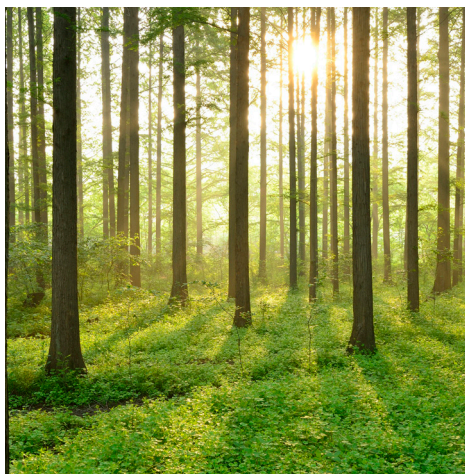
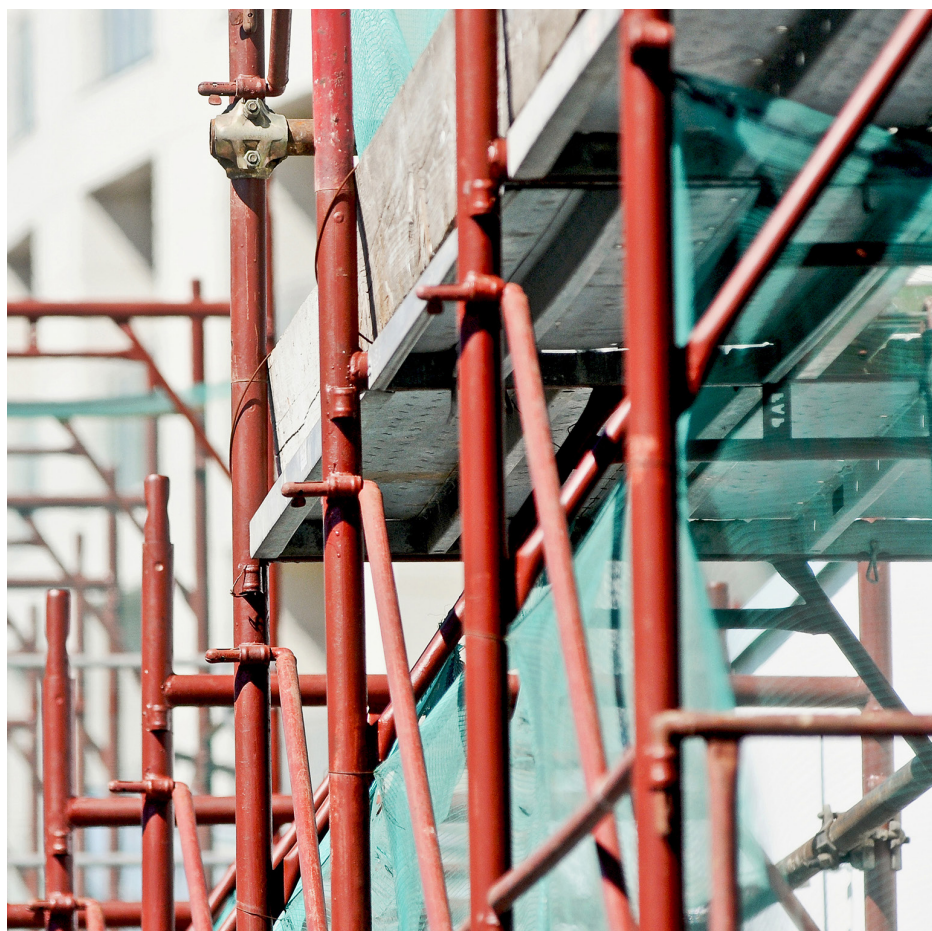


STRATEGIER FÖR ENERGIEFFEKTIVISERING UR ETT FJÄRRVÄRMEPERSPEKTIV

RAPPORT 2017:416



 FJÄRRSYN



Strategier för energieffektivisering ur ett fjärrvärmeperspektiv

Integrerad modellering av ett lokalt energisystem

MARTIN HAGBERG
FREDRIK MARTINSSON
IDA ADOLFSSON
AMBJÖRN LÄTT
CAROLINA FARAGUNA
ANNA KROOK RIEKKOLA
JOHAN LARSSON

Förord

Det har stor betydelse om man betraktar ett fjärrvärmesystem och de byggnader som är anslutna till det som separata enheter eller som en integrerad helhet. Beroende på vilket betraktelsesätt man anammar kommer man att komma till olika slutsatser om vad som är lämpliga och effektiva åtgärder om man till exempel har som mål att fasa ut användningen av fossila bränslen eller minska utsläppen av klimatpåverkande gaser.

Ur ett ägar- och rådighetsperspektiv framstår det som mer eller mindre naturligt att betrakta fjärrvärmesystemet och byggnaderna som separata och självständiga enheter. Det gör det däremot inte ur ett energisystemperspektiv. I det perspektivet är fjärrvärmesystemet och byggnaderna två delsystem som är ömsesidigt beroende av varandra där förändringar i det ena delsystemet får återverkningar i det andra. Vad händer då om man beaktar denna växelverkan? Hur påverkas möjligheten att uppfylla angelägna mål som att fasa ut användningen av fossila bränslen och minska utsläppen av klimatpåverkande gaser? Och vilka energieffektiviseringsåtgärder blir ändamålsenliga och kostnadseffektiva i sammanhanget? Det är för att söka svar på dessa och liknande frågor som projektet som redovisas i denna rapport har genomförts.

Projektet har genomförts av Martin Hagberg, Fredrik Martinsson, Ida Adolfsson, Ambjörn Lätt, Carolina Faraguna, och Johan Larsson, samtliga från IVL och Anna Krook Riekkola från Luleå Tekniska Universitet.

En referensgrupp har följt projektet. Följande personer ingick i referensgruppen: Mats Didriksson, Kraftringen, Erik Dotzauer, Fortum Värme, Martin Ekdahl, Mjölby-Svartådalens Energi, Karin Nikavar, Vattenfall, Roland Jonsson, HSB, Kristoffer Lindahl, MKB Fastighet, Madlin Serti, Södertörns fjärrvärme, Marie Skogström, One Nordic, Peter Söderblom, Mälarenergi, Charlotte Tengborg, E.ON och Erik Thornström, Energiföretagen Sverige

Projektet ingår i forskningsprogrammet Fjärrsyn som finansieras av Energiföretagen Sverige och Energimyndigheten. Forskningen inom Fjärrsyn ska stärka fjärrvärme och fjärrkyla, uppmuntra konkurrenskraftig och affärs- och teknikutveckling och skapa resurseffektiva lösningar för framtidens hållbara energisystem till nytta för energibranschen, kunderna, miljön och samhället i stort.

Leif Bodinson

Ordförande i Energiföretagen Sveriges omvärldsråd

Sammanfattning

Hur kan det integrerade fjärrvärme- och byggnadssystemet kostnadseffektivt möta mål om minskade CO₂-utsläpp och fossilbränsleutfasning? Hur påverkas fjärrvärmeproduktionssystemet av olika teknikval för energieffektivisering i stadens byggnader?

Det pågår just nu omfattande renoveringar av befintlig bebyggelse i Sverige. I samband med dessa renoveringar sker även energibesparande åtgärder av byggnadernas el- och värmebehov. Energieffektiviseringsåtgärder har effekter på såväl tillförsel- som användarsidan av energisystemet. Ett systemperspektiv är därför av stor vikt. Denna studies övergripande fokus är att med ett integrerat systemperspektiv på produktionssidan och användarsidan i en stads fjärrvärmesystem undersöka vägar för att nå framtida miljömål.

Analysen använder ett fallstudie- och modellbaserat angreppssätt där Malmö stads fjärrvärmesystem och byggnadsbestånd ligger till grund. Arbetet inkluderar en kartläggning av byggnadsbestånd och fjärrvärmeproduktion i Malmö, identifiering av teknikåtgärder inklusive renoveringspaket för energieffektivisering, energisimuleringar på byggnadsnivå, utveckling av energisystemmodell för tillförsel- och användarled i fjärrvärmesystemet och, slutligen, modellkörningar och analys av resultat.

Den utvecklade energisystemmodellen över Malmös energisystem, TIMES_Malmö, bygger på det internationellt etablerade modellgeneratoren TIMES. Modellen är en optimeringsmodell som beräknar den över tid kostnadsoptimala utvecklingen av det studerade systemet. Studien har en långsiktig tidshorisont och har 2050 som slutår för analysen.

Resultaten visar bland annat att hur stadens miljömål definieras har en viktig betydelse för vilka teknikval och investeringar som är kostnadseffektiva i systemet. Miljömål där stadens påverkan på CO₂-utsläpp utanför den egna stadens gränser inkluderas ger ett annat utfall än om fokus för miljömålen är på utfasning av fossila bränslen inom staden.

Mål om "fossilfrihet", som fokuserar på minskning av fossila bränslen inom staden, leder i modellresultaten till en hög andel värmepumpar i fjärrvärmeproduktionen. Mål om "CO₂-neutralitet", som tar hänsyn till effekter på elsystemet i det för staden omgivande systemet (marginalel), gynnar istället en högre andel kraftvärmeproduktion i fjärrvärmeproduktionen.

Enklare teknikåtgärder för energieffektivisering i byggnadsbeståndet visar ofta samhällsekonomisk kostnadseffektivitet. Omfattande klimatskåtsåtgärder ger en större energibesparing, men medför också en högre systemkostnad. Energieffektiviseringsåtgärder som minskar el- och värmeanvändning under årets kallare del då den totala efterfrågan är hög ger fördelar ur ett systemperspektiv. Åtgärder som främst minskar behovet av fjärrvärmens baslastproduktion ger i många fall begränsade fördelar ur ett systemperspektiv.

Summary

How can the integrated district heating and building system cost-efficiently meet targets on reduced CO₂ emissions and phase-out of fossil fuels? How is the district heating production system affected by different energy efficiency measures in the buildings of the city?

The building stock in Sweden is currently undergoing extensive renovations. In connection to these renovations, energy-saving measures of the buildings' electricity and heat demand are also being made. Energy efficiency measures have effects both on the supply side and the user side of the energy system. A system perspective is thus important. The overall focus of this study is to use an integrated perspective on the supply side and the user side of a city's district heating system to examine ways to achieve future environmental targets.

The analysis uses a case study and model-based approach in which the city of Malmö's district heating systems and building stock are used as basis for the analysis. The work includes a mapping of the building stock and district heating system of Malmö, identification of technology measures including renovation packages for increased energy efficiency, energy simulations on building level, development of an energy system model covering the supply- and user-side of the district heating system and, finally, model runs and analysis of results.

The developed energy system model representing the energy system of Malmö, TIMES_Malmö, is based on the internationally established model generator TIMES. The model is an optimization model that calculates the, over time, cost-optimal development of the studied system. The study has a long-term time horizon and 2050 is the end-year for the analysis.

Among other things, the results show that how the city's environmental targets are defined has a significant impact on which technology and investments choices that are cost-efficient in the energy system. A system perspective in which the city's impact on CO₂ emissions outside the city borders is included gives a different outcome than if the focus is on phasing out fossil fuels within the city.

Targets for phase-out of fossil fuels, focusing on reduction of fossil fuel use within the city, in the model results leads to a high percentage of heat pumps in the district heating production. Targets for "CO₂ neutrality", which takes effects on the electricity supply system in the city surroundings into account (marginal electricity generation), instead favor a higher proportion of combined heat and power in the district heating system.

Less extensive building measures, focusing on the technical installations of the buildings stock, often show socio-economic cost-efficiency. Extensive building envelope measures provide greater energy savings, but also results in a higher system cost. Energy efficiency measures reducing electricity and heat use in the colder parts of the year when total demand is high offer benefits from a system perspective. Measures that mainly reduce the demand for base-load production of district heating in many cases give limited benefits from a system perspective.

Innehåll

1	Det integrerade systemet i fokus	8
1.1	Studiens syfte	8
1.2	Bakgrund	8
1.2.1	Mål för energieffektivisering	8
1.2.2	Modellanalys av energieffektivisering	10
1.3	Rapportens upplägg	10
2	Optimering av stadens energisystem	11
2.1	Malmö – en fallstudie	11
2.1.1	Fjärrvärmeanslutna byggnader i Malmö – indelning i arketyper	11
2.1.2	Befintlig produktion av fjärrvärme i Malmö	12
2.2	Ett modellbaserat angreppssätt - TIMES_Malmö	13
2.3	Teknikåtgärder i modellen	14
2.3.1	Renoveringsåtgärder i byggnader	14
2.3.2	Energiprestanda och kostnad för renoveringsåtgärder	16
2.3.3	Alternativ för nyinvestering i fjärrvärmeproduktion	18
2.4	Analyserade modellfall	18
2.4.1	Omvärldens utveckling	18
2.4.2	Stadens utveckling	19
2.4.3	Stadens miljömål	21
2.4.4	Modellerade fall	22
3	Energianvändning i byggnadsbeståndet – Resultat från TIMES_Malmö	24
3.1	Idag befintligt bestånd dominerar energianvändning även i framtiden	24
3.1.1	Måttlig förändring av slutlig energianvändningen trots ökat bestånd	25
3.1.2	Enklare teknikåtgärder visar ofta samhällsekonomisk kostnadseffektivitet	25
3.1.3	El respektive värmeförbrukning skiljer mellan byggnadskategorier	25
3.2	Variationer över året är av betydelse	26
3.2.1	Olika åtgärder ger olika effekt över året	26
3.2.2	Högst energikostnader under vinterhalvår	28
4	Produktion i fjärrvärmesektorn – Resultat från TIMES_Malmö	30
4.1	Stadens miljömål påverkar fjärrvärmesektorn	30
4.1.1	Fossilfrihet ger högre andel värmepump	30
4.1.2	CO ₂ -neutralitet ger högre andel kraftvärme	31
4.1.3	Produktion förändras vid värmeeffektivisering	31
4.2	Elproduktionens utveckling i fjärrvärmesektorn	32
4.2.1	Lägre elproduktion vid fossilutfasning	32
4.2.2	Högre elproduktion för att nå CO ₂ -neutralitet	33
4.3	Skillnader i systemets elbalans	33

5	Systemets energiprestanda och kostnad – Resultat från TIMES_Malmö	35
5.1	Systemkostnad och byggnadsbeståndets energiprestanda	35
5.1.1	Energieffektivitet och kostnadseffektivitet	35
5.1.2	Dyrare med CO ₂ -neutralitet och att gå före	36
5.2	Teknik- och klimatskåtgärder ger minskad primärenergianvändning	37
6	Diskussion och slutsatser	39
	Referenser	42
Bilaga A:	Indelning av arketyper	45
Bilaga B:	Energisimuleringar för byggnader	47
Bilaga C:	Kostnader energiåtgärder i byggnader	52
Bilaga D:	Data ny fjärrvärmeproduktion	54
Bilaga E:	Omvärldsfaktorer	56

1 Det integrerade systemet i fokus

Det pågår just nu omfattande renoveringar av befintlig bebyggelse, särskilt inom de så kallade miljonprogramsområdena i Sverige. I samband med dessa renoveringar sker även energibesparande åtgärder av byggnadernas el- och värmebehov. Denna studie använder ett integrerat systemperspektiv för att undersöka hur byggnaden, fjärrvärmesystemet, och system för el- och bränsletillförsel hänger samman och påverkar varandra.

1.1 STUDIENS SYFTE

För att uppnå effektiva lösningar på en övergripande samhällsnivå krävs en helhetssyn på fastigheters energianvändning och uppströms energitillförsel. Fastighetsägares val av olika strategier och tekniklösningar påverkar byggnadens fjärrvärmebehov och effekten för fjärrvärmeleverantören kan potentiellt bli stor om en betydande del av de anslutna byggnaderna energieffektiviserar eller installerar egen värmeproduktion, som t.ex. solvärme. Trots detta analyseras byggnaders respektive fjärrvärmesystemets energianvändning i allmänhet separat från varandra.

Denna studie syftar till att med en integrerad syn på produktionssidan och användarsidan i en stads fjärrvärmesystem undersöka kostnadseffektiva vägar för att nå framtida miljömål. De huvudsakliga frågeställningarna är:

- Hur kan det integrerade fjärrvärme- och byggnadssystemet kostnadseffektivt möta mål om CO₂-reduktion och fossilbränsleutfasning?
- Hur påverkas fjärrvärmeproduktionssystemet av olika teknikval för energieffektivisering i stadens byggnader?

Frågorna analyseras utifrån påverkan på indikatorer som systemkostnader, CO₂-emissioner och systemets bränsle- och primärenergianvändning. Analysen använder ett fallstudie- och modellbaserat angreppssätt där Malmö stads fjärrvärmesystem och byggnadsstock ligger till grund. Studien identifierar kostnadseffektiva investeringarna över tid för att nå olika klimatmål och har därmed har långsiktig tidshorisont. År 2050 är slutår för analysen.

1.2 BAKGRUND

1.2.1 Mål för energieffektivisering

Konstruktion och användning av byggnader står för en betydande del av den totala energianvändningen. Inom EU uppgår nivån till 42 % (Europeiska kommissionen, 2010; 2014a). Samtidigt sker en tillväxt i sektorn vilket ytterligare innebär utmaningar kopplat till energianvändning och växthusgasutsläpp (EU, 2010).

EU har som mål att minska energiimportberoende och utsläppen av växthusgaser genom energieffektivisering och genom en ökad användning av förnyelsebar energi (EU, 2012; Europeiska kommissionen, 2013). År 2007 enades EU-länderna om långtgående energi- och klimatmål, de så kallade 20-20-20-målen (Europeiska kommissionen, 2007), vilka trädde i kraft 2009. Dessa mål innebär att man till år 2020 skall ha reducerat utsläppen av växthusgas med minst 20 % jämfört med 1990-års nivåer, att 20 % av EU:s energianvändning skall komma från förnybara källor och att man genom förbättrad energieffektivitet skall uppnå en minskning av den primära energiförbrukningen jämfört med förväntade nivåer med 20 % (Europa kommissionen, 2007; 2014b; EU, 2010). Energieffektiviseringsmålet har senare skärpts, och till år 2030 ska den primära energianvändningen minska med 30 % som en följd av energieffektiviseringar (Europeiska kommissionen, 2016).

För två av de tre 20-20-20-målen ser prognosen förhållandevis god ut. Under 2012 hade växthusgasutsläppen minskat med 18 % i förhållande till utsläppen 1990 och förväntas minska med 24 % år 2020. År 2012 var andelen förnybar energi 13 % och förväntas nå 21 % år 2020. Däremot så förutses målet kring energieffektivitet inte att nås, trots stora förbättringar i fråga om effektiv energianvändning såsom energisnålare byggnader, produkter, industriprocesser samt fordon (Europeiska kommissionen, 2014b).

