             | 0                           | 0                               |
| HO2                                    | Pellets + Flis  | 0                             | 0                           | 0                               |
| HO3                                    | Avfall          | 631                           | 631                         | 31                              |
| CHP1                                   | Pellets         | 14/5                          | 11/4                        | 0                               |
| CHP2                                   | Flis + Returträ | 565/170                       | 253/76                      | 72/22                           |
| CHP3                                   | Avfall          | 3873/1046                     | 3798/1025                   | 426/115                         |
| HP                                     | Värmepump       | 30                            | 21                          | 20                              |
| IWH                                    | Överskottsvärme | 6960                          | 7360                        | 11524                           |
| CO <sub>2</sub> -utsläpp [ton]         |                 | 784 584                       | 773 772                     | 80 585                          |
| Total kostnad [MSEK/år]                |                 | 267                           | -448                        | -20542                          |

#### 4.2.5 Scenario 5: Utan avfall

Värmeproduktionen i ett system utan avfall och överskottsvärme presenteras i Figur 8G, och värmeproduktionen för scenariot där överskottsvärme inkluderas till ett pris på 340 kr/MWh visas i Figur 8H. Av Figur 8G framgår att olja i HO1, pellets och flis i HO2 samt pellets i CHP1 används för att täcka värmebehovet, utöver produktionen från värmepumpar och fliseldad kraftvärme i CHP2. Vid introduktion av överskottsvärmen består produktionen i huvudsak av värmepumpar, kraftvärme från förbränning av flis och överskottsvärme. En liten andel kraftvärme från pelletsförbränning finns kvar, medan oljan och biobränsleeldade värmeverken ersätts helt. Värdena för produktionen från de olika noderna presenteras i Tabell 23.

Från Tabell 23 identifieras en kostnadsförbättring av systemet när överskottsvärmen är inkluderad jämfört med när den inte är det. Detta som en konsekvens av att produktionen från olja och de biobränsleeldade värmeverken fasats ut. Systemkostnaderna förbättras med en billigare kostnad för överskottsvärmen, men värmepumparna och kraftvärmen utgör fortfarande betydande delar av produktionen vid de kostnader som simuleras i scenariot. Jämfört med basfallet observeras en betydande minskning av CO<sub>2</sub>-utsläppen när avfallet inte ingår i systemet. En markant minskning av utsläppen noteras också när överskottsvärmen inkluderas. Till skillnad från i Uppsalasystemet ökar CO<sub>2</sub>-utsläppen något när överskottsvärmen har ett lägre pris. Detta är en konsekvens av att överskottsvärmen konkurrerar ut kraftvärmeproduktionen, vilket leder till minskad elproduktion. Eftersom den producerade elen bidrar med negativa utsläpp ökar de totala CO<sub>2</sub>-utsläppen när elproduktionen minskar.

*Tabell 23. Produktion, CO<sub>2</sub>-utsläpp och systemkostnad för Scenario 5: Utan avfall - Stockholm.*

| Utan avfall - Stockholm        |                 |                           |                               |                               |                               |
|--------------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Nod                            | Bränsle         | Utan<br>överskottsvärme   | Överskottsvärme<br>380 kr/MWh | Överskottsvärme<br>340 kr/MWh | Överskottsvärme<br>300 kr/MWh |
|                                |                 | Producerad värme/el [GWh] |                               |                               |                               |
| HO1                            | Olja            | 181                       | 0                             | 0                             | 0                             |
| HO2                            | Pellets + Flis  | 1675                      | 0                             | 0                             | 0                             |
| HO3                            | Avfall          | -                         | -                             | -                             | -                             |
| CHP1                           | Pellets         | 474/170                   | 112/40                        | 80/29                         | 59/21                         |
| CHP2                           | Flis + Returträ | 5926/1778                 | 5137/1541                     | 4373/1312                     | 3508/1053                     |
| CHP3                           | Avfall          | -                         | -                             | -                             | -                             |
| HP                             | Värmepump       | 3818                      | 3166                          | 2902                          | 2607                          |
| IWH                            | Överskottsvärme | -                         | 3657                          | 4718                          | 5898                          |
| CO <sub>2</sub> -utsläpp [ton] |                 | 86 310                    | 23 456                        | 24 395                        | 25 641                        |
| Total kostnad [MSEK/år]        |                 | 3843                      | 3370                          | 3202                          | 2989                          |

#### 4.2.6 Scenario 6: Pensionerade anläggningar

I Stockholms fjärrvärmesystem med pensionerade anläggningar, utan överskottsvärmen integrerad, ökar produktionen av både olja och pellets. Framförallt har HO1 och HO2, som förbränner olja respektive pellets, ökat vid jämförelse med basfallet. Det går även att notera en ökning av CHP2, flis och returträ. Se Figur 8I.

Vid integrering av överskottsvärmen med en kostnad på 340 kr/MWh ersätts all olja tillsammans med delar av systemets biobränsle. Se Figur 8J.

I Tabell 24 presenteras systemkostnaderna tillsammans med produktionen från de olika noderna för Scenario 6, både utan överskottsvärme och med överskottsvärme prissatt till 380, 340 och 300 kr/MWh. Systemet med pensionerade anläggningar, utan överskottsvärme, är dyrare än basfallet. Vid integrering av överskottsvärmen noteras hur den totala systemkostnaden minskar. När överskottsvärmen kostar 340 kr/MWh resulterar systemkostnaden i en lägre kostnad än basfallet. CO<sub>2</sub>-utsläppen i fallet med pensionerade anläggningar och utan överskottsvärme är något högre än vid basfallet. När överskottsvärmen integreras observeras en minskning av utsläppen, som då är lägre än vid basfallet. Liksom i föregående scenario ökar utsläppen när priset på överskottsvärmen minskar.

Tabell 24. Produktion, CO<sub>2</sub>-utsläpp och systemkostnad för Scenario 6: Pensionerade anläggningar - Stockholm.

| Pensionerade anläggningar - Stockholm |                 |                           |                               |                               |                               |
|---------------------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Nod                                   | Bränsle         | Utan<br>överskottsvärme   | Överskottsvärme<br>380 kr/MWh | Överskottsvärme<br>340 kr/MWh | Överskottsvärme<br>300 kr/MWh |
|                                       |                 | Producerad värme/el [GWh] |                               |                               |                               |
| HO1                                   | Olja            | 164                       | 0                             | 0                             | 0                             |
| HO2                                   | Pellets + Flis  | 888                       | 0                             | 0                             | 0                             |
| HO3                                   | Avfall          | 631                       | 631                           | 631                           | 631                           |
| CHP1                                  | Pellets         | -                         | -                             | -                             | -                             |
| CHP2                                  | Flis + Returträ | 5081/1524                 | 4434/1330                     | 3864/1159                     | 3160/948                      |
| CHP3                                  | Avfall          | 3874/1046                 | 3874/1046                     | 3874/1046                     | 3874/1046                     |
| HP                                    | Värmepump       | 1436                      | 1188                          | 1108                          | 1034                          |
| IWH                                   | Överskottsvärme | -                         | 1945                          | 2596                          | 3374                          |
| CO <sub>2</sub> -utsläpp [ton]        |                 | 817 667                   | 775 121                       | 778 513                       | 783 262                       |
| Total kostnad [MSEK/år]               |                 | 1847                      | 1580                          | 1488                          | 1369                          |

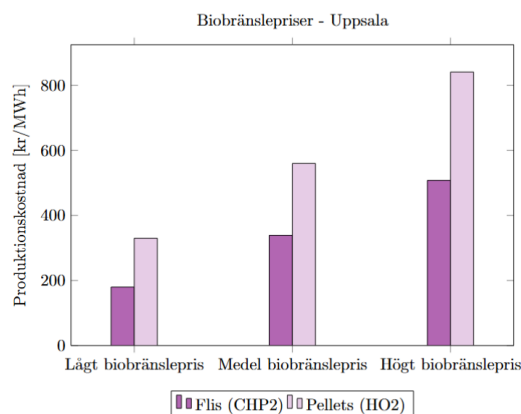
## 4.3 Känslighetsanalys

I detta avsnitt redovisas resultaten från känslighetsanalysen. Inledningsvis presenteras resultaten av varierade el- och biobränslepriser för Uppsala respektive Stockholm, följt av resultaten av en förändrad värmelast i de båda städerna. Samtliga simuleringar utgår från respektive stads basfall och genomförs både med och utan integration av överskottsvärme.