Utöver EU:s mål finns även nationella energi- och klimatmål. Sverige har ett etappmål år 2020 om att minska utsläppen från verksamhet som inte omfattas av EUs system för utsläppshandel (EU-ETS) (så kallade icke-handlande sektorer) med 40 % från utsläppsnivån år 1990, övriga utsläpp omfattas av EU-ETS, SOU 2016:47, kapitel 3.2.1). I en statlig utredning (SOU, 2016) föreslås nya, ännu mer ambitiösa, etappmål för 2030 och 2040 som ska bidra att nå ett netto-noll-utsläppsmål år 2045. Etappmålen omfattar bara icke-handlande sektorer medan det övergripande målet 2045 omfattar alla utsläpp på svensk mark (inklusive flyg). I Sverige är målet för energieffektivisering att den totala energianvändningen per uppvärmd areaenhet i bostäder och lokaler ska minska med 20 % till år 2020 och 50 % till år 2050 i förhållande till användningen 1995. Målet omfattar även att andelen förnybar energi ska öka kontinuerligt (Energimyndigheten och Boverket, 2013). Ett annat nationellt mål är att minska energiintensiteten med 20 % mellan åren 2008 och 2020. Förhållanden mellan tillförd energi och BNP ska minska med 20 % (Energimyndigheten, 2016).

Gällande den svenska byggnadssektorn kommer minimikrav på energiprestanda att införas för omfattande renoveringar. Boverkets nuvarande byggregler (BBR) bedömer energiprestandan efter hur mycket el, värme, kyla och bränslen som levereras till huset. BBR tar hänsyn till olika kvalitet i energin och skiljer mellan el och övrig energi, men tar i övrigt inte hänsyn till energivarans resursåtgång sett över hela livscykeln. Diskussioner och utredningar pågår om hur byggreglerna skulle kunna bli mer teknikneutrala. En påverkansfaktor för den frågan är EU-lagstiftning genom EU-direktivet för byggnaders energiprestanda (EPBD-II) (EU, 2010), i vilket bland annat fastslås att nya byggnader som byggs efter år 2020 ska vara nära nollenergibyggnader (NNE). Dessutom ska krav på energiprestanda vid renovering komma. Kriterierna ska även omfatta renovering av byggnader där

mer än 25 % av arean renoveras eller där kostnaderna för renoveringen överstiger 25 % av värdet på byggnaden (EU, 2010).

1.2.2 Modellanalys av energieffektivisering

Fokus i nationella/multinationella dynamiska energisystemmodeller har tidigare ofta legat på energitillförselssektorerna, medan efterfrågesektorerna, inklusive byggnadssektorn, behandlas översiktligt och med begränsad detaljeringsgrad (se genomgång av Martinsson et al., 2014). Detta trots att byggnader står för en betydande del av energisystemets energianvändning och hur sektorn hanteras kommer sannolikt att ha stor betydelse för möjligheterna att nå framtida inom energi- och miljöområdet ligger. Statiska modeller för vilka huvudfokus ligger på byggnadernas energibehov, och som inkluderar en noggrann representation av åtgärder kopplat till detta, saknar istället ofta viktiga aspekter kopplade till utvecklingen av det omgivande energisystemet. Undantag finns emellertid; TIMES-Sweden är ett exempel på en dynamisk modell som har en helhetssyn på det svenska energisystemet med och som innehåller förhållandevis detaljerad beskrivning av efterfrågesektorerna (se t.ex. Krook-Riekkola 2015; Krook-Riekkola 2016). Dock så finns varken renoveringsåtgärder eller olika framtida byggnadsarketyper representerade i modellen. Antaganden om renoveringstakt och byggnaders uppvärmningsbehov tas istället utanför modellen och varierar i scenarion.

Denna studie tar ett helhetsgrepp på tillförsel- och användarsidan i en dynamisk och långsiktig energisystemmodell på lokal nivå. Förändringar i både tillförsel och efterfrågan på energi skapar ett behov av en bättre representation av kostnader och prestanda för olika tekniker samt energieffektiviseringsåtgärder i användarledet men också hur användningen påverkar energisystemet. Analys på kommunal nivå möjliggör även hänsyn till lokala förutsättningar, t.ex. byggnadsstockens sammansättning, och utgör ett viktigt komplement till mer aggregerade analyser, på nationell nivå och högre.

1.3 RAPPORTENS UPPLÄGG

Rapporten är upplagd enligt följande. I Kapitel 2 presenteras studiens metoder. Detta inkluderar en genomgång av den utvecklade energisystemmodellen som används i analysen. Kapitlet ger också viktiga förutsättningar som gäller i de modellfall som studeras. I Kapitel 3 till 5 presenteras resultatet av energisystemmodelleringen: Kapitel 3 fokuserar på byggnadsstockens energianvändning, Kapitel 4 på fjärrvärmesektorns produktion, och Kapitel 5 på systemövergripande resultat kopplat till systemets energianvändning och kostnader. I Kapitel 6 diskuteras modellresultaten och slutsatser presenteras. I Bilagorna A-E presenteras ytterligare bakgrundsinformation och dataantagen som ligger till grund för analysen.

2 Optimering av stadens energisystem

Analysen använder ett fallstudie- och modellbaserat angreppssätt där Malmö stads fjärrvärmesystem och byggnadsstock ligger till grund. Arbetet inkluderar en rad aktiviteter: kartläggning av byggnadsstock och fjärrvärmeproduktion i Malmö, identifiering av möjliga teknikåtgärder och investeringsalternativ, byggnadssimuleringar, utveckling av energisystemmodell och, slutligen, modellkörningar och analys av resultat. I detta kapitel presenteras studiens metoder.

2.1 MALMÖ – EN FALLSTUDIE

Malmö stads fjärrvärmesystem, inklusive dess stock av fjärrvärmeanslutna byggnader och produktionssystem för fjärrvärme, används som fallstudie i analysen. Avsnitt 2.1.1 och 2.1.2 presenterar en nulägesbild av dessa system.

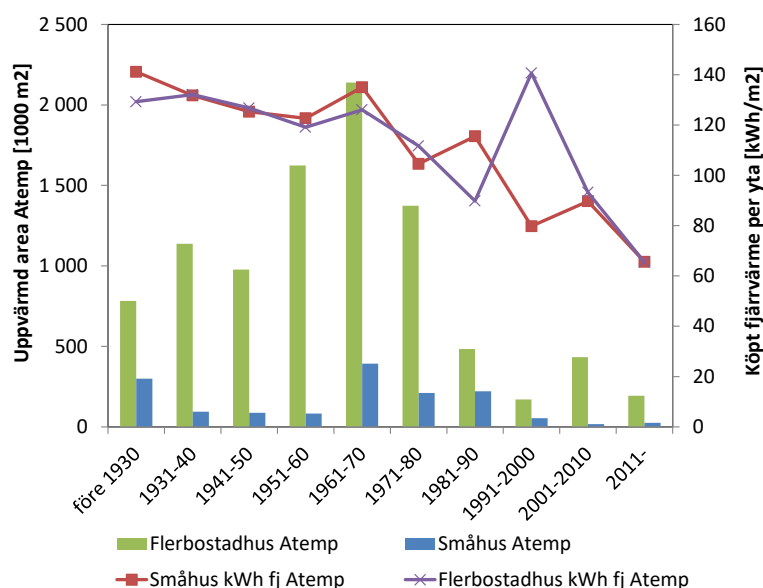
2.1.1 Fjärrvärmeanslutna byggnader i Malmö – indelning i arketyper

För att fånga variationen i energiprestanda för olika byggnadstyper i staden delas det fjärrvärmeanslutna byggnadsbeståndet i Malmö stad in i typbyggnader. Indelningen är baserad på statistik. För dessa typbyggnader, eller byggnadsarketyper, bestäms medelvärden för fastighetsel- och fjärrvärmebehov. Ett flertal källor ligger till grund för indelningen av byggnadsstocken och bestämning av energiprestanda för respektive byggnadsarketyper. Dessa inkluderar: SCB (SCB, 2016), Boverkets register över energideklarationer- GRIPEN (Boverket, 2015), Boverket BETSI-studie (Boverket, 2010) och E. ON (E. ON, 2016).

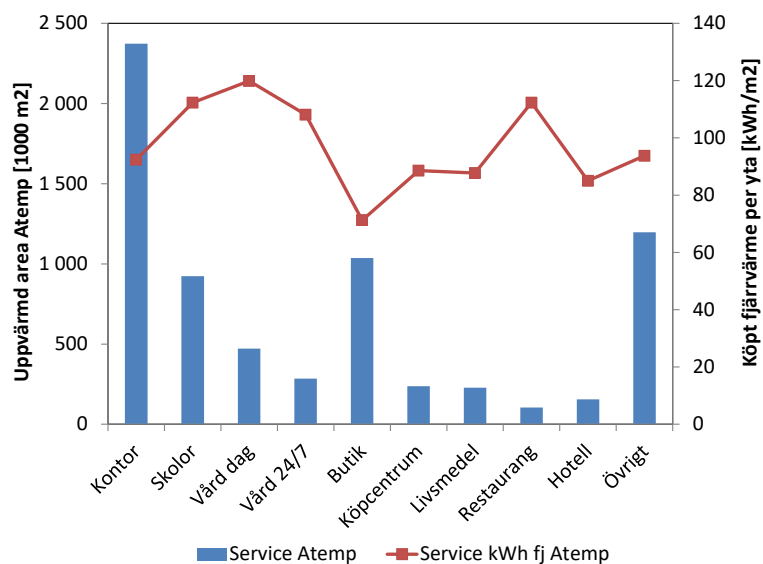
Fjärrvärmeanslutna byggnader i Malmö delas in i kategorierna småhus, flerbostadshus, och service. Dessa tre kategorier delas vidare in i husarketyper. För småhus och för flerbostadshus definieras arketyperna baserat på byggnadsår (årtionde). För servicekategorin görs en indelning med avseende på typ av verksamhet. Figur 2.1 och 2.2 visar den skattade uppvärmda golvarean och energiprestandan för fjärrvärme för respektive arketyper för den valda indelningen.

Byggnationen under miljonprogrammet (1965-1975) ger ett stort avtryck i Malmös byggnadsstock för kategorin flerbostadshus (Figur 2.1). Därefter ligger byggnationen på en betydligt lägre nivå. För servicesektorn utgör kontor den största arketyper sett till byggnadsyta (Figur 2.2).

Värmeanvändning (uttryckt som köpt fjärrvärme per m²) visar generellt på en fallande trend för bostadsbyggnader (Figur 2.1). En tillfällig ökning i värmeanvändning för flerbostadshus noteras mellan 1991-2000. Andelen byggnader med frånluftsvärmepump är betydligt högre mellan 1961-80 vilket här spelar roll för de minskade fjärrvärmebehovet under denna byggnadsperiod jämfört med 1991-2000. Variationen är dock stor inom arketyper.



Figur 2.1: Uppvärmad area samt energiprestanda avseende fjärrvärme per ålderskategori för flerbostadshus och småhus i Malmö.

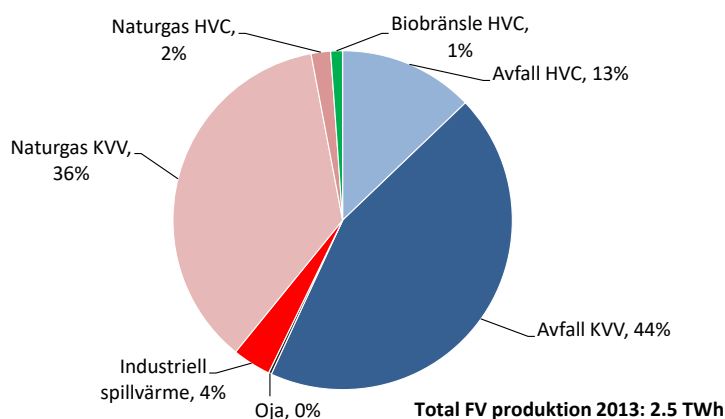


Figur 2.2: Uppvärmad area och energiprestanda för olika underkategorier inom service i Malmö.

2.1.2 Befintlig produktion av fjärrvärme i Malmö

Fjärrvärmeproduktion i Malmö består idag av en blandning av olika typer av tekniker. Den har på senare tid dominerats av värmeproduktion från avfallsförbränning (Sysavs avfallskraftvärmeverk) och naturgasbaserad värmeproduktion (framför allt från kraftvärmeverken Öresundsverket och Heleneholmsverket). Även produktion baserad på industriell spillvärme, biobränsle, värmepumpar, och olja finns i systemet. Kommande år planeras

ytterligare kapacitet i värmepumpar. Fjärrvärmeproduktionsmixen för Malmö för 2013 illustreras i Figur 2.3. Total fjärrvärmeproduktion låg år 2013 på ca 2,5 TWh.



Figur 2.3. Mix fjärrvärmeproduktion i Malmö 2013 (baserat på E.ON, 2016)

2.2 ETT MODELLBASERAT ANGREPPSSÄTT - TIMES_MALMÖ

TIMES (Loulou et al, 2016) är ett väl etablerat verktyg för forskning och långsiktiga analyser av energisystem. Verktöget utvecklas inom ramen för IEAs program för energisystemanalys (ETSAP, 2017) och används världen över.

TIMES är en optimeringsmodell som, under de scenarieförutsättningar som ges, bestämmer den kostnadsoptimala utvecklingen av det studerade systemet genom att minimera systemets kostnader över den studerade tidshorisonten. Modellens beräkningsresultat representerar därför det system som till lägst kostnad möter systemets efterfrågan, givet förutsättningar och randvillkor.

I denna studie utvecklas en TIMES-modellapplikation som beskriver energisystemet i Malmö med fokus på tillförsel och användning av fjärrvärme. Denna *TIMES_Malmö*-modell beskriver stadens fjärrvärmeproduktionssystem och stadens fjärrvärmeanslutna byggnader. Beskrivningen inkluderar tekniska och ekonomiska data för det studerade systemets energitillförsel, energiomvandling, distribution och slutanvändning av energi. Befintliga tekniker och framtida investeringsmöjligheter i fjärrvärmeproduktion och energieffektiviseringsåtgärder representeras i modellen.

Fjärrvärmeanläggningar i Malmös fjärrvärmesystem beskrivs i modellen med data såsom installerad kapacitet, verkningsgrader, α -värde (kraftvärme), tillgänglighet, kvarstående livslängd och driftskostnader. När befintlig kapacitet fasas ut på grund av ålder eller av andra skäl blir för kostsam, har modellen möjlighet att inkludera investeringar i nya fjärrvärmeanläggningar.

Fjärrvärmeanslutna byggnader representeras i modellen med ett flertal byggnadsarketyper uppdelat på byggnadsårtionde för flerbostadshus och för småhus. I kategorin service är arketyperna uppdelade på verksamheter, t.ex. sjukhus, kontor med mera. (enligt avsnitt 2.1.1). Energiförbehovet i byggnadsstocken delas upp på uppvärmning, tappvarmvatten och fastighetsel (el för drift av

fastigheten). Hushållens direkta elanvändning (i elapparater som TV, kylskåp, etc.) ingår inte i modellen. Ett antal olika teknikåtgärder för energieffektivisering i byggnadsbeståndet inkluderas i modellen.

Medan fjärrvärmens som produceras i modellens fjärrvärmesystem används inom systemgränsen i modellens byggnadsbestånd, kan el som produceras i kraftvärmeverk "exporteras" (säljas till marknadspris) och generera en inkomst till systemet (vilket ger en lägre systemkostnad).

För energi som tillförs systemet (bränslen till fjärrvärmeverk och el till fjärrvärmeverk och fastigheter) antas ett energiprisscenario som anger en projektion av prisutveckling under den studerade tidshorisonten. För avfall och lokala biobränslen ansätts också en övre gräns för tillgång som begränsar användningen. För avfall antas denna gräns ligga på dagens nivå för hela den modellerade perioden. För biobränslen antas det finnas en lokal/regional tillgång av oförädlade biobränslen till en något lägre kostnad och en internationell marknad för förädlade bränslen (pellets) till en högre kostnad. Tillgången på pellets är till det antagna marknadspriset obegränsad i modellen.

Den modellerade tidshorisonten sträcker sig från 2013 till 2050. Varje modellår är uppdelat på 36 tidssteg för att fånga variationer över året (12 månader samt dag, natt, och "peak"). I modellen ansätts en diskonteringsränta på 5 % som används för nuvärdesberäkningar i modellens optimeringsprocess samt i dess investeringsberäkningar. (Information om teknikernas investeringskostnad och livslängd, ges i Bilaga C och D.)

2.3 TEKNIKÅTGÄRDER I MODELLEN

TIMES_Malmö optimerar inte bara driften av befintliga tekniker i systemet utan har även möjlighet att förändra teknikmixen i systemet genom nyinvesteringar och renoveringsåtgärder. Vilka teknikåtgärder som definieras i modellen är därför av vikt för modellens möjliga utfall. Modellen omfattar olika typer av teknikåtgärder i olika delar av systemet: dels renoveringsåtgärder i byggnader och dels nyinvesteringar i fjärrvärmeproduktion.

2.3.1 Renoveringsåtgärder i byggnader

Ett antal energieffektiviseringsåtgärder för byggnadsstocken inkluderas i studien. Teknikåtgärderna samlas i modellen i fem stycken olika "renoveringspaket" (Paket 0-Paket 4) enligt nedan.

Paket 0 – Fastighetsunderhåll: Detta paket innehåller åtgärder som kan anses som underhåll snarare än ren energieffektivisering. Paket 0 ingår även som del i övriga paket.

Åtgärd:

- Byte till 3-glasfönster av branschstandard
- Allmänna underhållsåtgärder

Paket 1 – Tekniska installationer: Detta paket innehåller enklare installationer och mindre omfattande ingrepp i byggnaden.

Åtgärder:

- Byte till LED för fastighetsbelysning
- Installation av närvarostyrning för fastighetsbelysning
- Byte av termostater till radiatorer
- Injustering av värmesystemet, ventiler och termostater
- Byte till frekvensstyrda vattenpumpar
- Byte till snålspolande armaturer (vattenblandare)
- Byte till frekvensstyrda fläktar
- Injustering av ventilationsflöden

Paketet påverkar fjärrvärmebehovet under hela året eftersom det ökar effektiviteten på värmesystemet och minskar tappvarmvattenbehovet. Injustering av ventilationsflöde kan slå åt båda håll beroende på om det är för högt eller för lågt flöde i den existerande byggnaden. Åtgärden påverkar under hela uppvärmningssäsongen.

Paket 2 – Värmeåtervinning: Beroende på vilka förutsättningar som föreligger för varje arketyper väljs om värmepump eller ventilation med värmeåtervinning (FTX) ska inkluderas som renoveringsalternativ. Status på aktuellt ventilationssystem ligger i stort till grund för detta.

Åtgärder:

- Installation av frånluftsvärmepump (FVP)

eller

- Installation eller byte av FTX-aggregat

Både värmepumpslösningar och FTX-aggregat minskar fjärrvärmebehovet under stora delar av året men kan beroende installationslösning, storlek och andra förutsättningar påverka energisystemet på olika sätt. Gemensamt för alternativen är att de förkortar uppvärmningssäsongen och beroende på installationslösning också minskar fjärrvärmeanvändningen till tappvarmvatten. Vid resultatanalys är det viktigt att ha i åtanke vilken av åtgärderna som avses eftersom de påverkar fjärrvärmeanvändning och elanvändning olika under året. I projektet har statistik från GRIPEN-registret använts, där andelen av olika ventilationssystem anges för olika arketyper. För de arketyper med högst andel självdrag eller frånluftsventilation har FVP valts som åtgärd, medan de arketyper med högst andel från- och tilluftsventilation (FT) har simulerats med FTX som åtgärd. Alla nybyggnationer har simulerats med FTX. Detta är en medveten förenkling för att begränsa arbetet och det finns möjlighet att ytterligare förbättra modellen i framtiden.