### 4.3.1 El- och biobränslepriser

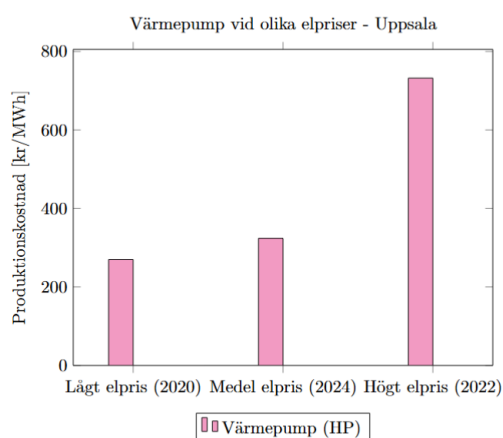
#### Uppsala

I Figur 13 redovisas produktionskostnaderna för flis- och pelletsförbränning i Uppsala vid de olika prisnivåerna för biobränsle. De mörklila staplarna representerar kostnaderna för flisförbränningen i Carpe Futurum (CHP2), medan de ljuslila står för kostnaden för förbränning av pellets (HO2). I Uppsalas fjärrvärmesystem är biobränsleanläggningarna rena värmeverk som inte producerar el, och därför påverkas kostnaderna för dessa inte av förändrade elpriser. Därmed är ökningarna som noteras direkt kopplade till biobränslets prisvariationer.



Figur 13. Produktionskostnad för flis och pellets vid olika biobränslepriser - Uppsala.

Produktionskostnaden för värmepumparna i Uppsala, vid de olika genomsnittliga elpriserna, visas i Figur 14. En stor kostnadsökning noteras vid det höga elpriset, vilket kan kopplas till att det genomsnittliga elpriset 2022 var betydligt högre än under de andra åren. Även mellan det låga och medelhöga scenariot observeras en ökning, men där är skillnaden mindre påtaglig.



Figur 14. Produktionskostnad för värmepumpen vid olika elpriser - Uppsala.

I Tabell 25 till 27 presenteras systemkostnaderna samt användningen av överskottsvärmen vid de olika scenarierna. Det kan noteras att de totala systemkostnaderna minskar vid det högre elpriset (2022). Detta kan förklaras av att en av avfallsanläggningarna producerar kraftvärme, och blir mer kostnadseffektiv ju dyrare elen säljs. Vidare observeras att systemkostnaderna blir lägre i samtliga fall där överskottsvärmen integreras. Överskottsvärmen används i större utsträckning vid högre priser på biobränsle, och har då större inverkan på systemkostnaderna. När överskottsvärmen är integrerad ses kostnaden för systemet inte vara lika känsligt för ökade priser på biobränsle.

Tabell 25. Systemkostnad och värmeproduktion från överskottsvärmen vid lågt elpris och olika nivåer på biobränslepris - Uppsala.

| Lågt elpris (2020) - Uppsala |                                           |                                                     |                                       |
|------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Biobränslepriser             | Systemkostnad utan överskottsvärme [MSEK] | Systemkostnad med överskottsvärme 340 kr/MWh [MSEK] | Värmeproduktion överskottsvärme [GWh] |
| Lågt                         | 185                                       | 170                                                 | 19                                    |
| Medel                        | 305                                       | 257                                                 | 175                                   |
| Högt                         | 428                                       | 258                                                 | 676                                   |

Tabell 26. Systemkostnad och värmeproduktion för överskottsvärmen vid medel elpris och olika nivåer på biobränslepris - Uppsala.

| Medel elpris (2024) - Uppsala |                                           |                                                     |                                       |
|-------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Biobränslepriser              | Systemkostnad utan överskottsvärme [MSEK] | Systemkostnad med överskottsvärme 340 kr/MWh [MSEK] | Värmeproduktion överskottsvärme [GWh] |
| Lågt                          | 181                                       | 164                                                 | 31                                    |
| Medel                         | 306                                       | 251                                                 | 229                                   |
| Högt                          | 432                                       | 252                                                 | 735                                   |

Tabell 27. Systemkostnad och värmeproduktion för överskottsvärmen vid högt elpris och olika nivåer på biobränslepris - Uppsala.

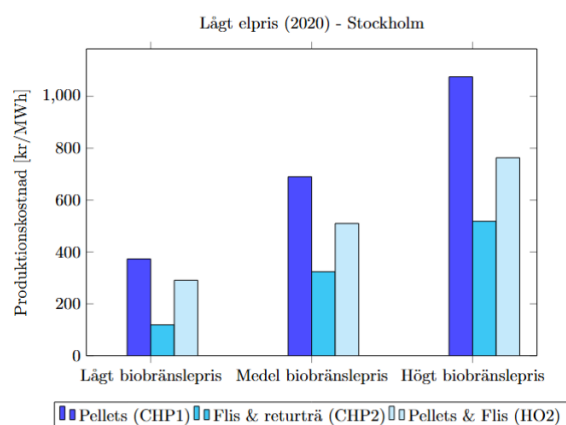
| Högt elpris (2022) - Uppsala |                                           |                                                     |                                       |
|------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Biobränslepriser             | Systemkostnad utan överskottsvärme [MSEK] | Systemkostnad med överskottsvärme 340 kr/MWh [MSEK] | Värmeproduktion överskottsvärme [GWh] |
| Lågt                         | 112                                       | 92                                                  | 30                                    |
| Medel                        | 251                                       | 186                                                 | 246                                   |
| Högt                         | 397                                       | 187                                                 | 807                                   |

## Stockholm

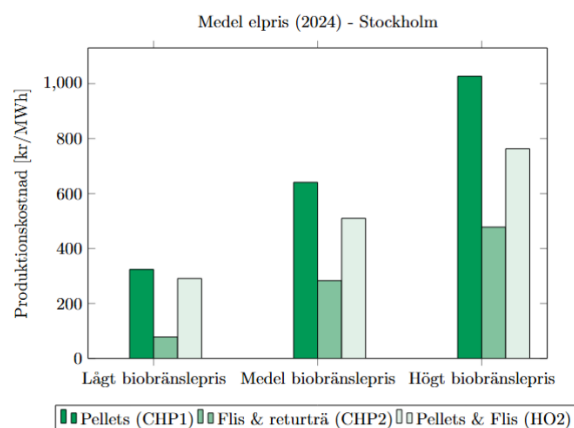
I Figur 15-17 presenteras produktionskostnaderna för de olika noderna i Stockholmssystemet som använder fasta biobränslen. Figurerna visualiserar påverkan på produktionskostnaderna när el- och biobränslepriset ändras. Produktionen från CHP1 och CHP2, vilka baseras på pellets respektive flis och returträ, bidrar med kraftvärme, och påverkas därmed av både biobränsle- och elpriset. Produktionen från HO2, pellets och flis, som är ett renodlat värmeverk, påverkas endast av biobränslepriset. Figur 15 och 16 noteras vara relativt lika varandra, vilket främst beror på att de genomsnittliga elpriserna för 2020 och 2024 inte skiljer sig så mycket. De slutliga produktionskostnaderna blir något lägre för CHP1 och CHP2 vid det medelhöga elpriset, eftersom den producerade elen då säljs något dyrare. För HO2 är dess produktionskostnad oföränderlig mellan de olika figurerna, eftersom den inte påverkas av

elpris. I Figur 17 visas det ännu tydligare hur CHP1 och CHP2 blir billigare vid växande elpriser.

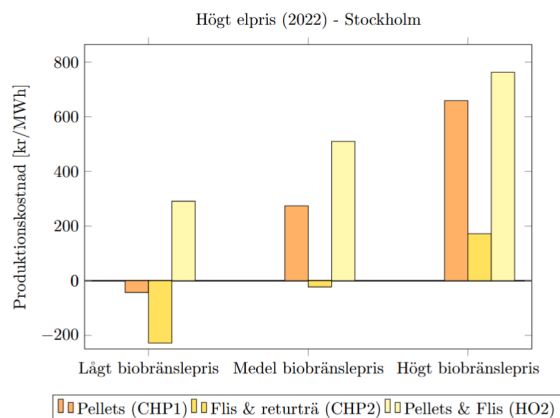
Överskottsvärmen är främst konkurrenskraftig när resterande anläggningar har höga produktionskostnader, vilket inträffar vid låga elpriser tillsammans med höga biobränslepriser. För höga elpriser och låga biobränslepriser hade det krävts en negativ kostnad på överskottsvärmen för att konkurrera med kraftvärmen.



Figur 15. Produktionskostnad för noderna med biobränsle vid lågt elpris (2020) och olika nivåer på biobränslepris - Stockholm.

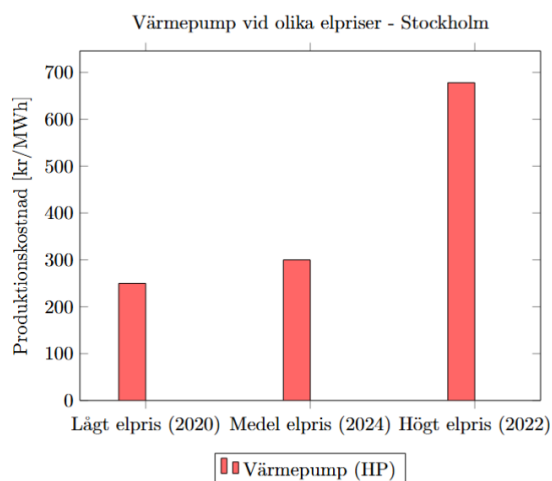


Figur 16. Produktionskostnad för noderna med biobränsle vid medel elpris (2024) och olika nivåer på biobränslepris - Stockholm.



Figur 17. Produktionskostnad för moderna biobränsle vid högt elpris (2022) och olika nivåer på biobränslepris - Stockholm.

I Figur 18 presenteras värmepumpens genomsnittliga produktionskostnad, som endast påverkas av elpriset. Precis som i Uppsala blir värmepumpen dyrare för högre elpriser.



Figur 18. Produktionskostnad för värmepumpen vid olika elpris - Stockholm.

I Tabell 28-30 presenteras systemkostnaderna med och utan överskottsvärme, tillsammans med värmeproduktionen av överskottsvärmen när den används. För samtliga fall noteras hur integrering av överskottsvärmen sänker systemkostnader. Fortsättningsvis går det även att identifiera hur överskottsvärmen används mer vid höga biobränslepriser. Systemkostnaderna visar även att fjärrvärmesystemet påverkas i mindre utsträckning av ökande biobränslepriser när överskottsvärmen inkluderas. Slutligen visar Tabell 30 stora vinster på systemet när elpriset är högt. Som nämnt tidigare, är detta ett resultat av försäljningen av den då dyra el som produceras av kraftvärmeverken.

Tabell 28. Systemkostnad och värmeproduktion för överskottsvärmen vid lågt elpris och olika nivåer på biobränslepris - Stockholm.

| Lågt elpris (2020) - Stockholm |                                           |                                                     |                                       |
|--------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Biobränslepriser               | Systemkostnad utan överskottsvärme [MSEK] | Systemkostnad med överskottsvärme 340 kr/MWh [MSEK] | Värmeproduktion överskottsvärme [GWh] |
| Lågt                           | 916                                       | 900                                                 | 62                                    |
| Medel                          | 2004                                      | 1852                                                | 2330                                  |
| Högt                           | 2887                                      | 1983                                                | 4387                                  |

Tabell 29. Systemkostnad och värmeproduktion för överskottsvärmen vid medel elpris och olika nivåer på biobränslepris - Stockholm.

| Medel elpris (2024) - Stockholm |                                           |                                                     |                                       |
|---------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Biobränslepriser                | Systemkostnad utan överskottsvärme [MSEK] | Systemkostnad med överskottsvärme 340 kr/MWh [MSEK] | Värmeproduktion överskottsvärme [GWh] |
| Lågt                            | 323                                       | 299                                                 | 104                                   |
| Medel                           | 1539                                      | 1368                                                | 1852                                  |
| Högt                            | 2497                                      | 1795                                                | 4463                                  |

Tabell 30. Systemkostnad och värmeproduktion för överskottsvärmen vid högt elpris och olika nivåer på biobränslepris - Stockholm.

| Högt elpris (2022) - Stockholm |                                           |                                                     |                                       |
|--------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Biobränslepriser               | Systemkostnad utan överskottsvärme [MSEK] | Systemkostnad med överskottsvärme 340 kr/MWh [MSEK] | Värmeproduktion överskottsvärme [GWh] |
| Lågt                           | -2645                                     | -2679                                               | 102                                   |
| Medel                          | -1135                                     | -1301                                               | 1394                                  |
| Högt                           | 214                                       | -394                                                | 3034                                  |

#### 4.3.2 Värmelast

I Tabell 31 och 32 presenteras systemkostnaderna för Uppsala respektive Stockholm, med och utan överskottsvärme, tillsammans med värmeproduktionen av överskottsvärmen när den används. För samtliga fall noteras hur integrering av överskottsvärmen skapar ett mer kostnadseffektivt system. Vidare kan det observeras att produktionen av överskottsvärme ökar vid högre värmelaster, samtidigt som den kostnadsreducering som uppstår vid integrering av överskottsvärme blir mer framträdande vid ökande värmelaster.

Tabell 31. Systemkostnad och värmeproduktion för överskottsvärmen vid olika värmelaster i Uppsala.

| Värmelast - Uppsala |                                           |                                                     |                                       |
|---------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Värmelast           | Systemkostnad utan överskottsvärme [MSEK] | Systemkostnad med överskottsvärme 340 kr/MWh [MSEK] | Värmeproduktion överskottsvärme [GWh] |
| Lågt                | 201                                       | 178                                                 | 115                                   |
| Medel               | 306                                       | 251                                                 | 229                                   |
| Högt                | 432                                       | 327                                                 | 374                                   |

Tabell 32. Systemkostnad och värmeproduktion för överskottsvärmen vid olika värmelaster i Stockholm.

| Värmelast - Stockholm |                                           |                                                     |                                       |
|-----------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Värmelast             | Systemkostnad utan överskottsvärme [MSEK] | Systemkostnad med överskottsvärme 340 kr/MWh [MSEK] | Värmeproduktion överskottsvärme [GWh] |
| Lågt                  | 995                                       | 921                                                 | 1035                                  |
| Medel                 | 1539                                      | 1368                                                | 1852                                  |
| Högt                  | 2199                                      | 1850                                                | 2851                                  |

## 5. Diskussion

I detta avsnitt diskuteras studiens resultat i relation till fjärrvärmesystemens ekonomiska och tekniska förutsättningar. Samtliga scenarier som presenteras i resultatdelen analyseras i jämförelse med Uppsalas och Stockholms respektive basfall. Inledningsvis kommenteras i vilken utsträckning överskottsvärmen används i de olika scenarierna. Därefter diskuteras hur integreringen av överskottsvärme från Forsmark påverkar systemkostnader, konkurrensförhållanden mellan produktionsslag samt systemens känslighet för centrala osäkerhetsfaktorer såsom elpris, biobränslepris och värmelast.

Användningen av överskottsvärme varierade mycket mellan scenarierna. En viktig faktor för hur mycket överskottsvärme som används i Uppsalasystemet är tröskeln gentemot flisförbränning. I Svenssons scenarier 2a och 2b bidrog överskottsvärmen med upp till omkring 200 GWh i Uppsala, medan i Scenario 2c uppgick produktionen till cirka 740 GWh, då den konkurrerade ut flisförbränningen. När avfallsanvändningen reducerades, i Scenario 5 och Scenario 6 för Uppsalasystemet, ökade överskottsvärmens andel av produktionen markant. Vid ett pris på 340 kr/MWh uppgick produktionen till cirka 900 GWh när allt avfall exkluderades, och till drygt 400 GWh när en avfallsanläggning antogs tas ur drift. Vid priser under 338 kr/MWh trängde överskottsvärmen även undan flisförbränning, vilket ytterligare ökade dess användning.

I Stockholm observeras samma övergripande mönster, men med högre volymer och mindre tydliga tröskelvärden. I Svenssons scenarier 2a-2c bidrog överskottsvärmen med upp till cirka 2 000 GWh, i Scenario 6 till omkring 2 500 GWh och i Scenario 4, med överskottsvärmen prissatt till 340 kr/MWh, till nära 5 000 GWh. Till skillnad från Uppsala, där tydliga kostnadströsklar identifierats, präglas Stockholmssystemet av en större andel kraftvärme vilket ger mer gradvisa förändringar i produktionsmixen.

I simuleringarna antogs en hög kapacitet för överskottsvärme för att analysera dess maximala potentiella nyttjande vid olika prisnivåer. Den faktiska installerade kapaciteten i ett eventuellt genomförande är dock inte fastställd, och lägre kapaciteter skulle sannolikt begränsa användningen. Studien bör därför främst tolkas som en kostnads- och mönsteranalys, där de exakta produktionsnivåerna är känsliga för antagna kapacitetsnivåer.

Med integrering av överskottsvärme från Forsmark, till de priser och kapaciteter som används i Scenario 2a-2c, Svenssons scenarier, minskade de totala systemkostnaderna i både Uppsala och Stockholms fjärrvärmesystem. Priserna som överskottsvärmen sattes till i dessa scenarier anses som realistiska estimeringar av vad överskottsvärmen skulle kosta om den integreras i fjärrvärmesystemen. Resultatet indikerar därmed att både Uppsala och Stockholms fjärrvärmesystem har potential att bli mer kostnadseffektiva om projektet genomförs, och om överskottsvärme från Forsmark används i systemen. Däremot har överskottsvärmen vid dessa prisnivåer svårt att konkurrera med systemens befintliga basproduktion, och skulle snarare fungera som ny spets- eller mellanlastproduktion. I det optimerade scenariot, Scenario 2c, kan överskottsvärmen, tillsammans med avfallsförbränningen, utgöra en del av basproduktionen i Uppsala, eftersom den konkurrerar ut flisförbränningen ur produktionsmixen. I Stockholms fjärrvärmesystem, som har en hög andel kraftvärme, visar resultaten däremot att överskottsvärmen har svårare att konkurrera och därmed får mindre påverkan på systemet som helhet. För att överskottsvärmen på ekonomiska grunder ska kunna ersätta mer betydande delar av kraftvärmen i Stockholm skulle lägre priser på överskottsvärmen krävas.