Paket 3 – Solvärme: Detta paket inkluderar solvärmepaneler. Paketet dimensioneras efter tappvarmvattenbehovet och med konservativt antagande om tillgänglig takyta. Solvärmepanelerna antas vara kopplade på sekundärsidan till

ackumulatortankar som kan tillgodose tappvarmvattenbehov och värmebehov under dygnet för att öka utnyttjandegraden.

Åtgärd:

- Installation av solvärmepaneler

Solvärme minskar fjärrvärmebehovet mest under sommaren men bidrar också till en viss minskning under resten av året.

Paket 4 – Klimatskal: Paketet innehåller omfattande klimatskalåtgärder med hög investeringskostnad, samt åtgärder i Paket 1 (Tekniska installationer). I praktiken kan långt ifrån hela beståndet antas komma att genomföra detta paket av arkitektoniska skäl.

Åtgärder:

- Energieffektiva fönster
- Tilläggsisolering fasad
- Tilläggsisolering vind
- Samtliga åtgärder i Paket 1 (Tekniska installationer)

Paketet påverkar fjärrvärmebehovet under hela året och har den mest utjämnande effekten på behovskurvan av renoveringspaketen, det vill säga att behovet minskar mycket under kallare dagar och mindre under varmare dagar.

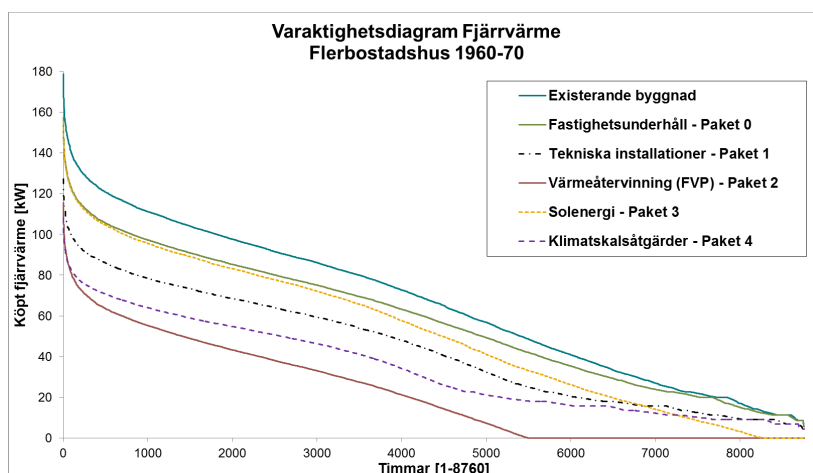
2.3.2 Energiprestanda och kostnad för renoveringsåtgärder

Byggnadsarketypernas energiprestanda och effektsignatur, med respektive utan de fem olika renoveringspaketen, tas fram. För arketyper med stort genomslag i byggnadsstocken görs detta genom energisimuleringar (med simuleringssverket IDA ICE (Equa Solutions, 2016)). För arketyperna som inte simuleras görs kompletterande beräkningar. Det antas att renoveringspaketen ger en liknande (procentuell) effekt som för motsvarande simulerade fall under jämförbara förutsättningar. Som underlag till beräkningar används framför allt energideklarationsregistret GRIPEN (Boverket, 2015) samt resultat från projektet BETSI (Boverket, 2010).

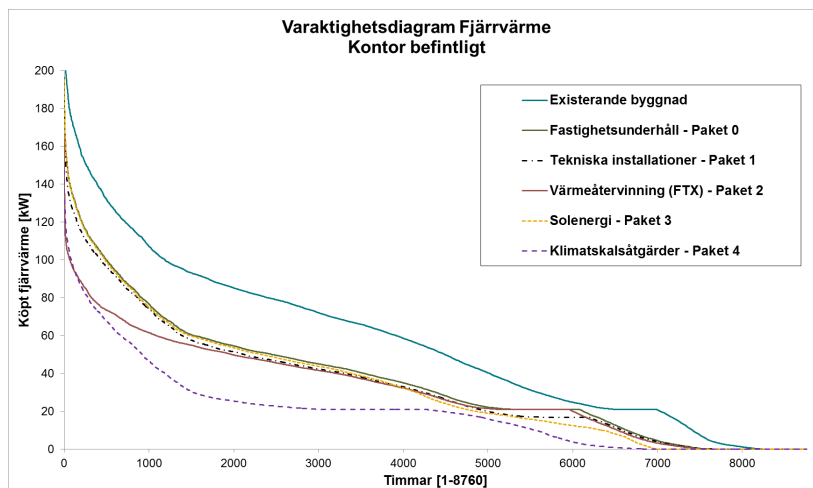
Exempel på resultat från byggsimuleringarna presenteras i Figur 2.4 och 2.5 i vilka fjärrvärmeanvändningen över året visas för 60-tals flerbostadshus respektive kontor. Det kan noteras att effekten av de olika renoveringspaketen skiljer sig åt mellan olika byggnadsarketyper. Det beror bland annat på verksamhet och ursprunglig energiprestanda. Energiprestanda på årsbasis för flerbostadshus från 1960-talet, såväl som kostnadsantaganden för renoveringspaketen, åskådliggörs i Figur 2.6.

Kostnaderna för de olika renoveringspaketen har tagits fram med kalkylprogram, resultat från tidigare studier, samt egna antaganden och beräkningar. Wikells kalkylprogram Sektionsdata (Wikells, 2016) har varit en viktig källa. Andra källor inkluderar Repabs underhållskostnadsböcker (REPAB, 2012; 2013) samt en referensdatabas från projekten HalveraMera och Rekorderlig Renovering (BeBo, 2015). Mer information kring renoveringsåtgärdernas kostnader ges i Bilaga C.

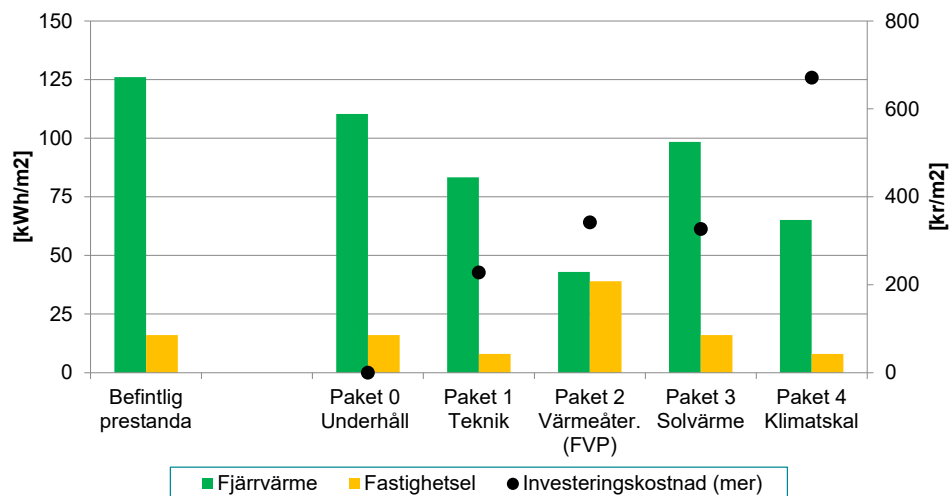
Värdena från analysen av byggnadernas energibehov såväl som kostnaderna för renoveringspaketen blir i nästa steg indata till modellen TIMES_Malmö. De timupplösta resultaten från energisimuleringarna på för arketyperna anpassas då till TIMES_Malmö-modellens 36 tidssteg.



Figur 2.4. Varaktighetsdiagram för fjärrvärmeanvändning i flerbostadshus byggda 1960-1970, med och utan genomförda renoveringsåtgärder (Paket 0-4). Resultat från energisimulering i IDA ICE.



Figur 2.5. Varaktighetsdiagram för fjärrvärmeanvändning i befintliga kontor, med och utan genomförda renoveringsåtgärder (Paket 0-4). Resultat från energisimulering i IDA ICE.



Figur 2.6. Energiförbrukning för 60-tals flerbostadshus (fastighetsel och fjärrvärme) samt investeringskostnader för renoveringspaketen uttryckta som merkostnad mot Paket 0.

2.3.3 Alternativ för nyinvestering i fjärrvärmeproduktion

Förutom redan befintliga anläggningar för fjärrvärmeproduktion i Malmö (se avsnitt 2.1.2) definieras i modellen ett flertal olika nyinvesteringsoptioner. Nyinvesteringar sker i modellen antingen när befintliga anläggningar fasas ut på grund av ålder eller om befintliga anläggningar blir ett dyrare alternativ än att nyinvestera (t.ex. på grund av stigande bränsle- och/eller CO₂-priser). Nyinvesteringsoptionerna i modellen inkluderar:

- Hetvattenpanna: Kol, naturgas, eldningsolja, biobränslen, avfall och el
- Kraftvärmeverk: Kol, naturgas, eldningsolja, biobränslen och avfall
- Värmepump (centraliserad)
- Solvärme (centraliserad)

Varje teknik finns i modellen tillgänglig i 3 till 4 representativa anläggningsstorlekar (för hetvattenpannor – 1, 10, och 50 MW) med olika specifika investeringskostnader och i vissa fall olika tekniska prestanda, se Bilaga D. Kostnads- och teknikantaganden baseras på tidigare studier och sammanställningar (Nohlgren et al., 2014; Danish Energy Agency och Energinet, 2012).

2.4 ANALYSERADE MODELLFALL

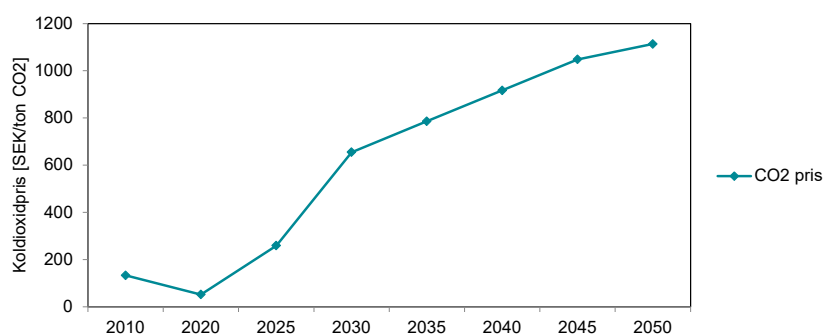
En stads energisystem påverkas av faktorer i dess omvärld. Detta inkluderar parametrar som ekonomisk tillväxt, energiprisutveckling och såväl internationella, nationella som lokala miljömål och styrmedel.

2.4.1 Omvärldens utveckling

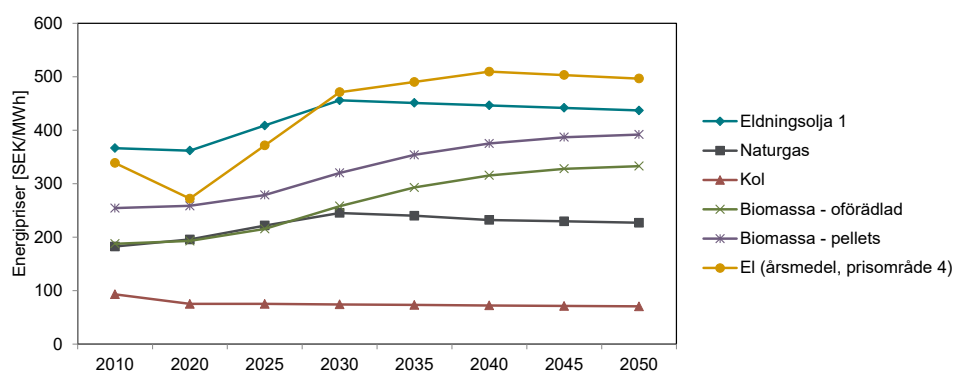
Klimatåtaganden och relaterade styrmedel kommer sannolikt ha en stor påverkan på utvecklingen av energisystemet. I denna studie antar vi att världen går mot det så kallade 2-gradersmålet och att Norden går mot klimatneutralitet runt 2050. I

enlighet med detta så baseras bränslepriser, elpriser och CO₂-priser på en aktuell studie från International Energy Agency (IEA) benämnd *Nordic Energy Technology Perspectives (NETP)* (NER and IEA, 2016). I denna studie modelleras det Europeiska energisystemet med fokus på det Nordiska systemet till 2050 i scenarier som är i enlighet med ett globalt 2-gradersmål. På detta sätt länkas modellering med TIMES_Malmö med ett väl etablerat omvärldsscenario.

För att möta 2-gradersmål globalt och klimatneutralitet i Norden krävs att kraftfulla styrmedel för reduktion av klimatgaser sätts in. Detta avspeglas i genom ett ökande pris på utsläpp av CO₂. Detta gör i sin tur att efterfrågan, och därmed priserna på fossila bränslen (exkl. CO₂-pris), dämpas, medan priset på biomassa stiger under perioden. Den antagna utvecklingen av CO₂-priser (kan betraktas som kostnad för utsläppsätter) presenteras i Figur 2.7. Bränslepriser (exkl. CO₂-pris för fossila bränslen) och elpris presenteras i Figur 2.8. Se även Bilaga E för antaganden för CO₂-faktorer och primärenergifaktorer för bränslen och el.



Figur 2.7. CO₂-prisets utveckling i antaget omvärldsscenario (baserat på "carbon neutral scenario" i NETP studie (NER och IEA, 2016))



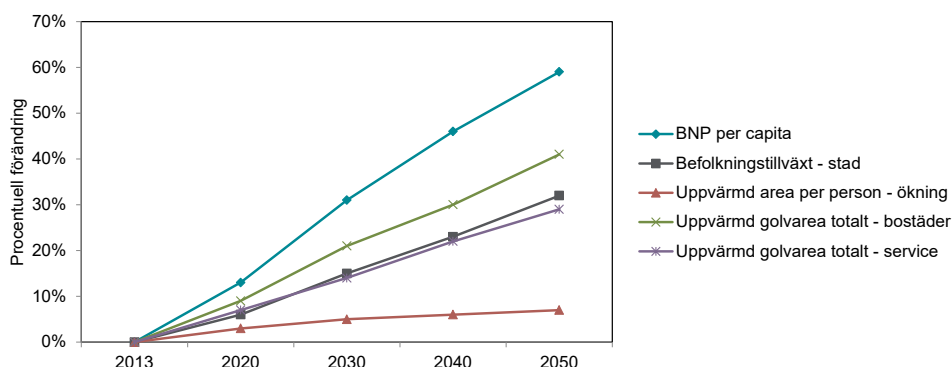
Figur 2.8. Bränsle- och elprisutveckling i antaget omvärldsscenario (baserat på "carbon neutral scenario" i NETP studie (NER och IEA, 2016))

2.4.2 Stadens utveckling

Byggnadsbeståndets utveckling antas i studien vara kopplad till befolkningstillväxt och BNP-utveckling. Sambanden dessa faktorer emellan är baserad på metodik från IEA, som bland annat är tillämpad den tidigare nämnd

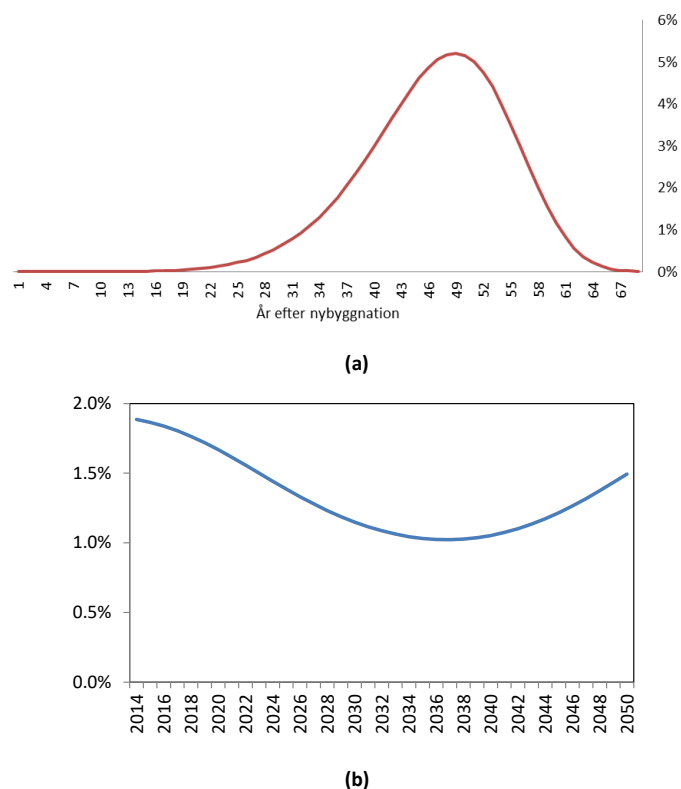
studien NETP (NER och IEA, 2016). Befolkningstillväxten för svenska städer baseras här på prognoser från FN (UNDESA, 2014) och BNP tillväxt baseras på prognos från Världsbanken (IMF, 2015).

För Malmö innebär gjorda antaganden att befolkning ökar från drygt 320 000 idag till ca 425 000 till år 2050. Den uppvärmda totala golvarean för bostäder ökar från ca 14 miljoner m² idag (SCB, 2016) till ca 20 miljoner m² år 2050. Den antagna utvecklingen av bostadsstocken, vilken utgör indata till TIMES_Malmö-modellen, åskådliggörs i Figur 2.9.



Figur 2.9. Antagen utveckling av uppvärmd golvarea i Malmö och underliggande parametrar (BNP per capita och befolkningstillväxt)

Förutom nybyggnationstakt är också takten för renovering av befintligt byggnadsbestånd en viktig faktor för byggnadsbeståndets utveckling och energianvändning. Den tekniska medellivslängden för centrala byggnadskomponenter som fasad, fönster, dörrar, ventilation och VVS antas här till 50 år (Erlandsson och Holm, 2015). Vidare antas att beståndet inom varje byggnadsarketyper renoveras i medeltal 50 år efter nybyggnation. men med en antagen fördelning, enligt Figur 2.10a. Resultatet av antagandena på den totala renoveringsnivån i Malmö presenteras för flerfamiljshus i Figur 2.10b. Den stora nybyggnationen under åren för miljonprogrammet ger här ett stort renoveringsbehov i början av den studerade perioden (Figur 2.10b).



Figur 2.10. Antagen renoveringstakt för flerbostadshus. I (a) som antagen fördelning av renoveringar i år från nybyggnation för en viss arketypp, och i (b) uttryckt som andel renoverad area per år totalt för byggnadsbeståndet under studiens tidshorisont.

2.4.3 Stadens miljömål

Många städer och kommuner arbetar idag med olika typer av miljö- och klimatmål. Strategierna kan se olika ut, och inriktningen kan samtidigt ha påverkan på vilka teknikval som är kostnadseffektiva i energisystemet.

Två, inom studien antagna, miljömålsdefinitioner på stadsnivå kontrasteras i modelleringen (inom parentes anges kortare benämningar av dessa som används i kommande avsnitt av rapporten):

- **Fossilbränslefri stad från 2030 ("No fossil"):** Detta mål präglas av ett lokalt synsätt i vilket staden fokuserar på CO₂-utsläpp som den direkt kan anses ha rådighet över. Målet fokuserar på utfasning av primära fossila bränslen inom staden. Det antas att stadens mål definieras som att olja, kol och naturgas inte tillåts i staden från år 2030 och framåt. Produktionsmixen i elsystemet antas ligga utanför det staden har rådighet över och elanvändning regleras därför inte inom detta mål.

Trots att brännbart avfall innehåller fraktioner av fossilt ursprung räknas avfall här inte som ett (primärt) fossilt bränsle och avfallsförbränning regleras inte inom målet.

- **CO₂-neutral stad från 2030 ("CO₂ Neutral"):** Detta mål präglas av ett systemsynsätt där staden strävar efter att ta hänsyn till CO₂-utsläpp som också sker utanför stadens gränser som en följd av energianvändning i staden. Målet fokuserar på att minska netto-utsläppen av CO₂ från staden – dessa skall vara 0 (eller lägre) från 2030 och framåt. Elanvändning och elproduktion inom staden tas hänsyn till genom att den antas påverka CO₂-utsläppen från det nordiska och europeiska elsystemets produktionsmarginal.

Systemkonsekvenserna av förändrad avfallsförbränning lokalt är komplexa och beror av den alternativa användningen av avfallet (se t.ex. Fråne et al., 2016). Viss alternativ hantering av avfall kan i ett systemperspektiv anses ge upphov till högre utsläpp av klimatgaser (t.ex. deponering) och medan andra ger upphov till lägre utsläpp av klimatgaser (t.ex. materialåtervinning). Inom detta mål antas systemeffekterna av en förändrad avfallsförbränning vara klimatneutrala (d.v.s. leda till oförändrade utsläpp).

Målet innebär att både fossila bränslen och el i praktiken kan användas även efter 2030, men att utsläpp kopplade till detta i så fall måste "kompenseras" med elexport från staden.

De två kontrasterande miljömålsdefinitionerna hanteras i modelleringen som kvantitativa krav utöver de skatter och styrmedel som inkluderas i modellen vilka staden inte har rådighet över.

Förutom koldioxidpriset (se avsnitt 2.4.1), vilket antas bestämmas på internationell nivå, inkluderas även relevanta befintliga svenska energiskatter i modellen enligt gällande regler (se t.ex. Energimyndigheten, 2015). De sistnämnda är i modellen konstanta under hela den studerade tidshorizonten.

2.4.4 Modellerade fall

Utifrån studiens frågeställningar definieras ett antal modellfall. Modellfallen har olika angreppssätt och förutsättningar och syftar till att tillsammans generera ett resultatunderlag som i sin helhet kan ligga till grund för analysen. De är således inte konstruerade för att vart och ett för sig utgöra "sannolika" framtidsutvecklingar.

De definierade modellfallen skiljer sig åt från framför allt två aspekter: (1) stadens miljömål och (2) hanterande av energieffektivisering i byggnadsstocken. Två kontrasterande miljömålsdefinitioner för staden, "No Fossil" och "CO₂ Neutral" presenterade i avsnitt 2.4.3. För dessa två miljömålsdefinitioner körs sex modellfall:

- I fem olika modellfall varieras renoveringspaketen (se avsnitt 2.3.1), där endast en typ av renoveringspaket finns tillgängligt i respektive fall. I syfte att närmare studera systemeffekterna av respektive renoveringsstrategi, förutsätts alla renoveringar i byggnadsbeståndet genomföras med det aktuella paketet. Dessa modellfall hänvisas till som *simulerade* fall (Sim 0, Sim 1, Sim 2, Sim 3 och Sim 4)

- I ett sjätte modellfall görs alla renoveringspaket tillgängliga i modellen och kostnadsoptimering avgör vilken kombination av renoveringspaket som används. Detta fall hänvisas till som *optimerat* fall.

För åtgärder i fjärrvärmeproduktionen optimeras utvecklingen i samtliga fall, det vill säga alla investeringsmöjligheter är tillgängliga. För övriga förutsättningar, vilka presenterats i tidigare avsnitt, gäller också att förutsättningarna är lika i samtliga fall.

Utvecklingen av energiprestanda i nybyggnation är likadan i samtliga fall. Här antas en utveckling ske från energiprestanda i nivå med nuvarande BBR-definition till en förbättrad energiprestanda i framtida nybyggnationer.

En överblick över de olika modellfallen (med fokus på skillnaderna dem emellan) ges i Tabell 2.1.

Tabell 2.1. Översikt av modellerade fall

Miljömål	Beteckning modellfall	Tillgängliga renoveringspaket i byggnadsstock	Tillgängliga investerings- alternativ i FV produktion
No Fossil	Sim 0	Paket 0 (Underhåll)	Alla
	Sim 1	Paket 1 (Teknik)	Alla
	Sim 2	Paket 2 (Värmeåtervinning)	Alla
	Sim 3	Paket 3 (Solvärme)	Alla
	Sim 4	Paket 4 (Klimatskal)	Alla
	Optimering	Alla	Alla
CO ₂ Neutral	Sim 0	Paket 0 (Underhåll)	Alla
	Sim 1	Paket 1 (Teknik)	Alla
	Sim 2	Paket 2 (Värmeåtervinning)	Alla
	Sim 3	Paket 3 (Solvärme)	Alla
	Sim 4	Paket 4 (Klimatskal)	Alla
	Optimering	Alla	Alla

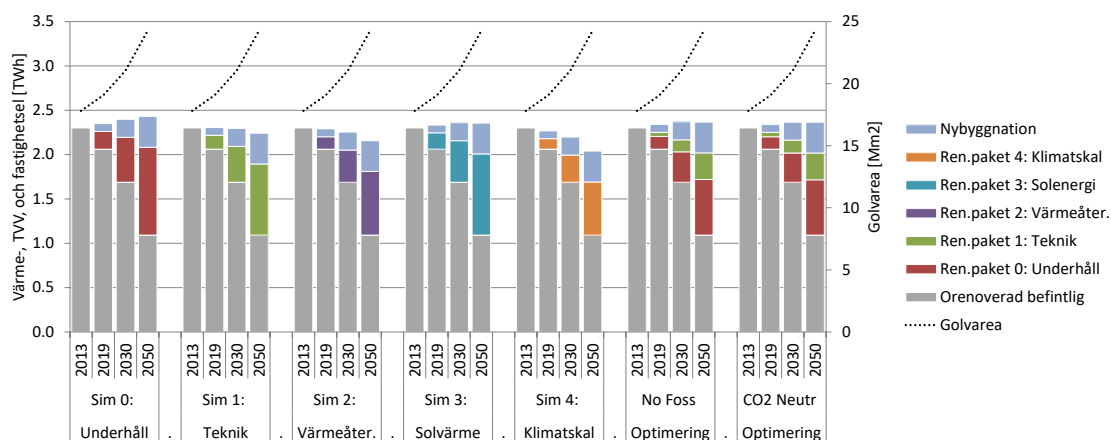
3 Energianvändning i byggnadsbeståndet – Resultat från TIMES_Malmö

I detta kapitel presenteras resultat från energisystemmodelleringen med TIMES_Malmö med fokus på byggnadsbeståndets energianvändning. Resultaten visar bland annat att den specifika värmeanvändningen (per m²) i byggnadsbeståndet kan förväntas minska och hålla nere den framtida utvecklingen av fjärrvärmeefterfrågan, samt att enklare teknikåtgärder för energieffektivisering ofta visar samhällsekonomisk kostnadseffektivitet.

3.1 IDAG BEFINTLIGT BESTÅND DOMINERAR ENERGIANVÄNDNING ÄVEN I FRAMTIDEN

Idag befintliga byggnader kommer ha stor betydelse för sektorns totala energianvändning under lång tid framöver. Detta gäller också vid betydande nybyggnation. Skälet är att framtida nybyggda fastigheter kan förväntas ha betydligt bättre energiprestanda än dagens bestånd. Strategier för energieffektivisering av befintliga byggnader är därför av stor vikt för sektorns totala energianvändning och miljöpåverkan. I Figur 3-1 presenteras energianvändningen (exkl. hushållsel) i det fjärrvärmeanslutna byggnadsbeståndet för den studerade tidshorisonten, uppdelat på ej renoverat och renoverat bestånd (renoveringspaket 0 till 4), samt nybyggnation.

I modellerade fall ökar den fjärrvärmeanslutna arean genom nybyggnation med 36 % under den studerade perioden (som följd av antaganden beskrivna i avsnitt 2.4.2). Befintliga byggnader för år 2013 står ändå för 83- 86 % av slutliga energianvändningen år 2050 i modellresultaten.



Figur 3-1. Energianvändning (exkl. hushållsel) i fjärrvärmeanslutna byggnadsstocken uppdelat på inte renoverat bestånd, renoverat bestånd och nybyggnation.

3.1.1 Måttlig förändring av slutlig energianvändningen trots ökat bestånd

Trots en betydande ökning av byggnadsbeståndet förändras den totala energianvändningen måttligt under den studerade perioden. Samtliga modellfall genomgår en betydande förbättring av den genomsnittliga energiprestandan i byggnadsstocken. Detta uppnås både genom energieffektiviseringsåtgärder i befintliga byggnader och genom att nybyggnationen har en bättre energiprestanda än dagens genomsnittliga bestånd.

Val av renoveringspaket påverkar byggnadsstockens energianvändning. Byggnadsstockens energianvändning (uppvärmning, tappvarmvatten, och fastighetsel) förändras för optimerade fall med ca +3% och för simulerade fall med mellan +6 % och -6 % från 2013 till 2050. Den genomsnittliga energianvändningen per areaenhet minskar med 25 % för optimerade fall och mellan 23 och 35 % för simulerade fall. Som följd av de definierade renoveringspaketen (se avsnitt 2.3 och Bilaga B) ger Sim 0 (Underhåll) den minsta förbättringen av byggnadsbeståndets genomsnittliga energiprestanda, medan Sim 4 (Klimatskal) ger den största förbättringen.

3.1.2 Enklare teknikåtgärder visar ofta samhällsekonomisk kostnadseffektivitet

De optimerade fallen uppvisar en kombination av olika renoveringspaket (Figur 3.1). Det finns således inte ett enskilt paket med åtgärder som är optimalt för hela byggnadsstocken. Dock indikerar modellresultaten att enklare teknikåtgärder oftare visar samhällsekonomisk kostnadseffektivitet än mer omfattande åtgärder.

Teknikåtgärdspaketet (paket 1) visar kostnadseffektivitet för en betydande del av byggnadsbeståndet för båda de modellerade miljömålsdefinitionerna och väljs tillsammans med "underhållspaketet" (paket 0). De i investeringskostnad något dyrare renoveringspaketen "värmeåtervinning" (paket 2), "solvärme" (paket 3), och "klimatskal" (paket 4) väljs inte i modellens optimering för de testade förutsättningarna.

De två kontrasterande miljömålsdefinitionerna ger i modellresultaten en marginell skillnad på val av renoveringspaket, miljömålet om CO₂-neutralitet från 2030 ("CO₂ Neutral") ger marginellt högre användning av Paket 1 (Teknik) än miljömålet om fossilfrihet från 2030 ("No Fossil").

3.1.3 El respektive värmeförbrukning skiljer mellan byggnadskategorier

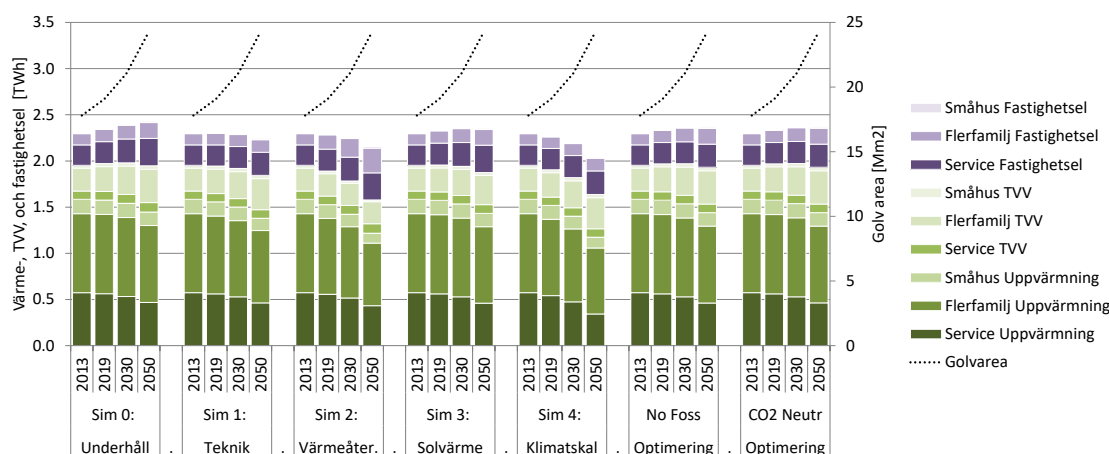
Förutom total energianvändning är det för systemkostnader och miljöpåverkan av stor betydelse om det rör sig om el- eller värmeanvändning. Här skiljer sig fördelningen en del mellan byggnadskategorier. Figur 3-2 presenterar energianvändning i byggnadsstocken uppdelat på fastighetskategori samt värme- och fastighetselanvändning.

Flerfamiljshus står för störst fjärrvärmeanvändning i jämförelse med småhus och service. I de modellerade fallen står flerfamiljshus för 57 % av byggnadsbeståndets fjärrvärmeanvändning år 2013 och för 58-64 % år 2050. För fastighetsel står

servicesektorn för större användning än för flerfamiljshus och för småhus. Lokaler står för 64 % av användningen av fastighetsel år 2013 och för 58-62 % år 2050.

Sim 1 (Teknik) och Sim 4 (Klimatskal) uppvisar den största effektiviseringen av fastighetselanvändning med en minskning av användningen per golvyta på ca 15 % från 2013 till 2050. I kontrast uppvisar Sim 2 (Värmeåtervinning) en ökning av fastighetselanvändningen per golvyta med 22 %, medan den är nära oförändrad för Sim 0 (Underhåll) och (Solvärme). De optimerade fallen, vilka som tidigare nämnts visar en kombination av underhållspaketet (Paket 0) och Teknikåtgärdspaketet, visar båda en motsvarande minskning på 9 %.

För fjärrvärmeanvändning ser det delvis annorlunda ut. Sim 2 (Värmeåtervinning) ger i detta avseende den största effektiviseringen med en minskning på 41 % av fjärrvärmeanvändning per golvyta till 2050 i jämförelse med 2013. Sim 4 (Klimatskal) ger den näst största värmeeffektiviseringen, med ett motsvarande värde på 38 %. För de simulerade fallen följer därefter Sim 1 (Teknik), Sim 3 (Solvärme) och Sim 0 (Underhåll) med en minskad specifik fjärrvärmeanvändning på 27-31 %. För de optimerade fallen är motsvarande värde ca 28 %.



Figur 3-2. Energianvändning i byggnadsstocken uppdelat på typ av fastighet samt värme- och fastighetselanvändning

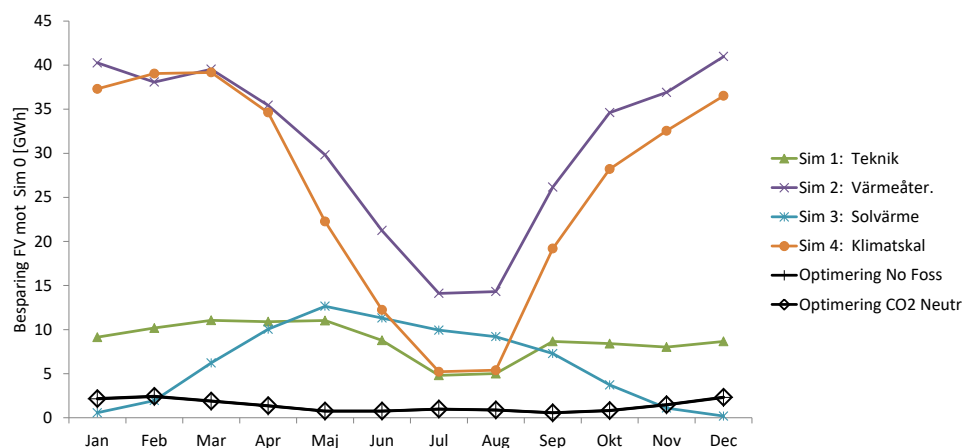
3.2 VARIATIONER ÖVER ÅRET ÄR AV BETYDELSE

När i tiden energianvändningen sker är av betydelse då detta påverkar hur värmen (eller elen) produceras och vilken produktionskapacitet som krävs i systemet. Dessa faktorer har sin tur betydelse för åtgärdernas kostnadseffektivitet då marginalkostnaden för el- och fjärrvärmeanvändning varierar över året.

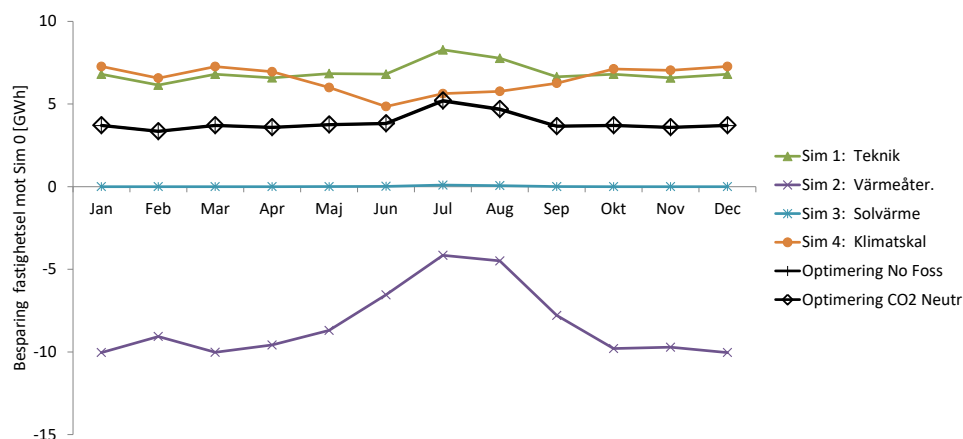
3.2.1 Olika åtgärder ger olika effekt över året

De olika energieffektiviseringsstrategierna ger olika effekt på byggnadsbeståndets energianvändning sett över året. Figur 3-3 presenterar den reduktion i fjärrvärmeanvändning som Sim 1-4 samt de optimerade fallen ger upphov till för år 2050 i jämförelse med Sim 0 (Underhåll) som här får tjäna som referens. Figur 3-

4 presenterar på motsvarande sätt resultat för fastighetsel för modellår 2050. Eftersom Sim 0 används som jämförelse gör det att detta fall i figuren uppvisar 0 i energibesparing även om det också i detta fall sker en effektivisering i jämförelse med nuvarande situation som tidigare redovisats.



Figur 3-3. Besparing i fjärrvärmeanvändning för Sim 1, 2, 3 och 4 samt för optimerade fall i förhållande till Sim 0 för år 2050.



Figur 3-4. Besparing i fastighetselanvändning för Sim 1, 2, 3 och 4 samt för optimerade fall i förhållande till Sim 0 för år 2050. Negativa värden innebär en större användning än för Sim 0.

Teknikåtgärderna, som förekommer i såväl de optimerade fallen och Sim 4 men som bäst avspeglas i Sim 1, ger i absoluta tal en ganska jämnt fördelad reduktion av fjärrvärmeanvändning över året. Detta innebär att reduktionen i förhållande till den totala fjärrvärmelasten relativt sett ger en något högre reduktion av mellan- och sommarlast än vinterlasten. Strategin utmärker sig genom att ge en hög fastighetselreduktion i förhållande till fjärrvärmereduktion i jämförelse med de övriga simulerade strategierna.