Om överskottsvärmen från kärnkraftverk främst skulle användas som spetslast finns utmaningar att beakta. Eftersom spetslast endast efterfrågas under ett begränsat antal timmar per år skulle anläggningen få en låg nyttjandegrad, vilket riskerar att göra investeringar i värmeuttag, distribution och systemintegration mindre ekonomiskt attraktiva. Detta beror på att kärnkraftverk producerar stora mängder värme kontinuerligt, medan behovet av spetsproduktion uppstår under korta perioder med hög efterfrågan. För att bättre anpassa produktionen för efterfrågan skulle därför värmelager eller andra lösningar för att styra värmeuttaget kunna vara nödvändiga. Utan sådana åtgärder finns en risk att en stor del av den tillgängliga överskottsvärmen inte kommer till användning, vilket begränsar den potentiella nyttan av investeringen.

Vidare, i Scenario 3, där överskottsvärme ersätter all befintlig produktion, beräknades de genomsnittliga produktionskostnaderna till 168,9 kr/MWh och 127,5 kr/MWh, för Uppsala respektive Stockholms nuvarande system. I detta scenario skulle överskottsvärmen alltså behöva kosta mindre än dessa värden för att skapa mer kostnadseffektiva system. De

beräknade värdena är signifikant lägre än de prisestimeringar som Svensson beräknat. Mot den bakgrunden bedöms dessa prisnivåer svåra att uppnå. Produktionskostnaden hade därmed sannolikt blivit dyrare än i dagens system, och scenariot hade i sådana fall inte varit gynnsamt ur ett kostnadsperspektiv. Scenariot skulle däremot inte innebära några CO<sub>2</sub>-utsläpp vid drift, och därmed vara attraktivt ur klimatsynpunkt.

Fortsättningsvis finns det flera aspekter med Scenario 3 som hade skapat utmaningar i verkligheten. Ett system med endast en värmekälla ställer stora kvar på redundans i systemet. Under 2025 hade Forsmarks kärnkraftverk en total tillgänglighet på 81,62%, där alla tre reaktorer medverkan är inräknade (Vattenfall, 2026). Med det sagt, finns det därmed risk för både planerade och oplanerade stopp av Forsmarks kärnkraftsreaktorer. Vid sådana stopp krävs reserver som kan leverera den värmeproduktion som behövs. Detta innebär att det måste finnas anläggningar som snabbt kan producera värme om ett plötsligt stopp skulle inträffa. En fördel med att enbart använda överskottsvärme skulle kunna vara att de befintliga anläggningarna inte behöver vidare investeringar i form av underhåll och renovering, vilket skulle leda till kostnadsbesparingar. Kravet på redundans i systemet motsäger dock detta och väcker frågor kring hur stora besparingarna faktiskt kan bli, om många av de befintliga anläggningarna fortfarande måste finnas tillgängliga för drift.

Vidare kan det vara sårbart ur ett säkerhetsperspektiv att endast vara beroende av en värmekälla, då en mer diversifierad energimix ofta är mindre känslig för störningar. Förutom vanliga driftstopp skulle det finnas en sårbarhet för planerade attacker mot ledningarna eller mot Forsmark. Denna risk ställer höga krav på åtgärder för att stärka systemets resiliens. Åtgärder hade exempelvis kunnat vara att ta ut värme från flera av Forsmarks reaktorer, använda flera ledningar samt installera sektionsventiler i ledningarna för att begränsa driftstopp till mindre områden. Fortsättningsvis innebär Scenario 3, med endast överskottsvärme, ett långsiktigt beroende av kärnkraften. Detta förutsätter att kärnkraften inte bara bibehålls utan även fortsätter att prioriteras i energipolitiken under en längre tidsperiod. Den politiska opinionen kring kärnkraft har historiskt varit varierande, med skiftande stöd över tid. Även om opinionen i dagsläget är mer positiv till fortsatta investeringar, bygger scenariot på att denna inriktning består och att kärnkraften fortsatt ses som en central del av energisystemet även på lång sikt.

Vidare visar resultaten från Scenario 4, där överskottsvärmen konkurrerar med samtliga produktionsslag förutom avfallsförbränning, tydliga skillnader mellan fjärrvärmesystemen i Uppsala och Stockholm. Skillnaderna kan främst kopplas till vilken roll kraftvärmeproduktionen har i respektive nät. Uppsalas fjärrvärmesystem försörjs i liten grad av kraftvärmeproduktion, vilket gör att överskottsvärme kan konkurrera med biobränslebaserad produktion. Resultaten visar att detta kan uppnås vid ett pris på 338 kr/MWh, vilket är ett realistiskt pris på överskottsvärmen, vid jämförelse med prisestimeringen av Svensson. Det tyder på att överskottsvärmen har en möjlighet att få en betydande roll i Uppsalas fjärrvärmesystem vid realistiska produktionspriser. Däremot visar resultaten att värmepumparna är betydligt svårare att ersätta, vilket beror på deras koppling

till elpriset. Vid låga elpriser får värmepumparna låga rörliga kostnader och förblir därför konkurrenskraftiga även vid relativt låga priser på överskottsvärmen.

I Stockholm blir sambandet mellan elpriser och fjärrvärmeproduktion ännu tydligare. Till skillnad från Uppsala försörjs Stockholms fjärrvärmesystem i stor utsträckning av kraftvärmeproduktion, vilket gör det betydligt svårare för överskottsvärmen att konkurrera ut biobränslen. Vid relativt låga priser på överskottsvärme finns möjlighet att fasa ut en stor del av den biobränslebaserade kraftvärmen, men inte hela produktionen. Under årets timmar med de högsta elpriserna blir kraftvärmen som mest lönsam och därmed också billigast ur ett systemperspektiv. För att överskottsvärmen ska kunna möjliggöra en fullständig utfasning av kraftvärmen krävs därför att den är ännu billigare än kraftvärmen under dessa timmar. Det skulle i vissa fall innebära negativa priser på överskottsvärmen, vilket inte bedöms som realistiskt. Däremot uppstår andra tröskelvärden när simuleringarna genomförs med det genomsnittliga elpriset för 2024. I detta fall hade kostnaden för överskottsvärmen behövt uppgå till 323 kr/MWh i Uppsala och 283 kr/MWh i Stockholm för att konkurrera med biobränslet. Dessa nivåer är mer verklighetstroga i jämförelse med de priser som Svensson kom fram till. Det innebär alltså att överskottsvärmen hade kunnat fasa ut biobränslena vid prisnivåer närmare de tidigare estimeringar som gjorts.

Även om ett fjärrvärmesystem endast baserat på överskottsvärme och avfall skulle kunna uppnå de mest kostnadseffektiva systemen, finns det andra incitament som gör Scenario 4 mindre attraktivt. Kraftvärmen i Stockholms län bidrar med elproduktion som möter cirka 10% av länets totala behov (Region Stockholm, 2023). Denna elproduktion bidrar inte bara till lägre fjärrvärmekostnader, utan avlastar även elnätet genom lokal produktion. Ur ett beredskapsperspektiv skapar den lokala elproduktionen dessutom goda förutsättningar för att upprätthålla samhällsviktiga funktioner vid ödrift. Att värna om stadens kraftvärmeverk och bibehålla de förutsättningar som följer av lokal elproduktion är därför en viktig fråga (Region Stockholm, 2023).

Vidare, i Scenario 5 där avfallsförbränning inte ingår i produktionen, blir systemkostnaderna betydligt högre jämfört med basfallen. I Uppsala tredubblas systemkostnaderna och i Stockholm fördubblas de när avfallsförbränningen tas bort, och överskottsvärme inte integreras i systemen. Vid integration av överskottsvärme kan däremot en tydlig förbättring av kostnaderna observeras. Även om systemkostnaderna fortfarande är högre än i basfallen visar resultaten att överskottsvärmen har en betydande roll i att reducera dessa kostnadsökningar. I ett fjärrvärmesystem utan avfallsförbränning kan överskottsvärmen från Forsmark därmed ses som ett värdefullt verktyg för att förbättra systemkostnaderna.

Vidare resulterade Scenario 5, utan avfallsförbränning, i mycket lägre koldioxidutsläpp än i dagens fjärrvärmesystem. När överskottsvärmen integrerades minskade dessa utsläpp ytterligare, då framförallt oljan helt ersattes. Ett framtidsscenario utan avfall i fjärrvärmensystemens produktionsmix erbjuder alltså ett mer klimatneutralt system, i linje med målet om nettonollutsläpp 2045, men på bekostnad av kostnadseffektiviteten hos systemet.

Scenario 5, utan avfallsförbränning, belyser därmed konflikten i balansen mellan ekonomisk och klimatmässig optimering av fjärrvärmesystemen. Avfallet är det billigaste bränslet i fjärrvärmeproduktionen idag, och så länge det kvarstår kommer avfallet att prioriteras framför andra bränsleslag. För att skapa incitament till att minska avfallsförbränningen skulle det därmed krävas ekonomiska styrmedel som gör avfallet mindre konkurrenskraftigt. Fortsättningsvis förutsätter scenariot att avfallet hanteras på något annat sätt, om det inte längre används till fjärrvärme. Scenariot kan reflektera en mer cirkulär framtid där materialåtervinningen förbättrats, och avfallet minskat. I en framtid där det fortfarande finns avfall så måste dock detta hanteras. Alternativet till förbränning är i dagsläget att lägga avfallet på deponi, vilket är mer kostsamt och även bidrar med utsläpp av metan (Vattenfall, u.å.g.). Det finns därmed en risk att ett sådant scenario i praktiken främst leder till en omfördelning av ansvar för utsläppen, snarare än en reell minskning av klimatpåverkan.