Värmåtervinningsåtgärderna i Sim 2 utmärker sig genom att ge stor reduktion av fjärrvärmeanvändningen, men samtidigt ge ökad användningen av fastighetsel (negativ "besparing" i Figur 3-4). Detta är en följd av att strategin baseras på frånluftsvärmepumpar och FTX system vilka kräver el för sin drift. Systemeffekten

av en sådan lösning, på exempelvis primärenergianvändning eller CO₂-utsläpp, är därför i hög grad beroende av hur elen produceras.

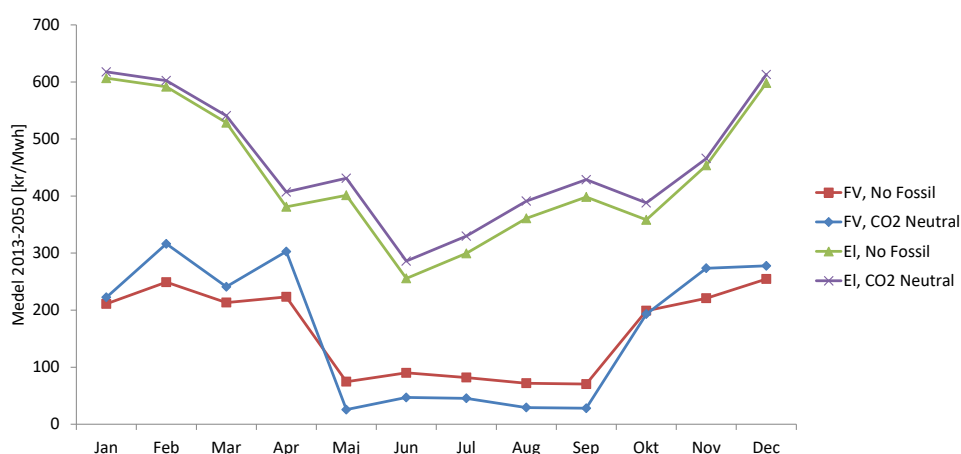
Solvärmeåtgärder i Sim 3, som här innebär solpaneler för tappvarmvatten (och inte exempelvis solceller för elproduktion), ger framför allt avtryck på byggnadsbeståndets värmeanvändning under sommarhalvåret. Detta är samtidigt den perioden med lägst total efterfrågan på fjärrvärme. Åtgärderna resulterar därför i en ökad skillnad mellan fjärrvärmebehovet mellan baslast/sommar och topplast/vinter.

Klimatskåtsåtgärderna i Sim 4 innehåller omfattande renoveringsåtgärder. Det ger en stor reduktion av fjärrvärmeanvändningen som också kopplar väl till lastkurvan över året (det vill säga störst reduktion då behovet är störst, och en minskad skillnad mellan baslast/sommar och topplast/vinter). Också för fastighetsel ger strategin en betydande besparing.

Underhållsåtgärderna, som inkluderas i Sim 0 såväl som övriga fall där överlapp mellan åtgärder inte finns (se avsnitt 2.3), inkluderar även detta lättare klimatskåtsåtgärder, framför allt fönsterbyte. Effekten över året av dessa åtgärder (som inte framgår i figuren) är jämförbar med Sim 4 men med mindre storlek på energibesparingen.

3.2.2 Högst energikostnader under vinterhalvår

När under året energieffektiviseringsåtgärder ger upphov till en besparing har betydelse för deras kostnadseffektivitet eftersom produktionen av el och värme ser olika ut. Figur 3.5 illustrerar hur marginalkostnaden, här som medelvärde för hela tidshorisonten (2013-2050), för fjärrvärme och el varierar över året under de förutsättningar som här antagits.



Figur 3-5. Månadsindelade medelmarginalkostnader för el och fjärrvärme för 2013-2050 (från Sim 0 – fall)

Marginalkostnaden för både fjärrvärme och el är i modelleringen betydligt högre under vinterhalvåret än under sommarhalvåret. Detta kopplar i sin tur till hur lasten varierar över året med en högre efterfrågan under vintern än sommaren och

den skillnad i effektbehov som följer av detta. En sparad kWh på vintern ger ur detta perspektiv därför ett högre värde än en sparad kWh på sommaren. Likaså är en sparad kWh el av högre värde än en sparad kWh fjärrvärme under de förutsättningar som här har antagits. I modellen finns det därför incitament för energieffektivisering när lasten är hög, och för eleffektivisering framför värmeeffektivisering. Den sammantagna kostnadseffektiviteten för en energieffektiviseringsåtgärd beror förstås även på investeringskostnaden för åtgärden.

4 Produktion i fjärrvärmesektorns – Resultat från TIMES_Malmö

I detta kapitel redovisas resultat från energisystemmodelleringen med TIMES_Malmö med fokus på produktion i fjärrvärmeverken.

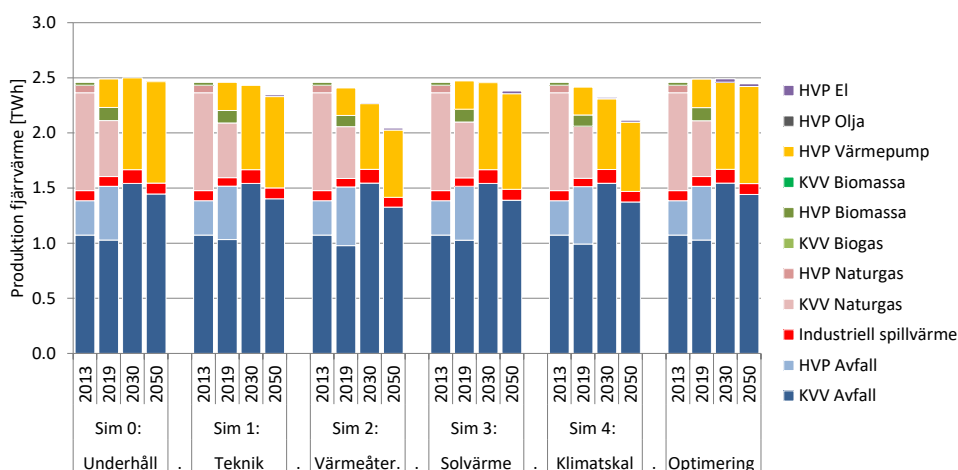
Fjärrvärmeproduktionssystemet påverkas av såväl stadens miljömål som av strategier för energieffektivisering. Hur stadens miljömål definieras har en betydande påverkan på vilka investeringar som visar sig kostnadseffektiva.

4.1 STADENS MILJÖMÅL PÅVERKAR FJÄRRVÄRMEN

På kortare sikt så är fjärrvärmeproduktionen låst till befintliga produktionsanläggningar, men på längre sikt kan förändringar ske genom nyinvesteringar. De kontrasterande miljömålen kring fossilfrihet (No Fossil) respektive CO₂-neutralitet (CO₂ Neutral) leder i TIMES_Malmö i olika riktningar.

4.1.1 Fossilfrihet ger högre andel värmepump

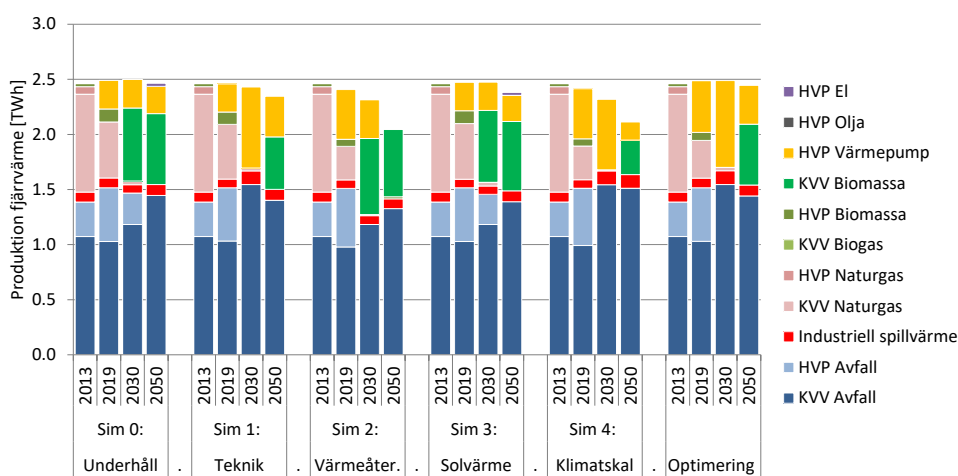
Fossilfrihet från 2030 (No Fossil) leder i modellresultaten till en utfasning av naturgaseldad kraftvärmeproduktion till förmån för värmeproduktion genom värmepump, se Figur 4-1. Detta är en utveckling som startar tidigt under den studerade perioden också innan kravet på fossilfrihet införs år 2030, och är alltså en trend som understöds också av nuvarande skatter och styrmedel. Också avfallskraftvärme visar kostnadseffektivitet och ökar i produktion under perioden medan avfallseldad hetvattenpanna minskar.



Figur 4-1. Fjärrvärmeproduktion för modellfall med fossilfrihet (No Fossil) som miljömål från 2030.

4.1.2 CO₂-neutralitet ger högre andel kraftvärme

Utvecklingen av fjärrvärmeproduktionssystemet med miljömål om CO₂-neutralitet från 2030 (CO₂ Neutral) är till en början, innan kravet införs, lik utvecklingen för fallen med "No Fossil"-målet. I det längre perspektivet, sker dock för samtliga fall nyinvestering i biokraftvärme som mellanlastproduktion. I slutet av perioden utgörs fjärrvärmeförsörjning framför allt av avfallskraftvärme, biokraftvärme, samt i varierande uträkning värmepump, se Figur 4-2.

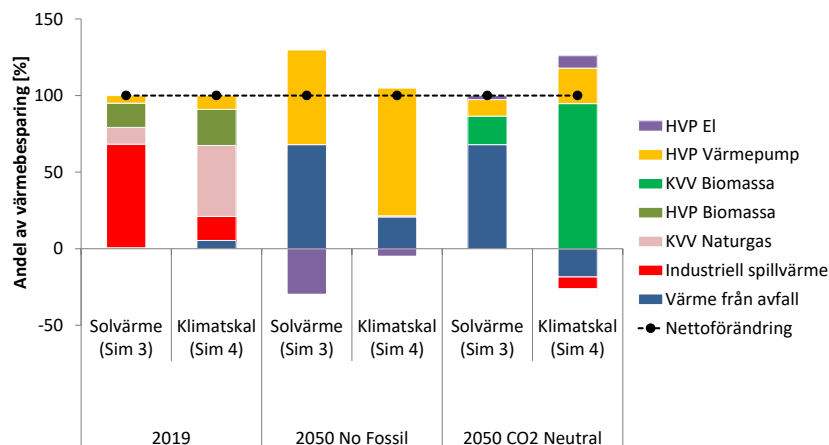


Figur 4-2. Fjärrvärmeproduktion för modellfall med CO₂-neutralitet (CO₂ Neutral) som miljömål från 2030.

4.1.3 Produktion förändras vid värmeeffektivisering

De olika renoveringspaketen påverkar byggnadernas energianvändning under olika delar av året. Därmed påverkas också olika typ av produktion i fjärrvärmesystemet. De två extremfallen i detta avseende är klimatskalspaketet och solvärmepaketet, vars effekter på fjärrvärmeproduktion tydliggörs i Figur 4-3. Som tidigare nämnts har klimatskalspaketet sin största besparing av fjärrvärmeförbrukning under årets kallare del, medan solvärmepaketet har sin största besparing av fjärrvärmeförbrukning under årets varmare del. Övriga renoveringspaket ger i stor utsträckning en blandning av effekterna som ses för dessa paket (se avsnitt 3.2.1).

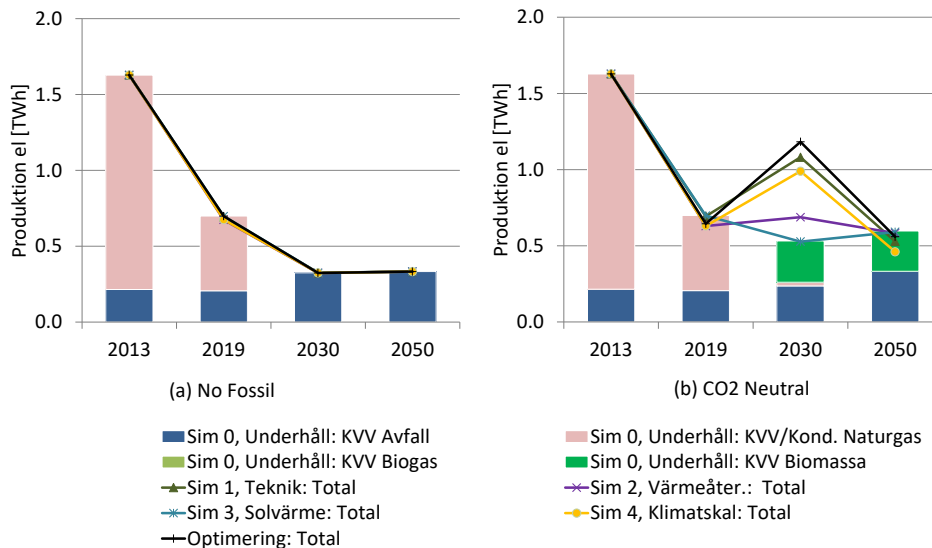
Solvärmepaketet i Sim 3 leder, i jämförelse med underhållspaketet i Sim 0, i stor utsträckning till en minskning av baslastproduktion såsom spillvärme och värme från avfallsförbränning. För Sim 4, klimatskalsåtgärder sker istället besparingen mellan- och topplastproduktion. I det kortare perspektivet ses framför allt en minskad naturgaskraftvärmeproduktion och, i det längre perspektivet, en minskad värmepumpsproduktion och en minskad biokraftvärmeproduktion för fossilutfasningsmålet (No Foss) respektive CO₂-neutralitetsmålet (CO₂ Neutral). Negativa värden i figuren avser ökad produktion i förhållande till Sim 0 (Underhåll). Här noteras att Sim 3 (Solvärme) i vissa fall ger upphov till en högre produktion från typisk topplastproduktion (el) medan Sim 4 (Klimatskal) i vissa fall ökar användningen av typisk baslastproduktion (avfallsvärme).



Figur 4-3. Typ av fjärrvärmeproduktion som påverkas av solvärme- (Sim 3) respektive klimatskalpaketet (Sim 4) i jämförelse med underhållspaketet (Sim 0). För 2019 är effekten likartad mellan miljömålsdefinitionerna (här visas resultatet för No Fossil).

4.2 ELPRODUKTIONENS UTVECKLING I FJÄRRVÄRMESEKTORN

Som en följd av utfasningen av naturgas ur fjärrvärmeproduktionssystemet minskar elproduktionen från under den studerade perioden i jämförelse med basåret 2013 för samtliga fall. Existerande kapacitet i naturgaskraftvärme nyttjas alltså inte i lika hög grad, se Figur 4-4.



Figur 4-4. Elproduktion i fjärrvärmesystemet för No Fossil och CO₂ Neutral i (a) respektive (b). Modellfall Sim 0 presenteras som staplar och övriga modellfall som punktlinjer.

4.2.1 Lägre elproduktion vid fossilutfasning

Miljömålsdefinitionen "No Fossil" ger förhållandevis låga incitamenten för kraftvärme vilket avspeglas i utvecklingen av den totala elproduktionen (Figur 4-4a). Detta eftersom elproduktion inte bidrar till att nå målet. Som en konsekvens av övergång från avfallsförbränning i hetvattenpanna till kraftvärme ökar dock elproduktionen från avfall under perioden. De olika strategierna för

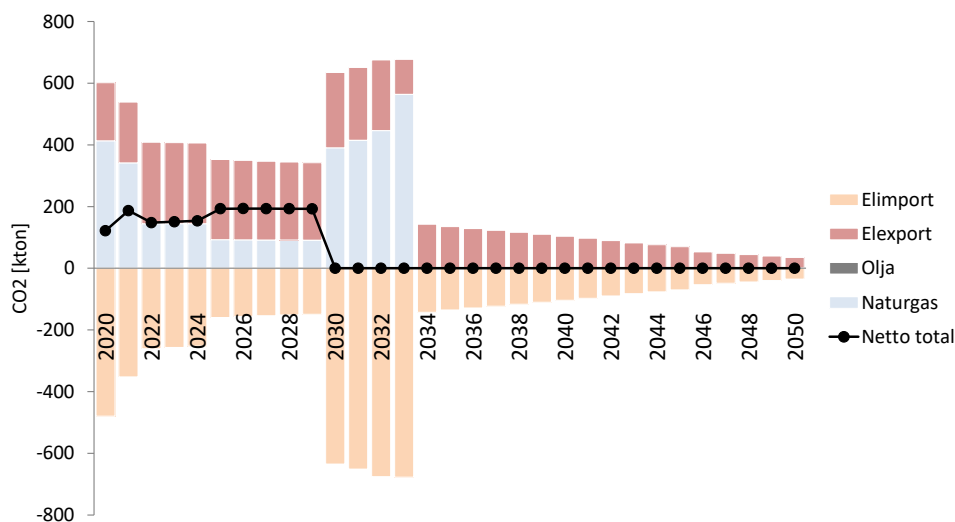
energieffektivisering ger endast en mycket liten påverkan på elproduktionen från systemet. Detta då annan produktion än kraftvärme påverkas av energieffektiviseringsåtgärderna.

4.2.2 Högre elproduktion för att nå CO₂-neutralitet

För miljömålsdefinitionen "CO₂ Neutral" (Figur 4-4b) har elproduktion en viktig roll för att klara uppsatta miljömål. Detta då elproduktion inom staden antas ersätta CO₂ på annat håll och därför bidrar till att nå CO₂ neutralitetsmålet.

För samtliga energieffektiviseringsstrategier går den långsiktiga trenden mot biokraftvärme. Vägen dit skiljer dock åt något mellan fallen. För vissa av fallen (Paket 4, Paket 1, och optimering) sker investeringen i biokraftvärme senare än för andra fall (Paket 0, Paket 2, Paket 3). Istället ses en period vid 2030 där den befintliga naturgaskraftvärmeanläggningen körs i kondensdrift för en del av året för att på så sätt ersätta annan fossil elproduktion utanför det studerade systemet (med högre CO₂ emissionsfaktor).

Figur 4-5 illustrerar CO₂-utsläppen för det optimerade fallet för "CO₂ Neutral" över den studerade perioden. Figuren visar hur elexport används för att kompensera CO₂-utsläpp kopplade till förbränning av fossila bränslen och elanvändning inom systemet, för att nå netto-noll utsläpp från år 2030.

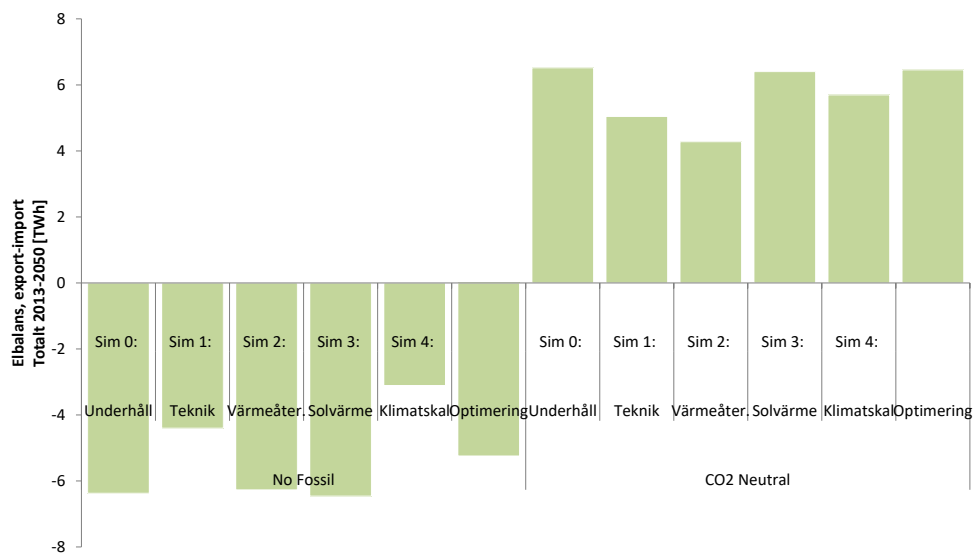


Figur 4-5. CO₂-utsläpp optimerat fall med miljömålet "CO₂ Neutral"

4.3 SKILLNADER I SYSTEMETS ELBALANS

Definitionen av stadens miljömål ger stora skillnader systemets elbalans. CO₂ neutralitetskravet (CO₂ Neutral) ger ett större fokus på elproduktion medan fossilfrihetskravet (No Fossil) ger ett mindre fokus på kraftvärme såväl som en större användning av el i fjärrvärmeproduktionen, framför allt för drift av värmepump. Den sammantagna effekten sett över hela den studerade perioden

blir att "CO₂ Neutral"-fallen visar ett nettoelöverskott medan "No Fossil"-fallen visar ett underskott (Figur 4-6).



Figur 4-6. Systemets elbalans (export – import) summerat över hela den modellerade perioden för respektive modellfall

5 Systemets energiprestanda och kostnad – Resultat från TIMES_Malmö

I detta kapitel redovisas resultat från energisystemmodelleringen med TIMES_Malmö med fokus på systemets totala energiprestanda och kostnad. Resultaten visar att energieffektiviseringsåtgärder kan leda till såväl minskad primärenergianvändning som minskade systemkostnader. Detta är dock inte alltid fallet, utan det är viktigt att ta hänsyn till lokala förutsättningarna i såväl byggnadsbeståndet som i fjärrvärmeproduktionssystemet.

5.1 SYSTEMKOSTNAD OCH BYGGNADSBESTÅNDETS ENERGIPRESTANDA

En minskad energianvändning i slutanvändarledet innebär inte alltid en minskad kostnad ur ett systemperspektiv. Investeringskostnaderna för energieffektiviseringsåtgärder kan i vissa fall innebära att investeringen inte sparas in i minskade energikostnader. Ur ett fjärrvärmeperspektiv kan lokal tillgång till billig värmeproduktion bidra till att värmebesparingsåtgärder ur ett systemperspektiv blir förhållandevis mindre ekonomiskt fördelaktigt.

5.1.1 Energieffektivitet och kostnadseffektivitet

Figur 5-1 illustrerar den specifika energianvändningen per m² i byggnadsstocken (värme och fastighetsel) för de olika modellfallen och den totala systemkostnaden uttryckt som merkostnad gentemot Sim 0 (Underhåll).

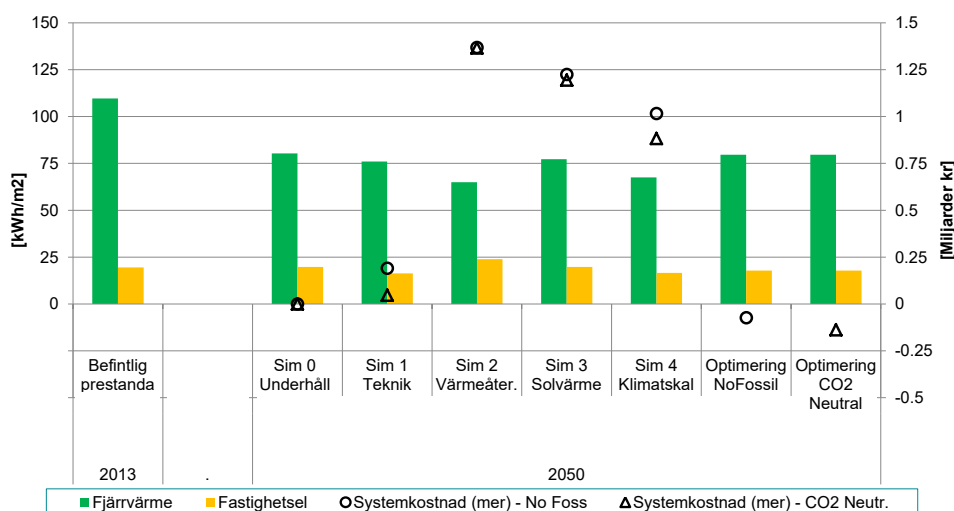


Fig. 5-1. Genomsnittlig energiprestanda i byggnadsbeståndet uppdelat på användning av fjärrvärme och fastighetsel per uppvärmd golvyta, samt total (diskonterad) systemkostnad som merkostnad gentemot Sim 0.

De optimerade fallen ger, som väntat, de lägsta systemkostnaderna då dessa fall innehåller minst restriktioner i modellen. Här väljer modellen fritt det

renoveringspaket som ger lägst kostnad i respektive byggnadsarketyp. I övriga fall begränsas modellen till att bara använda ett renoveringspaket, vilket medför merkostnader. Energieffektiviseringsåtgärder bör således väljas utifrån egenskaperna i de specifika byggnaderna eller byggnadstypen.

Som framgår av figuren sker en minskning av energianvändningen i byggnadsbeståndet för samtliga fall i jämförelse med befintligt bestånd 2013. För de modellerade fallen innebär Sim 4 med klimatskalsåtgärder den största energibesparingen i byggnadsledet. Trots att klimatskalspaketet har den högsta investeringskostnad (se avsnitt 2.3) ger Sim 4 (Klimatskal) lägre systemkostnader än både Sim 2 (Värmeåtervinning) och Sim 3 (Solvärme). Sim 2 medför en högre kostnad framför allt på grund av en ökad fastighetselanvändning. Sim 3 medför högre kostnader dels på grund av att värmebesparingen är förhållandevis liten och dels på grund av att det framför allt är billig baslastproduktion som ersätts i fjärrvärmesystemet. Sim 1 medför låga kostnader, mycket på grund av en låg investeringskostnad och en förhållandevis stor minskning av användningen av fastighetsel.

Som tidigare nämnts innebär CO₂-neutralitetsmålet (CO₂ Neutral) incitament för elproduktion. På motsvarande sätt innebär målet incitament för reduktion av elanvändning i högre utsträckning än fossilfrihetsmålet (No Fossil). Detta indikeras i Figur 5-1 genom att Sim (1), Sim (4) och optimerade fall, vilka samtliga innehåller åtgärder som sänker elanvändningen, ger en lägre merkostnad för "CO₂ Neutral" än för "No Fossil".

5.1.2 Dyrare med CO₂-neutralitet och att gå före

Det innebär en merkostnad för systemet att möta CO₂ neutralitetskravet (CO₂ neutral) i jämförelse med att möta fossilfrihetskravet (No Fossil). För de optimerade fallen är den ökade systemkostnaden ca 0,5 miljarder SEK för den studerade perioden som helhet, se Figur 5-2.

Att låta staden ha mer ambitiösa klimatmål än omgivningen innebär också en högre systemkostnad. Att introducera mål för staden från år 2030 istället för att endast förhålla sig till styrmedel och energipriser (som bestäms utanför "systemgränsen") leder för de optimerade fallen till en merkostnad för systemet på 1,3 miljarder SEK för "No Fossil" och 1,8 miljarder SEK för "CO₂ Neutral" (Figur 5-2).

Liksom övriga systemkostnader som härrör från modellens beräkningar tas här endast hänsyn till de direkta energi- och teknikkostnader som representeras i modellen, och inte de potentiella nyttor som på olika sätt kan komma till gagn för staden genom att "gå före" i klimatomställningen (såsom positiv påverkan på varumärke, ökad attraktionskraft, m.m.).

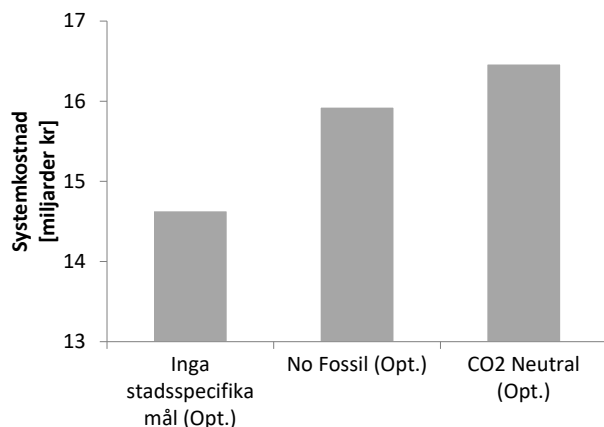


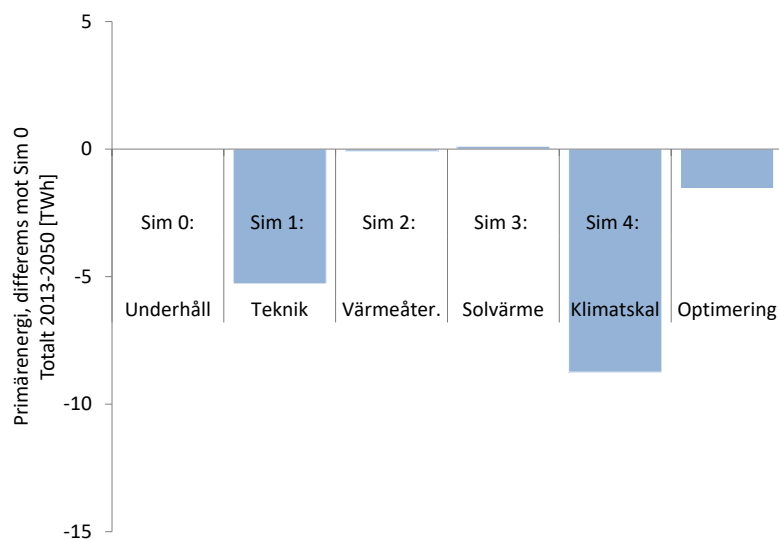
Fig. 5-2. Total systemkostnad (diskonterat nuvärde) för de optimerade fallen med fossilfrihetskrav (No Fossil) och CO₂ neutralitetskrav (CO₂ Neutral) samt för ett fall utan stadsspecifika krav.

5.2 TEKNIK- OCH KLIMATSKALSÅTGÄRDER GER MINSKAD PRIMÄRENERGIANVÄNDNING

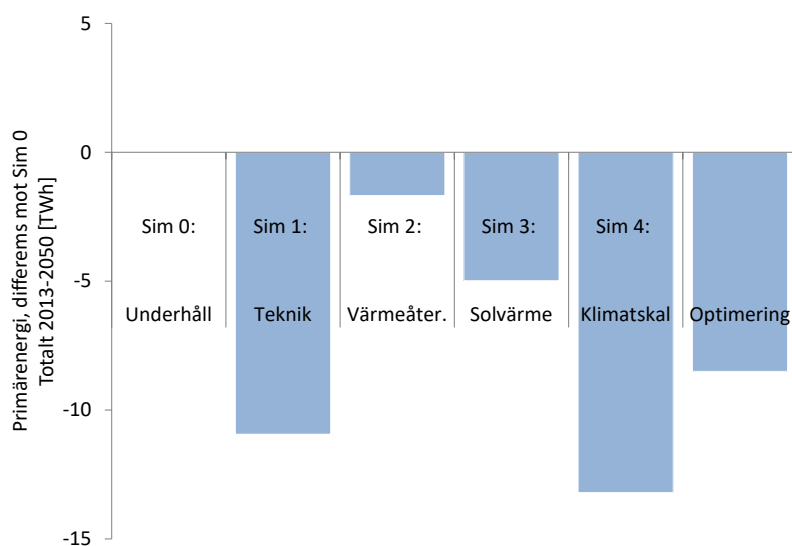
I jämförelse av primärenergianvändning för systemet som helhet kan utfallet bli ett annat än vid jämförelse mellan total slutlig energianvändning i byggnadsbeståndet. I Figur 5-3 presenteras skillnad i total primärenergianvändning (summerat för hela perioden) för Sim 1-4 och optimerade fall i jämförelse med Sim 0 (Underhåll).

Ökad elanvändning såväl som minskad elproduktion ger en relativt stor påverkan på primärenergianvändningen. Likaså ger en minskning av mellan-, och topplastproduktion i fjärrvärmeproduktionssystemet en högre effekt på primärenergianvändning än en minskning av baslastproduktion som till stor del är baserad på avfallsförbränning och spillvärme (vilka här har antagits ha låga primärenergifaktorer, se Bilaga E).

Klimatskalsåtgärderna i Sim 4 ger sett över hela perioden den största minskningen i primärenergianvändningen. Sim 1 (Teknik) ger den näst största minskningen. Sim 2 (Värmeåtervinning) ger, i jämförelse med övriga fall, en förhållandevis mindre besparing än vad som ses när slutlig energianvändning i bostadsbeståndet jämförs. Detta beror mycket på den ökade elanvändningen för fallet. Sim 3 (Solvärme) ger också en förhållandevis liten besparing på grund av att en förhållandevis stor del av besparingen sker i fjärrvärmesystemets baslastproduktion.



(a) No Fossil



(a) CO2 neutral

Figur 5-3. Skillnad i total primärenergianvändning (summerat för hela perioden) för Sim 1-4 och optimerat fall i jämförelse med underhållsåtgärder (Sim 0).

6 Diskussion och slutsatser

I denna studie har en integrerad syn på produktionssidan och användarsidan i en stads fjärrvärmesystem använts för att undersöka kostnadseffektiva vägar för att nå framtida miljömål. Studiens insikter diskuteras i detta kapitel.

I studien används ett modellbaserat angreppssätt för en integrerad analys av produktions- och användarsidan i en stads fjärrvärmesystem. Malmö stads fjärrvärmesystem och byggnadsstock har använts som studiefall. För analysen utvecklas TIMES_Malmö-modellen, vilket är en ny applikation av den internationellt väl etablerade TIMES-modellen. Analysens geografiska fokus på stadsnivå möjliggör att hänsyn kan tas till lokala förutsättningar, t.ex. avseende byggnadsbeståndets sammansättning.

I studien kontrasteras två typer av tänkbara miljömålsdefinitioner för en stad som vill gå före i klimatomställningen. Resultaten av modellanalysen visar att definitionen av en stads miljömål har en betydande påverkan på vilka teknikval och investeringar som är kostnadseffektiva i systemet. Studien illustrerar vidare att ett systemperspektiv där också stadens påverkan på utsläpp uppströms och nedströms den egna stadens gränser komplicerar analysen av effekterna av miljömålen. Särskilt blir antagande om marginalelens inverkan är viktig.

Ur ett fjärrvärmebolags perspektiv finns det några resultat som särskilt kan påpekas. Fjärrvärmebehovet ligger för studiens "optimerade" fall kvar ungefär på dagens nivå under hela den studerade perioden. Den antagna nybyggnationen (och nyanslutning till fjärrvärme) under perioden uppväger därmed den nedgång i fjärrvärmebehov som annars kunde förväntats från den ökade energieffektiviteten i byggnadsbeståndet. För vissa av studiens "simulerade fall" sker en mer omfattande effektivisering av byggnadsenergibehovet vilket ger en tydlig minskning av fjärrvärmebehovet. En sådan utveckling uppvisar emellertid högre systemkostnader än den effektiviseringsnivå som sker i de optimerade fallen.

Studiens testade energieffektiviseringsstrategier i bostadsbeståndet har i modellresultaten en förhållandevis begränsad påverkan på vilken typ av teknikval som visar kostnadseffektivitet i fjärrvärmeproduktion. Vilken miljömålsdefinition som antas för staden har i detta avseende en större inverkan. Mål om "fossilfrihet", som fokuserar på minskning av fossila bränslen inom staden, leder i modellresultaten till en hög andel värmepumpar i fjärrvärmeproduktionen. Mål om "CO₂-neutralitet", som tar hänsyn till effekter på elsystemet i det för staden omgivande systemet (marginalel), gynnar istället en högre andel kraftvärmeproduktion i fjärrvärmeproduktionen.

Från ett byggnadsperspektiv dras slutsatsen att energieffektiviseringsåtgärder som minskar elanvändning och värmeanvändning då den totala efterfrågan är hög ger fördelar ur ett systemperspektiv. Perioder med högre last (den kallare delen av året) ger högre marginalkostnader för fjärrvärmeproduktionen. Ur ett systemperspektiv är därför incitamenten för minskad fjärrvärmeanvändning högst

under höglastperioder. Eftersom marginalkostnaderna för el, i de modellerade fallen, är högre än för fjärrvärme, finns från detta perspektiv motivation för en förhållandevis hög effektivisering av elanvändning.

Resultaten visar vidare att enklare teknikåtgärder för energieffektivisering ofta visar samhällsekonomisk kostnadseffektivitet. Studiens ”teknik-paket”¹ har förhållandevis låga investeringskostnader, men ger ett bra utbyte i effektivisering inte minst avseende fastighetselanvändning. Omfattande klimatskåtgärder ger större energibesparing och har flera fördelar ur ett systemperspektiv, med bl.a. en stor besparing av fjärrvärmeanvändning under årets kallare delar. Åtgärderna medför emellertid en högre systemkostnad än teknikpaketet på grund av de förhållandevis höga investeringskostnaderna. Modellerade solvärmeåtgärder ger i hög utsträckning en besparing av fjärrvärmens baslastproduktion vilket ger begränsade fördelar ur systemperspektivet. För värmeåtervinning (främst frånluftsvärmepumpslösningar) uppmärksammar resultaten vikten av att en ökad fastighetselanvändning kan ge negativa konsekvenser ur ett systemperspektiv även om värmeeffektivisering är hög.

Resultaten från modelleringen kan visa på övergripande och generella inriktningar för kostnadseffektivitet, men kan givetvis inte fånga specifika förutsättningar i enskilda fastigheter. Trots att studien från ett systemmodellperspektiv har en noggrann upplösning av byggnadsarketyper och energieffektiviseringsåtgärder, så är representationen självfallet mycket grov i förhållande till verkligheten. Det kan således mycket väl finnas nischmöjligheter också för lösningar som inte faller ut som kostnadseffektiva under de förutsättningar som gäller i den här gjorde modelleringen.

I modellen är renoveringsåtgärder grupperade i paket av flera anledningar. Renoveringsåtgärder genomförs ofta flera åt gången av praktiska och ekonomiska skäl och eftersom en del åtgärder inte är additiva så spelar det roll vilka åtgärder som simuleras tillsammans. Att simulera åtgärdspaket istället för enskilda åtgärder bidrar också till en bättre hanterbarhet och mer överskådliga resultat. Det finns dock även svagheter med att simulera åtgärdspaket, t.ex. kan det uppstå trappstegseffekter mellan de olika paketen vilket kan leda att vissa åtgärder enligt modellen inte blir kostnadseffektiva för att skillnaden i investeringskostnad blir för stor. Detta problem kan begränsas genom att modifiera paketen så att trappstegseffekten minskar. I vidareutveckling av modellen skulle representationen av tekniska möjligheter kunna förfinas.