Fortsättningsvis behöver alla fjärrvärmeanläggningar förr eller senare genomgå livstidsförlängande åtgärder för att kunna fortsätta vara i drift. För fjärrvärmebolagen innebär detta strategiska beslut om huruvida investeringarna är motiverade, eller om resurserna bör satsas på andra lösningar. Scenario 6, med pensionerade anläggningar, illustrerar hur fjärrvärmesystemen påverkas när de äldsta anläggningarna tas ur drift och ersätts med överskottsvärme. I Uppsala är det delar av avfallsförbränningen som antas tas ur drift, vilket i första hand resulterar i en märkbart högre systemkostnad, samtidigt som CO<sub>2</sub>-utsläppen minskar. Vid integrering av överskottsvärme blir systemet mer kostnadseffektivt, och CO<sub>2</sub>-utsläppen minskar ytterligare. I Stockholmssystemet kan andra mönster identifieras. I detta fall har några värmepumpar, pellets- och oljeförbränningspannor antagits tagits ur drift, vilket skapade ett dyrare system med mer CO<sub>2</sub>-utsläpp. Vid integrering av överskottsvärmen minskade både kostnaden och utsläppen, och vid 340 kr/MWh på överskottsvärmen uppnåddes ett mer kostnadseffektivt system än basfallet.

I Uppsala hade pensioneringen av den äldsta anläggningen inneburit högre systemkostnader, även med överskottsvärmen integrerad. Däremot skulle kostnadsbesparingar göras genom uteblivna investeringar för upprustning, vilket bör tas med i en ekonomisk kalkyl. I Stockholmssystemet kan pensionering av anläggningar och integrering av överskottsvärme till rätt pris leda till ett mer kostnadseffektivt system, samtidigt som investeringar kan undvikas. Resultatet visar därmed att pensionering av de äldsta anläggningarna i Stockholm, och integrering av överskottsvärme, har potential för att vara en möjlig strategi ur kostnadssynpunkt.

Vidare finns det flera osäkra faktorer som bedöms ha stor påverkan på resultaten. De mest betydande är elpriset, biobränslepriset och värmelasten. Elprisets påverkan har observerats i samtliga scenarier, särskilt genom de stora prisvariationer som uppstår under året. Analysen visar att kraftvärmeverken blir mer kostnadseffektiva vid höga elpriser, medan värmepumpar blir mer kostnadseffektiva vid låga elpriser. Elpriset har därför stor betydelse för om överskottsvärmen kan konkurrera med kraftvärme och värmepumpar. Även biobränslepriset har en betydande påverkan på möjligheten för överskottsvärme att konkurrera med befintliga

produktionsslag. Ju högre priserna på biobränslen är, desto lättare blir det för överskottsvärmen att ersätta dessa och bidra till ett mer kostnadseffektivt fjärrvärmesystem.

Resultaten från känslighetsanalysen visar att respektive basfall för Uppsala- och Stockholmssystemet blir billigare vid högre elpriser, på grund av kraftvärmeproduktionen. De olika systemens användning av överskottsvärme påverkas dock på olika sätt av variationer i elpriset. Vid dagens biobränslepriser används överskottsvärmen i Stockholmssystemet i mindre utsträckning vid höga elpriser och i större utsträckning vid låga elpriser, till följd av konkurrensen från biobränsleeldad kraftvärme. I Uppsalas system är förhållandet det omvända. Där används överskottsvärmen mer vid höga elpriser och mindre vid låga, eftersom den konkurrerar med värmepumparna. Överskottsvärmens roll blir därmed beroende av både elprisets utveckling och vilka produktionsslag den konkurrerar med i respektive system.

Fortsättningsvis observerades en markant kostnadsökning av systemen i scenarierna med högre biobränslepriser, när överskottsvärmen inte var integrerad. När överskottsvärmen däremot integrerades noterades nästan ingen kostnadsökning alls vid ökade biobränslepriser. I ett framtidsscenario med högre biobränslepriser hade överskottsvärmen från Forsmark därmed varit mycket värdefull för att hålla nere kostnaderna och minska systemens sårbarhet. Om biobränslepriserna istället skulle återgå till en lägre nivå skulle överskottsvärmen däremot inte ha samma betydelse. Även i dessa scenarier minskar integreringen av överskottsvärmen systemkostnaderna något, men inte i lika stor utsträckning som vid högre biobränslepriser.

Vidare har även värmelasten en betydande påverkan på resultaten. Framförallt påverkar den systemets totala produktionskostnad, eftersom mängden bränsle som behöver användas förändras i takt med värmebehovet. Vid integrering av överskottsvärme observerades endast marginella förändringar i systemkostnaderna vid låga värmelaster, medan vid höga värmelaster kunde överskottsvärmen bidra med en större kostnadsreducering. Det innebär att om värmelasten minskar med 13 %, i enlighet med Boverkets uppskattningar, blir överskottsvärmens påverkan på den totala systemkostnaden mindre betydande. Investeringar i integrering av överskottsvärme i fjärrvärmesystemen kan därmed bli mindre ekonomiskt fördelaktiga.

Slutligen visar resultaten att systemkostnaderna för både Uppsala och Stockholms fjärrvärmesystem minskar i samtliga scenarion när överskottsvärme från Forsmark integreras, i jämförelse med motsvarande scenarios fjärrvärmesystem utan överskottsvärmen. Resultaten tyder alltså på att fjärrvärmesystemen skulle bli mer kostnadseffektiva vid integrering av överskottsvärme. Utöver driftkostnaderna behöver även andra faktorer beaktas vid bedömningen av hur ekonomiskt motiverat projektet är på längre sikt. En del av motiveringen bakom integrationen är även möjligheten att minska behovet av framtida investeringar i andra produktionsanläggningar, genom att överskottsvärmen kan ersätta delar av den befintliga produktionen. I vilken utsträckning sådana kostnadsbesparingar kan uppnås beror dels på hur stor del av produktionen som på sikt kan täckas av överskottsvärmen, dels på vilka krav som ställs på redundans och reservkapacitet i systemen. Detta påverkar i sin tur hur många

befintliga produktionsenheter som faktiskt kan avvecklas eller undvikas att reinvesteras i, och är därför en viktig aspekt att inkludera i den ekonomiska kalkylen för projektet.

Fortsättningsvis visar undersökningen att CO<sub>2</sub>-utsläppen minskar i samtliga scenarier när överskottsvärmen integreras i fjärrvärmesystemet. Att investera i en sådan integrering kan därför anses fördelaktigt ur klimatsynpunkt. För att överskottsvärmen ska kunna konkurrera med dagens basproduktion behöver den dock komma ner i prisnivå. Samtidigt kan möjligheten att konkurrera ut befintlig produktion se annorlunda ut beroende på om kostnad eller klimatpåverkan prioriteras högst. Idag drivs fjärrvärmen av att vara så kostnadseffektiv som möjligt, vilket kan komma att ändras om det sker förändringar i styrmedel eller politiska beslut. För att nå målet om nettonollutsläpp till 2045 krävs sannolikt en förändrad prioriteringsordning, där minskad klimatpåverkan ges större vikt.

## 5.1 Trovärdighet

En viktig begränsning är att analysen baseras på simuleringsverktyget som utgör en förenklad representation av verkliga fjärrvärmesystem. Modellen är konstruerad för att analysera systemövergripande effekter och kostnadsoptimering, men kan inte fullt ut beskriva alla tekniska och operativa förhållanden som förekommer i verklig drift. Detta innebär att de exakta värdena för exempelvis kostnader, produktionsvolym och utsläpp kan skilja sig från vad som skulle observeras i ett verkligt system, och bör därför tolkas med viss försiktighet.

Trots de avvikelser som framkom i valideringen uppvisar resultaten tydliga och återkommande mönster mellan scenarierna. De produktionsenheter som gynnas respektive trängs undan vid introduktion av överskottsvärme är i huvudsak likartade, vilket indikerar att skillnaderna mellan modell och verklighet inte har någon avgörande påverkan på studiens huvudsakliga slutsatser.

Resultaten bör därför inte betraktas som exakta prognoser, utan snarare som en fingervisning om hur fjärrvärmesystemen i Stockholm och Uppsala kan påverkas av en integrering av överskottsvärme från Forsmarks kärnkraftverk. Studien ger därmed ett relevant underlag för att förstå sannolika systemeffekter och relativa förändringar mellan olika scenarier, även om de exakta numeriska resultaten är förknippade med viss osäkerhet.

## 6. Slutsats

Syftet med detta examensarbete var att analysera systemeffekter vid integrering av överskottsvärme från Forsmarks kärnkraftverk i fjärrvärmesystemen i Stockholm och Uppsala. Genom scenariobaserad modellering har arbetet undersökt hur produktionsmix, systemkostnader och koldioxidutsläpp påverkas under olika förutsättningar, samt vilka faktorer som styr överskottsvärmens konkurrenskraft.

Gällande produktionsmixen visar resultaten att överskottsvärmen, vid de prisnivåer som baserats på tidigare prisestimeringar, främst konkurrerar ut biobränslebaserad

värmeproduktion samt olja. Avfallsförbränningen kvarstår som basproduktion i systemen. Biobränsleeldad kraftvärme och värmepumpar är starkt beroende av elprisets nivå, vilket innebär att överskottsvärmen konkurrerar ut dessa i varierande grad beroende på rådande priset förutsättningar. I Uppsala observerades större förändringar i produktionsmixen vid integrering av överskottsvärmen än i Stockholm, där kraftvärmeproduktionen har en starkare konkurrenskraft till följd av intäkter från elproduktionen. I scenarier där avfallsförbränningen reduceras får överskottsvärmen en större inverkan på systemen, och utgör då en större andel av produktionen.

Samtliga scenarier i arbetet visar att överskottsvärmen bidrar till lägre systemkostnader jämfört med motsvarande fall utan överskottsvärme. Effekten är särskilt tydlig i scenarier med höga värmelaster och höga biobränslepriser. Samtidigt visar resultaten att överskottsvärmen vid de prisnivåer som analyserats främst fungerar som spets- och mellanlastproduktion, snarare än att helt ersätta dagens basproduktion. I scenarier utan avfallsförbränning ökade systemkostnaderna kraftigt, men överskottsvärmen bidrog till att reducera dessa kostnadsökningar och förbättra systemets kostnadseffektivitet. I detta fall kunde överskottsvärmen utgöra en del av systemens baslastproduktion, och därmed ha en större inverkan på systemet.

Vid analys av vilka ekonomiska tröskelvärden som avgör överskottsvärme konkurrenskraft gentemot befintliga produktionsanläggningar identifierades elpris och biobränslepris som de mest avgörande faktorerna för konkurrensförhållandena i systemet. Resultaten visar att förändringar av dessa två parametrar har stor påverkan på vilka produktionsslag som blir mest kostnadseffektiva. Höga biobränslepriser och låga elpriser skapar mer gynnsamma förutsättningar för överskottsvärmen, medan höga elpriser stärker kraftvärmens ekonomiska position genom ökade elintäkter. För att överskottsvärmen fullt ut ska kunna konkurrera med kraftvärmeproduktionen under timmar med höga elpriser skulle det i vissa fall krävas negativa priser på överskottsvärmen, vilket inte bedöms som realistiskt. Resultaten visar däremot att överskottsvärmen, vid genomsnittliga elpriser, kan konkurrera med delar av biobränsleproduktionen vid prisnivåer som ligger närmare de estimeringar som tidigare studier tagit fram.

Slutligen undersöktes hur de totala koldioxidutsläppen påverkades när överskottsvärmen introducerades i fjärrvärmesystemen. Resultaten visar att överskottsvärmen generellt bidrar till minskade utsläpp kopplat till drift av systemen. I scenarier utan avfallsförbränning observerades de största utsläppsreduktionerna, vilket visar att ett framtida fjärrvärmesystem med mindre avfallsförbränning skulle kunna bidra till Sveriges mål om nettonollutsläpp till år 2045. Samtidigt belyser resultaten en målkonflikt mellan ekonomisk och klimatmässig optimering, då avfallsförbränningen idag är mycket kostnadseffektiv och därför prioriteras i systemen trots dess klimatpåverkan. I Stockholm observerades även fall där utsläppen ökade något vid lägre pris på överskottsvärmen, som en konsekvens av minskad kraftvärmeproduktion och därmed även minskad elproduktion, vilken annars bidrar med negativa utsläpp.

Sammanfattningsvis visar studien att överskottsvärme från Forsmarks kärnkraftverk har potential att bidra till både mer kostnadseffektiva och klimatmässigt förbättrade fjärrvärmesystem i Uppsala och Stockholm. Resultaten visar samtidigt att överskottsvärmens roll i systemen är starkt beroende av framtida utveckling av elpriser, biobränslepriser, värmelaster och politiska samt ekonomiska styrmedel. Hur dessa förutsättningar utvecklas framöver kommer därmed att vara avgörande för vilken roll överskottsvärmen från Forsmark kan få i framtidens fjärrvärmesystem.

# Referenser

Avfall Sverige (2019). *Bränslekvalitet – Nuläge och scenarier för sammansättningen av restavfall till år 2025*.

<https://www.avfallsverige.se/rapporter-utveckling/rapporter/2019-27-branslekvalitet-nulage-och-scenarier-for-sammansattningen-av-restavfall-till-ar-2025/> [Hämtad 2026-04-10]

Avfall Sverige (2025). *Energiåtervinning*.

<https://www.avfallsverige.se/fakta-statistik/avfallsbehandling/energiatervinning/> [Hämtad 2026-02-22]

Axpo (2021). *Beznau nuclear power plant – reliable, environmentally compatible electricity production*.

[https://www.axpo.com/content/dam/axpo19/master/files-master/dossiers/beznau-power-plant/Axpo\\_KKB\\_Broschuere\\_EN\\_12\\_2021.pdf](https://www.axpo.com/content/dam/axpo19/master/files-master/dossiers/beznau-power-plant/Axpo_KKB_Broschuere_EN_12_2021.pdf) [Hämtad 2026-03-15]

Boverket (2026). *Förslag på mål för energieffektivisering i lokalbyggnader och bostadsbyggnader*.

<https://www.boverket.se/contentassets/4fee1bd1c2a84f6e92b2f71bfcd367a2/forslag-pa-mal-for-energieffektivisering-i-lokalbyggnader-och-bostadsbyggnader--redovisning-inom-den-nationella-byggnad.pdf> [Hämtad 2026-05-18]

Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K-H., Ekvall, T., Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures* 38(7): s.723-739.

<https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>

Dagens Industri (2026). *Brentolja Råvarukurs*.

<https://www.di.se/ravaror/ukoilusd-4606814/> [Hämtad 2026-04-10]

Drivkraft Sverige (2024). *Energiinnehåll, densitet och koldioxidemission, TTW och WTW*.

<https://drivkraftsverige.se/wp-content/uploads/2024/09/Berakningsfaktorer-2024.pdf> [Hämtad 2026-04-20]

Elforsk (2023). *Tillförd energi till värmeproduktion 2004-2023 GWh* [Dataset].

<https://www.energiforetagen.se/49d0d5/globalassets/energiforetagen/statistik/fjarrvarme/tillford-energi/energitillforsel-2023.xlsx> [Hämtad 2026- 04-13]

Energi Data Service (2020). *Elspotprices* [Dataset].

<https://energidataservice.dk/tso-electricity/Elspotprices> [Hämtad 2026-05-12]

Energi Data Service (2022). *Elspotprices* [Dataset].

<https://energidataservice.dk/tso-electricity/Elspotprices> [Hämtad 2026-05-12]

Energiföretagen (u.å). *Fjärrvärme*.

<https://www.energiforetagen.se/energifakta/fjarrvarme/> [Hämtad 2026-03-27]

Energiföretagen (2024a). *Tillförd energi*.

<https://www.energiforetagen.se/statistik/fjarrvarmestatistik/tillford-energi/> [Hämtad 2026-03-24]

Energiföretagen (2024b). *ÖVERENSKOMMELSE I VÄRMEMARKNADSKOMMITTÉN 2024.*

[https://www.energiforetagen.se/4afe9b/globalassets/dokument/fjarrvarme/241210\\_vmk-overenskommelse-2024-miljovardering-fjarrvarme.pdf](https://www.energiforetagen.se/4afe9b/globalassets/dokument/fjarrvarme/241210_vmk-overenskommelse-2024-miljovardering-fjarrvarme.pdf) [Hämtad 2026-03-05]

Energimyndigheten (2026a). *Avfallspriser, per kvartal exklusive skatt, från och med 2021, kronor/MWh, fritt förbrukare, löpande priser.*

<https://www.energimyndigheten.se/statistik/officiell-energistatistik/prisutveckling-inom-energi-området/tradbransle--och-torvpriser/> [Hämtad 2026-03-10]

Energimyndigheten (u.å). *mall-energiuppfoljning-och-nyckeltal-pa2\_energiledning.* [Excelfil]  
[https://www.energimyndigheten.se/4aa20b/globalassets/energieffektivisering\\_/jag-vill-energi-effektivisera-mitt-foretag/block-jag-vill-energieffektivisera-mitt-foretag/energiledning2/mall-energiuppfoljning-och-nyckeltal-pa2\\_energiledning.xlsx](https://www.energimyndigheten.se/4aa20b/globalassets/energieffektivisering_/jag-vill-energi-effektivisera-mitt-foretag/block-jag-vill-energieffektivisera-mitt-foretag/energiledning2/mall-energiuppfoljning-och-nyckeltal-pa2_energiledning.xlsx) [Hämtad 2026-03-08]

Energimyndigheten (2025). *Sänkt energiskatt på el 2026.*

[https://www.energimarknadsbyran.se/nyheter/nyhetsarkiv/2025/sankt-energiskatt-pa-el-2026/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.energimarknadsbyran.se/nyheter/nyhetsarkiv/2025/sankt-energiskatt-pa-el-2026/?utm_source=chatgpt.com) [Hämtad 2026-03-15]

Energimyndigheten (2026b). *Trädbränsle och torvpriser, per år exklusive skatt, från och med 1993, kronor/MWh fritt förbrukare, löpande priser efter År, Sortiment och Användare* [Dataset].