Ur ett kostnadsperspektiv kan det påpekas att modellen inte tar hänsyn till olika aktörer inom systemgränsen av det modellerade systemet.

Energieffektiviseringsåtgärder görs i modellen bara i den mån det sänker totalkostnaden för systemet. Beroende på i vilken grad prissättningen av fjärrvärme följer kostnadsbilden för fjärrvärmeproduktion kan incitamenten för energieffektivisering i verkligheten se annorlunda ut än i modellresultaten.

¹ Paketet innehåller följande åtgärder: byte till LED för fastighetsbelysning, installation av närvarostyrning för fastighetsbelysning, byte av termostater till radiatorer, injustering av värmesystemet, ventiler och termostater, byte till frekvensstyrda vattenpumpar, byte till snålspolande armaturer (vattenblandare), byte till frekvensstyrda fläktar, samt injustering av ventilationsflöden

Modellen ger en kostnadsbild för fjärrvärme som avspeglar produktionskostnaden. I verkligheten kan andra faktorer spela in i fjärrvärmens prissättning, och det kan ge andra incitament för energieffektivisering för fastighetsägare. En fjärrvärmeprissättning som ligger högre än produktionskostnaden ger ett högre incitament för energieffektivisering än vad som blir fallet i modellen. För att leda mot ett, ur samhällsperspektiv, kostnadsoptimalt utfall bör prissättningen av fjärrvärme således följa kostnadsbilden för fjärrvärmeproduktion. Vad som är kostnadseffektivt med en vidare systemgräns är alltså inte nödvändigtvis detsamma som är kostnadseffektivt ur olika aktörers perspektiv.

Projektet har bidragit med viktig utveckling kring dynamisk, långsiktig och integrerad analys av fjärrvärmens framtida roll. Få dynamiska energisystemmodeller har applicerats på stadsnivå i Sverige, och ännu färre (om någon) av dessa har använt ett liknande integrerat perspektiv på tillförsel- och användarsidan i ett lokalt fjärrvärmesystem.

I ett fortsatt arbete och vidare analys kan ett flertal aspekter studeras vidare. TIMES_Malmö-modellen kan utvecklas vidare och dess modellstruktur kan även appliceras på andra städer för att få en bättre förståelse för generaliserbarheten i resultaten. Annan storlek på staden och dess värmebehov, annan sammansättning av byggnadsbeståndet och andra befintlig fjärrvärmekapacitet är exempel på faktorer som kan påverka resultaten. Likaså kan scenarioanalysen utvecklas med flera fall för att bättre undersöka resultatens robusthet mot omvärldsförändringar.

Referenser

- BeBo, 2015. Databas från BeBo. Energimyndighetens beställargrupp för energieffektiva bostadshus, Stockholm. Mer info på: <<http://www.bebostad.se/>>
- Boverket, 2010. Energi i bebyggelsen – tekniska egenskaper och beräkningar – resultat från projektet BETSI. Boverket, Karlskrona.
- Boverket, 2015. GRIPEN – Boverkets register över energideklarationer. Utdrag för Malmös kommun den 2015-07-01. Boverket, Karlskrona.
- Boverket, 2016. BBR – Boverkets byggregler. Tillgänglig på: <<http://www.boverket.se/sv/lag--ratt/forfattningssamling/gallande/bbr---bfs-20116/>>
- Danish Energy Agency and Energinet.dk. 2012. Technology data for energy plants. Tillgänglig på: <https://www.energinet.dk/SiteCollectionDocuments/Danske%20dokumenter/Forskning/Technology_data_for_energy_plants.pdf>
- Energimyndigheten, 2015. Energiläget 2015. Energimyndigheten, Eskilstuna.
- Energimyndigheten 2016, Utformning av energieffektiviseringsmål – Kunskapsunderlag och analys av målkonstruktioner, Energimyndighetsrapport ER 2016:27, Eskilstuna.
- Energimyndigheten och Boverket, 2013. Förslag till nationell strategi för energieffektiviserande renovering av byggnader - Gemensamt uppdrag Energimyndigheten och Boverket. Energimyndigheten rapport ET2013:24 och Boverket rapportnummer: 2013:22.
- E.ON, 2016. Data för produktion och användning om fjärrvärme i Malmö. Personlig kommunikation.
- Equa Solutions, 2016. IDA ICE. 4.7 ed. < www.equa.se/se/ida-ice>
- Erlandsson, M., Holm, D., 2015. Livslängdsdata samt återvinningsscenario för mer transparenta och jämförbara livscykelberäkningar för byggnader. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2229, Stockholm.
- ETSAP, 2017. The Energy Technology Systems Analysis Program. Tillgänglig på: <<https://iea-etsap.org/>>
- EU, 2010. EPDB II, Om byggnaders energiprestanda (omarbetning). Europaparlamentets och rådets direktiv 2010/31/EU, 19/5-2010, Europeiska unionens officiella tidning 18/6-2010, L 153/13-35.
- EU, 2012. EED, Om energieffektivitet, om ändring av direktiv 2009/125/EG och 2010/30/EU och om upphävande av direktiven 2004/8/EG och 2006/32/EG. Europaparlamentet och rådets direktiv 2012/27/EU, 25/10-2012, Europeiska unionens officiella tidning, 14/11-2012, L 315/1-56.

- Europeiska kommissionen, 2007. Communication from the commission to the council and the European parliament – An energy policy for Europe. COM(2007) 1 final, SEC(2007) 12.
- Europeiska kommissionen, 2010. Europa 2020. En strategi för smart och hållbar tillväxt för alla”, meddelande från kommissionen, KOM(2010) 2020 slutlig. Bryssel den 3/3-2010.
- Europeiska kommissionen, 2013. Genomförande av direktivet om energieffektivitet – vägledning från kommissionen”, meddelande från kommissionen till europaparlamentet och rådet, COM(2013) 762 final. Bryssel den 6/11-2013.
- Europeiska kommissionen, 2014a. On resource efficiency opportunities in the building sector”, communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions, COM(2014) 445 final. Brussels, 1/7-2014.
- Europeiska kommissionen, 2014b. En klimat- och energipolitisk ram för perioden 2020–2030”, Meddelande från kommissionen till europaparlamentet, rådet, europeiska ekonomiska och sociala kommittén samt regionkommittén, COM(2014) 15 final. Bryssel den 22/1-2014.
- Europeiska kommissionen, 2016. Europeiska kommissionen, Putting energy efficiency first: consuming better, getting cleaner, MEMO/16/3986. Bryssel den 30/11- 2016
- Gode, J., Martinsson, F., Hagberg, L., Öman, A., Höglund, J., Palm, D., 2011. Miljöfaktaboken 2011: Uppskattade emissionsfaktorer för bränsle, el, värme och transporter. Värmeforsk rapport 1183, Stockholm.
- Göransson, A., Sköldberg, H., Unger, T., Wahlström, Å., Filipsson, P., Sundström, T., 2013. Reglerna för nära-nollenergihus – konsekvenser av olika formuleringar av energikraven. Svensk Fjärrvärme, Fjärrsyn rapport 2013:18. Stockholm.
- IMF, 2015. World Economic Outlook Database. International monetary fund. Tillgänglig på:
<<https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2015/01/weodata/index.aspx>>
- IVT, 2016. Data om solfångare. Personlig kommunikation.
- Krook-Riekkola, A. (2015). National Energy System Modelling for Supporting Energy and Climate Policy Decision-making: The Case of Sweden. PhD Thesis, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Sweden.
- Krook-Riekkola, A. (2016). Klimatmålsanalys med TIMES-Sweden: Övergripande klimatmål 2045 i kombination med sektormål 2030. Bilaga 12 i 'En klimat- och luftvårdsstrategi för Sverige, del 2 bilaga med underlagsrapporter', SOU 2016:47.
- Loulou, R., Goldstein, G., Kanudia, A., Lehtila, A. and Remne, U., 2016. Documentation for the TIMES Model-Part 1. Tillgänglig på <<https://iea-etsap.org/index.php/documentation>>

- Martinsson, F., Krook-Riekkola, A., Lindblom, J., Wråke, M., 2014. Modelling the Swedish residential and service sectors in TIMES: a feasibility study. IVL Swedish Environmental Research institute, IVL report B2191, Stockholm.
- Nohlgren, I., Herstad Svärd, S., Jansson, M., Rodin, J., 2014. El från nya och framtida anläggningar 2014, Elforsk, Stockholm.
- NER and IEA, 2016. Nordic Energy Technology Perspectives 2016. IEA, Paris. Tillgänglig på <www.iea.org/etp/nordic> , <www.nordicetp.org>
- REPAB, 2012. REPAB Fakta Underhållskostnader 2012:[mark, bygg, måleri, installationer], Repab fakta, Incit, Mölndal.
- REPAB, 2013. REPAB Fakta Underhållskostnader 2013:[mark, bygg, måleri, installationer], Repab fakta, Incit, Mölndal.
- SCB, 2016. Kommunal statistik. Statistiska centralbyrån. Tillgänglig på <www.scb.se>
- SOU, 2016. En klimat- och luftvårdsstrategi för Sverige. SOU2016:47. Miljö- och energidepartementet, Stockholm.
- UNDESA, (2014). World Urbanization Prospects: The 2014 Revision. Tillgänglig på: <<http://esa.un.org/unpd/wup/>>
- Wikells, 2016. Wikells kalkylprogram Stationsdata. Mer info på: <http://www.wikells.se/kalkylprogram.aspx>

Bilaga A: Indelning av arketyper

A.1 INDELNING AV ARKETYPER I MALMÖ

Vid indelning av bostäder (småhus och flerbostadshus) har vi använt totalt kalkylerade antal lägenheter från SCB kommunala statistik, d.v.s. samtliga byggnader oavsett uppvärmningsteknik. Dessa data används för att skala upp statistiken från GRIPEN-registret till kommunalt heltäckande statistik används SCB. Uppskattningsvis 58 % av flerbostadshusen och 28 % småhusen med fjärrvärme finns med i energideklarationsregistret för Malmö kommun.

För varje arketyp har ett antal statistiska medelvärden från GRIPEN-registret använts för att approximera den totalt uppvärmda arean per lägenhet/hus och energibehovet uppdelat på fjärrvärme för uppvärmning och tappvarmvatten samt fastighetsel. Från GRIPEN finns statistik på andel av varje arketyp som är anslutna till fjärrvärme. Vi har även hämtat statistiska medelvärden för de geometriska egenskaper som antal våningar, byggnadens bas-area med mera. För varje arketyp finns även uppgifter om andra typer av uppvärmningssystem som används i fjärrvärmeuppvärmda byggnader. Nedan visas proceduren som använts för att generera uppvärmd area och energibehov per byggnadsarketyper;

Steg 1. Ta fram genomsnittlig uppvärmd area per lägenhet inom varje arketyper – medelvärden per arketyper från GRIPEN-registret.

Steg 2. Approximera den totalt uppvärmda arean per arketyper genom att multiplicera med output från steg 1 med SCBs kalkylerade antal lägenheter (Flerbostadshus och småhus inom varje årtioende)

Steg 3. Multiplicera andel av totala uppvärmda golvarean inom varje arketyper som är ansluten till fjärrvärme (GRIPEN) med den totalt beräknade i Steg 2 och för att få den totalt fjärrvärmeuppvärmda golvarean.

Steg 4. Sammanställ genomsnittlig levererad fjärrvärme per kvadratmeter per arketyper.

Steg 5. Jämför beräknad fjärrvärme (intensitet * area) med den som E. ON redovisat

Metoden för indelning skiljer sig något åt för lokaler (kontor, skola, vård, handel, hotell och restaurang) jämfört med bostäder eftersom dessa inte delas in efter byggnadsperiod. En annan skillnad jämfört med bostäder är "viktningsfaktorn" som används för att skala upp till en kommunalt heltäckande uppvärmd golvarean. Där har vi använt oss av andelen fjärrvärme som finns med i GRIPEN relativt det som E. ON rapporterat. Det är ca 75 % av fjärrvärmebehovet för lokaler som finns med i GRIPEN registret.

A.2 DATAKÄLLOR

Energideklarationsregistret - GRIPEN

GRIPEN är Boverkets register över energideklarationer. I registret finns uppgifter om samtliga byggnader i Sverige som har energideklarerats enligt lagen om energideklarationer. En energideklaration ska utföras var tionde år för de byggnader som omfattas av lagen. För småhus gäller dock att den ska utföras enbart vid försäljning och inom två år efter nybyggnad. Det samma gäller även för fastigheter som ägs och brukas av samma företag. Det är följaktligen inte ett heltäckande register över alla byggnader. I registret finns uppgifter om typ av byggnad, byggår, energiprestanda uppdelad på olika typer av slutanvändning, kombinationer av använda uppvärmningssystem med mera.

Inom detta projekt har vi fått tillgång till register för Malmö kommun av Boverket.

SCB och Energimyndigheten

På kommunalnivå har SCB delat in byggnadsbeståndet i ålderskategorier (Tabell A.1). Från och med 2010 tas bostadsbeståndet fram med en ny metod. Antal lägenheter hämtas från fastighetstaxeringsregistret (FTR) varje år. Kalkylerat antal lägenheter i flerbostadshus och småhus kan användas för att approximera den totala uppvärmda arean om en genomsnittlig storlek på lägenheter används.

Energimyndighetens indelning på nationell nivå (alternativt per klimatzon) skiljer sig något från SCB kommunal statistik, där den äldsta kategorin är byggnader byggda före 1940 och nästa steg innefattar 1940-1960 medan SCB har byggnader före 1930.

I SCB kommunala statistik finns ingen uppdelning på hur stor andel av arean som är uppvärmd av olika uppvärmningstekniker². Denna uppgift har även jämförts med uppgifter från E.ON Värme.

Tabell A.1. Tillgänglig indelning av typhus och ålderindelning för kalkylerat antal lägenheter byggnadsbeståndet enligt SCB kommunala statistik.

Småhus	Flerbostadshus	Lokaler ³
före 1930	före 1930	Finns ej på kommunal nivå
Varje kommande årtioende	Varje kommande årtioende	

E. ON Värme

Från E. ON värme har vi fått totalt levererad fjärrvärme till de olika huvudbyggnadstyperna, småhus, flerbostadshus och servicesektorn. Dess uppgifter har använt för att verifiera hur bra vår indelning i slutändan matchar denna statistik. För lokaler har vi också använt för att vikta hur stor andel av lokalerna som finns representerade i GRIPEN jämfört med de faktiska i Malmö stad.

² Däremot finns totalt levererad energi från olika energislag till flerbostadshus och småhus

³ Lokalarea finns ej på kommunalnivå i SCB däremot finns denna statistik på tätortsnivå.

Bilaga B: Energisimuleringar för byggnader

I denna bilaga beskrivs byggnadssimuleringarna mer ingående, vad som har gjorts och vissa nyckeltal som beskriver arketypernas prestanda.

B.1 SIMULERADE ARKETYPER

De arketyperna som har störst genomslag i statistiken har simulerats med hjälp av energisimuleringsprogram IDA ICE. Resterande arketyper har konstruerats ur resultaten från de simulerade arketyperna. Kortfattad indata om de arketyper som simulerats presenteras i Tabell B1.

Ett viktigt antagande är att grundmodellerna för de arketyper som renoveras har simulerats som genomsnittsbyggnader för den tidsperiod de representerar, de är alltså inte faktiska exempelbyggnader. Anledningarna till detta är flera, dels behövde data GRIPEN-registret klassificeras på något sätt för att minska hanteringstiden och dels behövde registret kunna synkroniseras mot resultaten från BETSI-projektet.

Tabell B1. Exempel på indata för energisimuleringar för byggnader

	FH 1950-tal	FH 1960-tal	FH 1970-tal	FH nybygg BBR/Lågenergi	LOK befintliga	LOK BBR/ Lågenergi
U _{medel}	0,85	0,81	0,76	0,42 / 0,26	0,93	0,72 / 0,39
U _{fönster}	2,8	2,8	2,8	1,1 / 0,7	2,9	1,9 / 0,7
U _{vägg}	0,54	0,57	0,40	0,27 / 0,14	0,53	0,43 / 0,13
U _{tak}	0,33	0,33	0,20	0,33 / 0,11	0,36	0,11 / 0,11
U _{golv}	0,40	0,28	0,28	0,13 / 0,13	0,19	0,13 / 0,13
Ventilation	Självdrag	Frånluft	Frånluft	FTX 80 %	FTX 60 %	FTX 65 % / 85%
Window /envelope	17,3 %	14,8 %	15,4 %	16,4 %	24,6 %	29,2 %
Övrigt					Kylmaskin COP 2,5	Kylmaskin COP 2,5

B.2 SIMULERINGSSTRATEGI

Varje arketypp av den befintliga byggnadsstocken har simulerats i enlighet med nuvarande energiprestanda samt med fem åtgärds paket, vilka presenteras nedan.

Fastighetsunderhåll (Paket 0)

Paketet innehåller byte av fönster till branschstandard. U-värde 1,1 och g-värde 0,6 (simulerat med g=0 för att inte överskatta solinstrålningens påverkan). Detta fönsterbyte ingår i alla resterande åtgärds paket (förutom paket 4 i vilket ett annat fönsterbyte antas).

Tekniska installationer (Paket 1)

Ventilationen injusteras till 0,35 l/s, m² för flerfamiljshus och till 1,3 l/s, m² för kontor. Grundflödet beror på arketyper. Fönstret är det samma som i paket 0, men g-värdet simuleras nu som g=0,25 för att återge energibesparing av byte av termostater och injustering av värmesystemet som uppskattas till cirka 10 % av värmebehovet. Fastighetselen uppskattas kunna halveras. Detta görs genom att gamla pumpar och ventiler byts till nya med frekvensstyrning samt att all fastighetsbelysning byts till LED med närvarostyrning. Energibesparingen omfattar inte kylmaskin och värmepump. Snålspolande armatur i kök och badrum uppskattas minska behovet av tappvarmvatten med 20 %.

Värmeåtervinning (Paket 2)

Paketet innehåller installation av antingen FTX eller FVP. FTX installeras i alla arketyper där FT eller FTX är det mest frekventa ventilationssystemet enligt statistiken i GRIPEN samt vid all nybyggnation. Verkningsgrad på FTX är uppskattad till cirka 80 %. FVP installeras i de arketyper där självdrag eller frånluft är vanligast. FVP (luft/vatten) kopplas till tappvarmvattenkretsen och kan leverera till värmekretsen vid behov. COP-värde 3 antas för FVP.

Solvärme (Paket 3)

Paketet innehåller installation av solvärmepaneler vilka är dimensionerade för att täcka cirka halva tappvarmvattenbehovet på årsbasis. En ackumulatortank för att täcka ett dygns behov inkluderas med en uppskattad värmeförlust på 30 %.

Klimatskal (Paket 4)

Paketet innehåller huvudsakligen klimatskalsförbättrande åtgärder. Vind och fasad tilläggsisolerar med 40 cm respektive 15 cm mineralull. Fönster byts till "state-of-the-art" med U-värde 0,6, g-värde 0,5 för bostäder och U-värde 0,7, g-värde 0,3 för kontor. I paket 4 ingår också åtgärderna från paket 1.