<https://www.energimyndigheten.se/statistik/officiell-energistatistik/prisutveckling-inom-energi-området/tradbransle--och-torvpriser/?currentTab=1> [Hämtad 2026-04-10]

entso-e (2024). *Power statistics.* <https://www.entsoe.eu/data/power-stats/> [Hämtad 2026-03-10]

E.ON. (2026). *Kretsanläggningen i Högbytorp.*

<https://www.eon.se/om-e-on/investeringar/vaermeinvesteringar/framtidens-kretsloppsanlaeggnig> [2026-02-20]

Europeiska Centralbanken (2026). *Swedish krona (SEK).*

[https://www.ecb.europa.eu/stats/policy\\_and\\_exchange\\_rates/euro\\_reference\\_exchange\\_rates/html/eurofxref-graph-sek.sv.html](https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/eurofxref-graph-sek.sv.html) [Hämtad 2026-04-20]

Exchange Rates UK (2020). *Euro to Swedish Krona History: 2020.*

<https://www.exchangerates.org.uk/EUR-SEK-spot-exchange-rates-history-2020.html> [Hämtad 2026-05-14]

Exchange Rates UK (2022). *Euro to Swedish Krona History: 2022.*

<https://www.exchangerates.org.uk/EUR-SEK-spot-exchange-rates-history-2022.html> [Hämtad 2026-05-14]

Frederiksen, S. Werner, S. (2014). *Fjärrvärme och fjärrkyla.* Studentlitteratur AB.

Hallman, Jan (2025). *Priserna på trädbränslen fortsatte uppåt 2024*. Tidningen Energi. <https://www.energi.se/artiklar/2025/mars-25/priserna-pa-tradbranslen-fortsatte-uppat-2024/#:~:text=Fj%C3%A4rrv%C3%A4rme%20Under%202024%20fortsatte%20priserna%20f%C3%B6r%20de,medf%C3%B6rt%20en%20tuff%20situation%20f%C3%B6r%20landets%20f%C3%A4rrv%C3%A4rmef%C3%B6retag> [Hämtad 2026-03-15]

IVL Svenska miljöinstitutet (2025). *Klimatpåverkan för köpt el har minskat visar nya beräkningar*. <https://www.ivl.se/press/nyheter/2025-09-25-klimatpaverkan-for-kopt-el-har-minskat-visar-nya-berakningar.html> [2026-04-15]

Kindbom, K., Gustavsson, T. (2017). *Känslighetsanalys som verktyg i arbetet med utsläppsprognoser*. IVL Svenska Miljöinstitutet. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1549699/FULLTEXT01.pdf>

Loval (u.å). *Loviisan Lämpö löser Lovals kylbehov och omvandlar spillvärme till miljövänlig fjärrvärme*. <https://www.loval.com/sv/om-oss/nyheter/loviisan-lampo> [Hämtad 2026-02-27]

Lundegård, E. (2018). *Energiutvinning ur avfall – Förgasning, förbränning eller plasma?* Umeå Universitet. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1251331/FULLTEXT01.pdf>

Länsstyrelsen (2011). *Utnyttjande av Forsmarks spillvärmevatten. Förstudie: Energi- och klimatgruppen, Länsstyrelsen i Uppsala län*. <https://www.lansstyrelsen.se/download/18.1b1d393819324610c3749977/1732518062458/Utnyttjande%20av%20Forsmarks%20spillvatten.%20En%20f%C3%B6rstudie..pdf> [Hämtad 2026-02-15]

Naturvårdsverket (2024). *Biogena koldioxidutsläpp och klimatpåverkan*. <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/omraden/klimatet-och-skogen/biogena-koldioxidutslapp-och-klimatpaverkan/> [Hämtad 2026-04-02]

Naturvårdsverket (2025a). *El och fjärrvärme, utsläpp av växthusgaser*. [https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-utslapp-fran-el-och-fjarrvarme/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-utslapp-fran-el-och-fjarrvarme/?utm_source=chatgpt.com) [Hämtad 2026-04-22]

Naturvårdsverket (2025b). *Vem gör vad i avfallshanteringen?* <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/avfall/vem-gor-vad/vem-gor-vad-i-avfallshanteringen/> [Hämtad 2026-03-15]

Naturskyddsföreningen (2021). *Hur fungerar kärnkraft?* <https://www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/hur-fungerar-karnkraft/> [Hämtad 2026-04-16]

NE (2024). *Stockholm*. <https://www-ne-se.ezproxy.its.uu.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/stockholm?isSe archResult=true> [Hämtad 2026-04-20]

Norrenergi (u.å). *För ett hållbart samhälle*. <https://www.norrenergi.se/om-oss/> [Hämtad 2026-03-27]

Norrenergi (2023). *Milstoplar i Norrenergis historia*.  
<https://www.norrenergi.se/media/1cwfamau/milstoplar-i-norrenergis-historia-pdf.pdf> [Hämtad 2026-05-05]

Norrenergi (2024). *Årsredovisning 2024*.  
<https://www.norrenergi.se/media/vu5jh4cf/%C3%A5rsredovisning-2024.pdf> [Hämtad 2026-02-27]

Regeringskansliet (2023). *Regeringens klimatpolitik*.  
<https://www.regeringen.se/regeringens-politik/regeringens-klimatpolitik/> [Hämtad 2026-03-10]

Region Stockholm (2023). *Elförsörjning i Stockholms län*.  
<https://www.regionstockholm.se/49306d/siteassets/regional-utveckling/rapporter-och-analys/elforsorjning-i-stockholms-lan-slutgiltig-tillganglig.pdf> [Hämtad 2026-04-20]

REST (2023). *Elförsörjning i Stockholms län*.  
<https://www.lansstyrelsen.se/download/18.1b1d393819324610c37484fe/1732515608438/Elf%C3%B6rs%C3%B6rjningen%20i%20Stockholms%20l%C3%A4n%20-%20En%20l%C3%A4gesbild%20av%20kapaciteten%20f%C3%B6r%20samh%C3%A4llets%20elektrifiering.pdf> [Hämtad 2026-04-05]

SCB (2024). *Fjärrvärmeproduktion och bränsleanvändning (MWh), efter län och kommun, produktionssätt samt bränsletyp. År 2009 - 2024*.  
[https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START\\_EN\\_EN0203\\_EN0203A/ProdbrFj/](https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START_EN_EN0203_EN0203A/ProdbrFj/) [Hämtad 2026-03-04]

Skatteverket (2026). *Skatt på bränsle*.  
<https://skatteverket.se/foretag/skatterochavdrag/punktskatter/energiskatter/skattpabransle.4.15532c7b1442f256bae5e56.html> [2026-04-08]

Stockholm Exergi (2023a). *Värtaverket*.  
<https://www.stockholmexergi.se/content/uploads/2024/04/Miljorapport-2023-Vartaverket.pdf> [Hämtad 2026-04-10]

Stockholm Exergi (2023b). *Bristaverket*.  
<https://www.stockholmexergi.se/content/uploads/2023/05/Miljorapport-Bristaverket-2022-1.pdf> [Hämtad 2026-04-10]

Stockholm Exergi (2026a). *Hammarbyverket*.  
<https://www.stockholmexergi.se/wp-content/uploads/2026/04/Miljorapport-2025-Hammarby.pdf> [Hämtad 2026-04-08]

Stockholm Exergi (2026b). *Högdalenverket*.  
<https://www.stockholmexergi.se/wp-content/uploads/2026/04/Miljorapport-2025-Hogdalen.pdf> [Hämtad 2026-04-07]

Stockholm Exergi (2023c). *Hässelbyverket*.

<https://www.stockholmexergi.se/content/uploads/2023/05/Miljorapport-Hasselbyverket-2022.pdf> [Hämtad 2026-03-28]

Stockholm Exergi (u.å.a). *Hässelbyverket*.

<https://www.stockholmexergi.se/om-stockholm-exergi/vara-anlaggningar/hasselbyverket/> [Hämtad 2026-03-27]

Stockholm Exergi (u.å.a). *Sammankoppling av fjärrvärmesystemet*.

<https://www.stockholmexergi.se/om-stockholm-exergi/sammankoppling-av-fjarrvarmesystemet/> [Hämtad 2026-05-28]

Stockholm Exergi (2026c). *Års- och hållbarhetsredovisning*.