Nybyggnation

Nybyggnation har simulerats med två olika nivåer av energiprestanda, i enlighet med Boverkets byggregler (BBR22) klimatzon 4 samt med en antagen framtida lågenergiprestanda (med viss hänsyn tagen till Boverkets förslag till definition av nära-nollenergi-byggnad (Boverket, 2015b), se Tabell B2.

Tabell B2. Antagna prestandakrav för energi nybyggnation

Prestandakrav för energi och effekt i	Krav på max specifik energianvändning [kWh/m ² A _{temp} , år]	U-medelvärde [kWh/m ² A _{temp} , år]	Kommentar
Flerbostadshus – BBR 22	75	0,40	Klimatzon IV
Flerbostadshus – Lågenergi	55	-	
Kontor – BBR 22	65	0,60	Klimatzon IV
Kontor - Lågenergi	50	-	

Tillägg med $70 \cdot (q_{medel} - 0,35)$ får enligt BBR22 göras för lokaler, där q_{medel} är det specifika genomsnittliga ventilationsflödet under uppvärmningssäsongen. Det högsta flödet som får tillgodoräknas är dock 1 l/s, m² (Boverket, 2016). Det gör att den specifika energianvändningen kan variera mellan 65-110 kWh/m² A_{temp} beroende på typ av lokal och hygienkrav.

Simuleringsunderlag

Programvaran IDA ICE används för att göra energisimuleringarna. Som underlag till simuleringarna används energideklarationsregistret GRIPEN (Boverket, 2015), information från Boverkets BETSI-projekt (Boverket, 2010) samt egna uppskattningar och beräkningar.

GRIPEN används för information om uppvärmd area, antal våningar, ventilationssystem samt energiprestanda uppdelad på värme, tappvarmvatten och fastighetsel. BETSI används för U-värden på konstruktionsdelar, kvot mellan fönster- och golvarea samt ventilationsflöden. Beräkning av solvärmeproduktion bygger på simulering i PVsyst och data från Meteonorm. I de fall värmepump ingår i ett åtgärds paket är de dimensionerade för byggnadens luftflöde. Ett COP-värde på 3 har antagits.

B.3 ENERGIPRESTANDA

Tabell B3 redovisar energiprestanda på årsbasis för de arketyper som simulerats med IDA ICE. Som indata till TIMES_Malmö ges emellertid energiprestanda uppdelat på 36 tidssteg per år för att fånga variationen i energianvändning över året.

Resultaten från simuleringarna ligger till grund för energiprestandaberäkningar för effekten av renoveringspaketen för resterande arketyper. Principen har här varit att renoveringspaketen antas ha en liknande procentuell besparing för liknande arketyper. Kompletterande anpassningar har gjorts där så funnits nödvändigt. Befintlig prestanda för samtliga arketyper som representeras i modelleringen (med TIMES Malmö) redovisas i Tabell B4-B6.

Tabell B3. Sammanställning av energiprestanda för simulerade byggnadsarketyper

	Fjärrvärme till uppvärmning och tappvarmvatten [kWh/m ² A _{temp} , år]	Fastighetsel [kWh/m ² A _{temp} , år]	Total fastighetsenergi [kWh/m ² A _{temp} , år]	Kommentar
Åtgärds paket				
Flerfamiljshus 1951-1960				
Befintlig byggnad	117,7	8,8	126,5	Självdrag
Paket 0 – Underhåll	99,7	8,8	108,5	
Paket 1 – Tekniska install.	84,0	4,4	88,4	
Paket 2 – FVP	37,8	29,8	67,6	COP 3
Paket 3 – Solvärme	87,7	8,8	96,5	
Paket 4 – Klimatskal	65,5	4,4	69,9	

	Fjärrvärme till uppvärmning och tappvarmvatten [kWh/m ² A _{temp} , år]	Fastighetsel [kWh/m ² A _{temp} , år]	Total fastighetsenergi [kWh/m ² A _{temp} , år]	Kommentar
Åtgärds paket				
Flerfamiljshus 1961-1970				
Befintlig byggnad	126,0	16,0	142,0	
Paket 0 – Underhåll	110,3	16,0	126,3	
Paket 1 – Tekniska install.	83,3	8,0	91,3	
Paket 2 – FVP	43,0	39,0	82,0	COP 3
Paket 3 – Solvärme	98,4	16,0	114,4	
Paket 4 – Klimatskal	65,1	8,0	73,1	
Åtgärds paket				
Flerfamiljshus 1971-1980				
Befintlig byggnad	110,5	18,0	128,5	
Paket 0 – Underhåll	95,0	18,0	113,0	
Paket 1 – Tekniska install.	83,8	9,0	92,8	
Paket 2 – FVP	36,7	37,4	74,1	COP 3
Paket 3 – Solvärme	85,2	18,0	103,2	
Paket 4 – Klimatskal	72,3	9,0	81,3	
Nybyggnation				
Flerfamiljshus				
Nybyggnation enligt BBR	56,4	16,0	72,4	FTX 0,8 BBR krav 75, klimatzon 4
Nybyggnation lågenergi	36,4	11,0	47,4	FTX 0,8
Åtgärds paket				
Kontor befintliga				
Befintlig byggnad	93,0	28,0	121,0	FTX 0,6
Paket 0 – Underhåll	60,9	27,5	88,4	
Paket 1 – Tekniska install.	57,1	17,2	74,3	
Paket 2 – FTX	52,1	27,5	79,6	FTX 0,84
Paket 3 – Solvärme	57,0	28,0	85,0	
Paket 4 – Klimatskal	34,0	26,4	60,4	
Nybyggnation				
Kontor				
Nybyggnation enligt BBR	27,6	39,0	66,6	FTX 0,65. BBR krav 65, klimatzon 4
Nybyggnation lågenergi	10,0	36,0	46,0	FTX 0,84.

Tabell B4. Fjärrvärmeuppvärmda flerfamiljshus – befintlig prestanda (Malmö)

Byggnadsår/arketyp	Fjärrvärme [kWh/m ² A _{temp} , år]	Fastighetsel [kWh/m ² A _{temp} , år]	Andel av total area [%]
Före 1930	129	11	8.4
1931-1940	132	9	12.2
1941-1950	127	7	10.5
1951-1960	118	9	17.4

Byggnadsår/arketyper	Fjärrvärme [kWh/m ² A _{temp} , år]	Fastighetsel [kWh/m ² A _{temp} , år]	Andel av total area [%]
1961-1970	126	16	23.0
1971-1980	111	18	14.7
1981-1990	90	19	5.2
1991-2000	141	22	1.8
2001-2010	93	18	4.7
2011-2014	66	10	2.1

Tabell B5. Fjärrvärmeuppvärmda småhus – befintlig prestanda (Malmö)

	Fjärrvärme [kWh/m ² A _{temp} , år]	Fastighetsel [kWh/m ² A _{temp} , år]	Andel av total area [%]
Före 1930	141	2	20.2
1931-1940	132	2	6.4
1941-1950	125	1	5.9
1951-1960	123	3	5.6
1961-1970	135	1	26.5
1971-1980	105	1	14.2
1981-1990	116	9	14.9
1991-2000	80	15	3.6
2001-2010	90	21	1.1
2011-2014	66	13	1.7

Tabell B6. Fjärrvärmeuppvärmda lokaler – befintlig prestanda (Malmö)

	Fjärrvärme [kWh/m ² A _{temp} , år]	Fastighetsel [kWh/m ² A _{temp} , år]	Andel av total area [%]
Kontor	93	28	33.8
Skolor	112	32	13.2
Vård dag	120	34	6.7
Vård 24/7	108	55	4.1
Butik	71	23	14.8
Köpcentrum	89	61	3.4
Livsmedel	88	36	3.2
Restaurang	112	34	1.5
Hotell	85	28	2.2
Övrigt	94	33	17.1

Bilaga C: Kostnader energiåtgärder i byggnader

Investeringskostnaderna för de olika renoveringspaketen har tagits fram med utifrån kalkylprogram, resultat från tidigare studier, samt egna antaganden och beräkningar. Wikells kalkylprogram Sektionsdata (Wikells, 2016) har varit en viktig källa. Detta är ett kalkylsystem med databaser för nybyggnad, renovering, ombyggnad, tillbyggnad (ROT), EI, VS och luft. Andra källor inkluderar Repabs underhållskostnadsböcker (REPAB, 2012; 2013) och en referensdatabas med 40 renoveringsprojekt som ingår i projekten HalveraMera och Rekorderlig Renovering (BeBo, 2015). För åtgärden solvärme IVT konsulterats (IVT, 2016).

Renoveringspaketens investeringskostnad som är indata till TIMES_Malmö (uttryckta som merkostnad mot underhållspaketet) presenteras i Tabell C1.

Exempel på kostnader och antagna förutsättningar för flera av de enskilda åtgärderna som ingår i renoveringspaketen presenteras i Tabell C2. Vid summering av enskilda åtgärder till åtgärds paket har kompletterande antaganden gjorts, bland annat för att undvika överlapp av åtgärds kostnader och för att anpassa enskilda åtgärders beräknade livslängd till renoveringspaketets livslängd.

Tabell C1. Antagna investeringskostnader för renoveringsåtgärder uttryckt som merkostnad mot underhållspaketet (paket 0) för respektive byggnadstyp

	Flerbostadshus (SEK/ m ² A _{temp})	Småhus (SEK/ m ² A _{temp})	Lokaler (SEK/ m ² A _{temp})	Livslängd (år)
Paket 0 – Underhåll	0	0	0	40
Paket 1 – Tekniska install.	228	228	135	20
Paket 2 – FVP /FTX	342/588	342/588	162	20
Paket 3 – Solvärme	327	327	184	20
Paket 4 – Klimatskal	671	731	527	40

Tabell C2. Exempel på enskilda åtgärder med beräkningsförutsättningar och kostnader för flerbostadshus

Åtgärder	Befintlig byggnad	Antagande vid kostnadsberäkning	Kostnad [SEK/m ² golvyta]	Källa som beräkning baserats på
Byte till fastighetsarmatur som är anpassad för LED-lampor.	Två trapphus, 2*18 W per våningsplan.		12	Wikells 4.18
Installation av närvarostyrning för fastighetsbelysning.	Lysknapp med timer	14 st	3	Wikells 4.18
Byte av termostatventiler till radiatorer.	Termostater som inte fungerar.		56	BEBO, REPAB Fakta 2012 och Wikells 4.18
Injustering av värmesystem.	Värmesystemet behöver injusteras.	6 stamventiler per trapphus + 3 SEK/m ² för injustering i lägenhet	4	Repab Fakta 2012
Byte till frekvensstyrd vattenpump.	Äldre elmotor med fast varvtal.		17	BEBO
Byte till snålspolande armaturer för tappvarmvatten	Äldre armaturer. Två trapphus, 6 plan, 3	Små läg.: dusch-, tvättställs- och köksblandare. Stora	66	BEBO

Åtgärder	Befintlig byggnad	Antagande vid kostnadsberäkning	Kostnad [SEK/m ² golvyta]	Källa som beräkning baserats på
	lägenheter/plan, 1 stor + 2 små.	läg.: dusch-, 2 tvättställs- och köksblandare.		
Byte till frekvensstyrd fläkt i ventilation	Äldre elmotor med fast varvtal.	Radial fläkt Nicotra Gebhardt.	7	Wikells 4.18
Injustering av ventilation.	Ej injusterat, senaste OVK för 10 år sedan.	F eller FT system	6/14	REPAB Fakta 2012
Byte av SRÖ-utrustning (styr-, regler-, och övervakning)	Obefintlig eller eftersatt	Byte av styr och reglering i undercentral.	8	BEBO
Tilläggsisolering av vindsbjälklag.	10 cm isolering som sjunkit ihop och härvid fått sämre isolerförmåga.	Tilläggsisolering 40 cm lösull.	25	Wikells 4.18
Fönsterbyte	Kopplat 2-glasfönster med U-värde 2.7 W/m ² K.	400 fönster 1000x1200, trä/aluminium, 3-glas, U-värde 0.6 W/m ² K.	882	Wikells 4.18 + www.fonster24.com
Utvändig tilläggsisolering av fasad.	Skalmur av tegel och 10 cm isolering som sjunkit ihop.	150 mm mineralull, ny PP fasadskiva	470	Wikells 4.19
Installation av solfångare på tak.	Ingen solvärme. 25 % (160 m ²) av takytan är tillgänglig.	1,5 milj	327	IVT (Lars Hoppe)
Installation av värmepump.			342	BEBO
Installation av FTX-system.			588	BEBO

Bilaga D: Data ny fjärrvärmeproduktion

Kostnads- och teknikantaganden för nyinvesteringar i fjärrvärmeproduktion baseras på tidigare studier och sammanställningar. För kraftvärme (KVV) har i första hand Elforsks rapport "El från nya anläggningar" (Nohlgren et al., 2014) använts. För hetvattenpannor (HVP) har i första hand rapporten "Technology data for energy plants" (Danish Energy Agency och Energinet, 2012). För att få representativa storleksalternativ för ny fjärrvärmeproduktion i TIMES_Malmö modellen har använd grunddata i vissa fall skalats om.

Tabell D.1 och D.2 sammanfattar en del indata för nyinvesteringar i KVV respektive HVP som använts i TIMES_Malmö.

Tabell D.1. Nyinvesteringar för kraftvärmeverk i TIMES_Malmö-modell. Urval av indata.

	Kapacitet el	Kapacitet värme	Verkningsgrad el	Alfavärde (el/värme)	Investeringskostnad	Livs-längd
	MW	MW			MSEK/MW_el	År
KVV Kol	0	2	0.13	0.18	72.5	15
	7	20	0.22	0.34	54.8	25
	47	100	0.28	0.47	31.5	25
	105	200	0.31	0.53	26.1	25
KVV NG	1.7	2	0.40	0.86	9.6	15
	30	20	0.49	1.51	11.5	25
	154	100	0.51	1.54	8.5	25
	308	200	0.51	1.54	7.5	25
KVV Olja	0.4	2	0.13	0.18	6.3	15
	7	20	0.22	0.34	47.9	25
	47	100	0.28	0.47	27.6	25
	105	200	0.31	0.53	22.8	25
KVV Bio	0.3	2	0.13	0.15	90.7	15
	5.4	20	0.22	0.27	68.5	25
	37	100	0.28	0.37	39.4	25
	82	200	0.31	0.41	32.6	25
KVV Avfall	4.4	20	0.19	0.22	122.2	25
	22	100	0.19	0.22	106.9	25
	44	200	0.19	0.22	95.0	25

Tabell D.2. Nyinvesteringar för hetvattenpannor i TIMES_Malmö-modell. Urval av indata.

	Kapacitet värme	Verkningsgrad	Investerings- kostnad	Livs- längd
	MW		MSEK/MW_värme	år
HVP - Kol	1	0.95	8.8	15
	10	0.95	6.4	15
	50	0.95	4.0	15
HVP - Naturgas	1	0.97	1.3	25
	10	1.05	1.0	25
	50	1.05	0.7	25
HVP - Olja	1	0.95	1.6	25
	10	0.95	1.2	25
	50	0.95	0.8	25
HVP - Biobränsle	1	1.08	11.0	15
	10	1.08	8.0	15
	50	1.08	5.0	15
HVP - Solvärme	1	0.50	5.2	25
	10	0.50	4.5	25
	50	0.50	3.0	25
HVP - Avfall	10	0.98	16.6	15
	50	0.98	12.0	15
HVP - Värmepump	1	2.80 (COP)	8.4	15
	10	2.80 (COP)	6.8	15
	50	2.80 (COP)	5.2	15
HVP - EI	1	0.99	1.5	15
	10	0.99	0.8	15
	50	0.99	0.6	15

Bilaga E: Omvärldsfaktorer

Tabell E.1 och E.2 redovisar de antagna CO₂e- respektive primärenergifaktorer som använts i studien. Bränslefaktorer är hämtade från Gode et al. (2011). För el används ett marginalperspektiv (konsekvensperspektiv) och använda värden är antagna utifrån CNS-B scenariot i NETP 2016 projektet (NER och IEA, 2016) med egna kompletterande antaganden. Baserat på den utveckling av elproduktionssystemet i nämnt scenario, antas en marginalproduktionsmix elsystemet vilken bestämmer CO₂-effekten av en förändrad elanvändning eller elproduktion i Malmö. Denna "marginalmix" antas framför allt bestå av en blandning av kol- och naturgasbaserad produktion. Andelen naturgas ökar under den studerade tidsperioden medan kolinslaget minskar. I slutet av perioden finns också inslag av CO₂-neutral produktion i marginalmixen. För avfallsantaganden, se också avsnitt 2.4.3.

Tabell E.1. Antagna CO₂e-faktorer (här med livscykelperspektiv) för energibärare, kg/MWh (för bränslen baserat på Gode et al., 2011; för el även egna antaganden samt NER och IEA, 2016).

	2014	2020	2030	2040	2050
El (marginal)	913	830	737	478	208
2014-2050					
Kol	385				
Naturgas	248				
Eldningsolja	288				
Avfall	0 (vid systemexpansion i "CO ₂ Neutral") / 136 (direkta från fossilandel)				
Biobränsle	8				

Tabell E.2. Antagna primärenergifaktorer för energibärare, kg/MWh (för bränslen baserat på Gode et al., 2011; för el även egna antaganden samt NER och IEA, 2016).

	2014	2020	2030	2040	2050
El (marginal)	4,0	3,6	2,5	2,5	2,2
2014-2050					
Kol	1,15				
Naturgas	1,09				
Eldningsolja	1,11				
Avfall	0,04				
Biobränsle	1,06				

STRATEGIER FÖR ENERGIEFFEKTIVISERING UR ETT FJÄRRVÄRME-PERSPEKTIV

Genom ett modellbaserat angreppssätt och med Malmö som fallstudie visar man här hur ett integrerat fjärrvärme- och byggnadssystem kostnadseffektivt kan möta mål om minskade koldioxidutsläpp och fossilbränsleutfasning.

Den internationellt etablerade energisystemmodellen TIMES har anpassats för Malmö och modellen beräknar över tid den kostnadsoptimala utvecklingen av systemet med 2050 som slutår för analysen.

Resultaten visar bland annat att hur stadens miljömål definieras har stor betydelse för vilka teknikval och investeringar som är kostnadseffektiva. Miljömål där också stadens påverkan på koldioxidutsläpp utanför den egna stadens gränser ger ett annat utfall än om fokus ligger på utfasning av fossila bränslen inom staden.

Mål om "fossilfrihet" inom staden leder till en hög andel värmepumpar i fjärrvärmeproduktionen, medan mål om "CO₂-neutralitet", som tar hänsyn till effekter på elsystemet i det för staden omgivande systemet gynnar en högre andel kraftvärmeproduktion i fjärrvärmeproduktionen.

Resultaten visar också att enklare teknikåtgärder för energieffektivisering i byggnadsbeståndet ofta är kostnadseffektiva ur ett samhällsekonomiskt perspektiv. Energieffektiviseringsåtgärder som minskar el- och värmeanvändning då den totala efterfrågan är hög ger fördelar ur ett systemperspektiv. Åtgärder som främst minskar behov av fjärrvärmens baslastproduktion ger i många fall begränsade fördelar ur ett systemperspektiv

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se