[https://www.stockholmexergi.se/wp-content/uploads/2026/03/AHR2025\\_SV\\_26-mars.pdf](https://www.stockholmexergi.se/wp-content/uploads/2026/03/AHR2025_SV_26-mars.pdf) [Hämtad 2026-03-12]

Svenska Näringsliv (2025). *Svenska folket positivt till kärnkraft*.

[https://www.svensktnaringsliv.se/sakomraden/hallbarhet-miljo-och-energi/svenska-folket-positivt-till-karnkraft\\_1229667.html](https://www.svensktnaringsliv.se/sakomraden/hallbarhet-miljo-och-energi/svenska-folket-positivt-till-karnkraft_1229667.html) [Hämtad 2026-04-05]

Svensk Fjärrvärme (2009). *Fasa ut sista oljan*.

<https://www.energiforetagen.se/globalassets/energiforetagen/det-erbjuder-vi/rapporter-och-dokument-fjarrvarme/fasa-ut-sista-oljan.pdf?v=nonce-aa073148-28f6-4409-b27d-cedb0d981528#:~:text=Svensk%20fj%C3%A4rrv%C3%A4rme%20i%20siffror%20Ett%20normal%C3%A5r%20levererar,000%20svenska%20sm%C3%A5hus%20v%C3%A4rms%20i%20dag%20med> [Hämtad 2026-03-10]

Svensson, H. (2025). *Possible Roles of Waste Heat from Nuclear Plants in the Swedish Energy System*.

<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:2011078/FULLTEXT01.pdf>

Sveriges Riksbank (2026). *Sök räntor och valutakurser*.

<https://www.riksbank.se/sv/statistik/rantor-och-valutakurser/sok-rantor-och-valutakurser/?s=g130-SEKUSDPMI&a=D&from=2025-02-05&to=2026-02-05&fs=3#result-section> [Hämtad 2026-03-04]

Sveriges Riksdag (2017). *Brännheta skatter! Bör avfallsförbränning och utsläpp av kväveoxider från energiproduktion beskattas?*

[https://www.riksdagen.se/sv/dokument-och-lagar/dokument/statens-offentliga-utredningar/brannheta-skatter-bor-avfallsforbranning-och\\_h5b383/html/?utm](https://www.riksdagen.se/sv/dokument-och-lagar/dokument/statens-offentliga-utredningar/brannheta-skatter-bor-avfallsforbranning-och_h5b383/html/?utm) [Hämtad 2026-03-04]

Söderenergi (2026). *Teknik i framkant*.

<https://www.soderenergi.se/teknik-i-framkant/> [Hämtad 2026-02-15]

Söderenergi (2024). *Års- och hållbarhetsredovisning 2024*.

<https://www.soderenergi.se/wp-content/uploads/2025/04/Soderenergi-Ars-och-hallbarhetsredovisning-2024.pdf> [Hämtad 2026-03-20]

Uppsala kommun (2025). *Bränslemix i fjärrvärmen.*

<https://uppsala.miljobarometern.se/energi/energianvandning-och-energiproduktion/branslemix-i-fjarrvarmen/> [Hämtad 2026-03-23]

Uppsala kommun (2026). *Uppsala fortsätter att få fler invånare.*

<https://www.uppsala.se/kommun-och-politik/nyheter-och-pessmeddelanden/2026/uppsala-fortsatter-att-vaxa-med-fler-invanare/> [Hämtad 2026-03-02]

USDA (2024). *United States Tall Oil Exports to the Nordics Surge.*

[https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=United%20States%20Tall%20Oil%20Exports%20to%20the%20Nordics%20Surge\\_The%20Hague\\_Finland\\_FI2024-0002.pdf](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=United%20States%20Tall%20Oil%20Exports%20to%20the%20Nordics%20Surge_The%20Hague_Finland_FI2024-0002.pdf) [Hämtad 2026-02-19]

Vattenfall (u.å.a). *Bollmora.*

<https://powerplants.vattenfall.com/sv/bollmora/> [Hämtad 2026-02-15]

Vattenfall (u.å.b). *Carpe Futurum - för ett fossilfritt Uppsala.*

<https://www.vattenfall.se/foretag/varme-kyla/fjarrvarme/carpe-futurum/> [Hämtad 2026-03-24]

Vattenfall (2025a). *Därför varierar elpriset.*

<https://www.vattenfall.se/fokus/tips-rad/darfor-varierar-elpriset/> [Hämtad 2026-04-08]

Vattenfall (u.å.c). *Fisksätra.*

<https://powerplants.vattenfall.com/sv/fisksatra/> [Hämtad 2026-02-15]

Vattenfall (2025b). *Fjärrvärmen – en nyckel till ett stabilt energisystem.*

[https://energyplaza.vattenfall.se/blogg/fjarrvarme-nyckel-till-ett-stabilt-energisystem?\\_gl=1\\*v0rbho\\*\\_gcl\\_au\\*MTg3MTg5NDg2NS4xNzY4OTg5MjEx](https://energyplaza.vattenfall.se/blogg/fjarrvarme-nyckel-till-ett-stabilt-energisystem?_gl=1*v0rbho*_gcl_au*MTg3MTg5NDg2NS4xNzY4OTg5MjEx) [Hämtad 2026-02-25]

Vattenfall (u.å.d). *Fjärrvärmen är här.*

<https://www.vattenfall.se/foretag/varme-kyla/om-oss/vara-orter/haninge-tyreso-och-alta/> [Hämtad 2026-02-15]

Vattenfal (2026). *Forsmarks produktionshistorik.*

<https://karnkraft.vattenfall.se/forsmark/produktion/produktionshistorik/> [Hämtad 2026-05-25]

Vattenfall (u.å.e). *Jordbro.*

<https://powerplants.vattenfall.com/sv/jordbro/> [Hämtad 2026-02-15]

Vattenfall (u.å.f). *Markvärme.*

<https://www.vattenfall.se/foretag/varme-kyla/fjarrvarme/markvarme/> [Hämtad 2026-04-07]

Vattenfall (u.å.g). *Omvandla avfall till energi.*

<https://group.vattenfall.com/se/var-verksamhet/vara-energislav/avfall> [Hämtad 2026-04-07]

Vattenfall (u.å.h). *Uppsala.*

<https://powerplants.vattenfall.com/sv/uppsala/> [Hämtad 2026-03-26]

Vegoil (u.å). *BIOOLJA*.

[http://static.wm3.se/sites/2/media/23066\\_Vegoil\\_E.P.\\_AB.pdf?1415181822](http://static.wm3.se/sites/2/media/23066_Vegoil_E.P._AB.pdf?1415181822) [Hämtad 2026-04-01]

Uppsala kommun (2025). *Bränslemix i fjärrvärmen*.

<https:// uppsala.miljobarometern.se/energi/energianvandning-och-energiproduktion/branslemix-i-fjarrvarmen/> [Hämtad 2026-03-20]

Zeromission (2026). *Marknaden för kolkrediter 2026: trender, priser och nya regleringar*.

<https://zeromission.se/marknaden-for-kolkrediter-under-2026/> [Hämtad 2026-04-14]

Åberg, M., & Widén, J. (2013). Development, validation and application of a fixed district heating model structure that requires small amounts of input data. *Energy Conversion and Management* Volym(75), 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.032>

Åberg, M., Widén, J., Henning, D. (2012). Sensitivity of district heating system operation to heat demand reductions and electricity price variations: A Swedish example. *Energy* Volym (41): 525-540. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.034> [

Ångström, A. and Nielsen, H. (2011). *Kylvattenvärme från kärnkraft i fjärrvärmesystem Etapp 2 -Systemstudie Elforsk rapport 11:54*. Elforsk.

<https://energiforsk.se/media/19888/kylvattenvarme-fran-karnkraft-i-fjarrvarmesystem-etapp-2-systemstudie-elforskrapport-2011-54.pdf>

## Personlig kommunikation

Representant för E.ON, Driftingenjör (2026). Uppgifter om företagets produktionsanläggningar [e-post] (Personlig kommunikation 2026-02-27 och 2026-03-23).

Representant Norrenergi, Dataanalytiker energisystem (2026). Uppgifter om företagets produktionsanläggningar [e-post]. (Personlig kommunikation 2026-03-35).

Representant Stockholm Exergi, Energipolitisk expert (2026). Uppgifter om företagets produktionsanläggningar [e-post]. (Personlig kommunikation 2026-02-17).

Representant för Söderenergi, Ingenjör (2026). Uppgifter om företagets produktionsanläggningar [e-post]. (Personlig kommunikation 2026-02-05).

Representant 1 Vattenfall, R&D Manager (2026). Uppgifter om företagets produktionsanläggningar [e-post] (Personlig kommunikation 2026-02-27).

Representant 2 Vattenfall, R&D-ingenjör (2026). Uppgifter om företagets produktionsanläggningar [e-post]. (Personlig kommunikation 2026-03-04 och 2026-03-19).