LASTSTYRNING AV FLERBOSTADSHUS I FJÄRRVÄRMESYSTEM

Kundbaserad laststyrning i fjärrvärmesystem: potential, systemnytta och optimering av ny effektprofil

OLLE LUNDÉN

HENRIK HEDÉN

Akademin för ekonomi, samhälle och teknik

Kurs: Examensarbete i energiteknik
Kurskod: ERA403
Ämne: Energisystem
Högskolepoäng: 30 hp
Program: Civilingenjörsprogrammet i Energisystem

Handledare MDU: Chenyu Su
Handledare Mälarenergi: Anton Hedén Sandberg
Examinator: Amir Vadiee
Uppdragsgivare: Mälarenergi
Datum: 2026-06-11
E-post:
oln21007@student.mdu.se
hhn21006@student.mdu.se

ABSTRACT

This thesis examines how building-level load shifting can contribute to heat load flexibility in Mälarenergi's district heating system, and how the resulting system benefits can be translated into economic incentives. The study was divided into three stages. First, a peak-shaving strategy was applied to an apartment building, using a model predictive control approach to evaluate its ability to temporarily reduce heat demand, while maintaining indoor comfort. The apartment was representative for the case study and the results showed that the building was able to provide measurable flexibility and achieved peak reductions during all periods and participation levels. Low participation levels showed small impact with a peak reduction of 2.5 – 3.6 %, depending on the period, but increases substantially with increasing participation levels to 4.6-13.1 %. Second, the identified flexibility was scaled to system level by combining the building's reduction profile with historical load data from Mälarenergi's district heating network. These scenarios were then simulated in EO3, a production optimization program, to assess how load shifting affects production costs, electricity production, and peak load boiler use. The simulations indicated that even moderate levels of customer participation could lead to noticeable cost reductions. During full participation in winter, substantial cost-saving potential and a significant reduction in peak boiler use was observed at almost 4 GWh in January alone. In spring and autumn, the impact was limited, since the loads were low and load variations were covered by Mälarenergi's thermal storages. Finally, the cost-saving term was developed to create economic incentives through a proposed price-model adjustment, for customers to contribute with heat flexibility. The saving term represented the system-level cost savings and functioned as a customer discount based on the peak reduction, and was designed to be fair, easy to communicate, and compatible with existing tariff structures. Overall, the study demonstrated that load shifting could reduce peak loads and production costs, and that a system benefit-based pricing model adjustment could offer a feasible approach to activating customer-side flexibility in district heating systems.

Keywords: District heating, Load shifting, Peak shaving, Heat flexibility, Production optimization, Pricing model adjustment, System benefits, Model predictive control.

Nyckelord: Fjärrvärme, Laststyrning, Effektkapning, Värmeflexibilitet, Produktionsoptimering, Prismodellsjustering, Systemnytta, Modellprediktiv styrning.

FÖRORD

Detta examensarbete genomfördes under vårterminen 2026 som avslutande del i civilingenjörsprogrammet i energisystem (300 hp) vid Mälardalens universitet och i samarbete med Mälarenergi. Arbetet växte fram ur intresse för laststyrning och hur kundflexibilitet kan bidra till ett mer robust fjärrvärmesystem i kombination med ett framtaget förslag från Mälarenergi.

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare på Mälarenergi, Anton Hedén Sandberg, samt hans kollegor för värdefulla diskussioner och insikter om systemdrift och flexibilitet. Vi vill även tacka vår akademiska handledare, Chenyu Su, för stöd, vägledning och konstruktiv feedback under arbetets gång.

Västerås i juni 2026

Olle Lundén & Henrik Hedén

SAMMANFATTNING

Fjärrvärmesystem står inför ökande krav på flexibilitet i takt med elektrifieringen, varierande produktionskostnader och det ständiga behovet av att hantera effekttoppar på ett kostnadseffektivt sätt. Detta examensarbete genomförs därför för att undersöka hur laststyrning i byggnader kan bidra till att reducera effekttoppar samt analysera hur dessa effektreduktioner påverkar den optimerade driften av Mälarenergis produktionssystem. Slutligen tas även en systembaserad besparingsterm fram utifrån befintlig reduktionsmängd, som ekonomiskt incitament för att implementeringen ska bli mer lukrativ för kunder.

Examensarbetet består av tre huvuddelar. I den första delen analyseras vad en laststyrning kan ge för effekt i en representativ flerbostadsbyggnad. Genom att tillfälligt sänka inomhustemperaturen under belastade perioder och därefter studera effektreduktionen utan nämnvärd komfortpåverkan. Resultaten visar att byggnaden kan bidra med betydande flexibilitet och att effektreduktionen kan uppnås genom att hålla sig inom rimliga komfortgränser. I den andra delen av arbetet skalas denna effektreduktion upp till systemnivå. Genom att analysera reduktionsprofilen från den representativa byggnaden och jämföra den med Mälarenergis historiska lastdata, utformas sedan tre scenarier där varje scenario representerar olika implementeringsgrader av laststyrning i flerbostadshus. Dessa scenarier simuleras vidare i Mälarenergis interna produktionsoptimeringssystem för att analysera laststyrningens påverkan på produktionskostnader, spetslasttimmar och elproduktion. Resultaten visar att man redan vid relativt låga implementeringsgrader kan se märkbara kostnadsminskningar och bidra till ett mer jämnt belastat fjärrvärmesystem.

I den tredje delen utvecklas ett förslag på en besparingsterm, vars syfte är att representera systemnyttan av laststyrning som ett ekonomiskt incitament för kunder. Besparingstermen bygger på att systemnyttan beräknas månadsvis utifrån skillnader i produktionskostnader mellan scenarier med och utan laststyrning. Där besparingen, i första hand, går till att täcka alla installationskostnader som krävs för fortsatt driftoptimering av Mälarenergi. Därefter förhandlas den återstående besparingen mellan Mälarenergi och kund på ett rättvist sätt. Förslaget är framtaget i avseende att vara enkel för kunder att förstå, lätt att applicera och bevaka och slutligen se till att besparingen är direkt kopplad till den faktiska flexibilitetsnytta som skapas.

Slutsatsen av examensarbetet är att laststyrning, med hjälp av peak-shaving-modellen, bidrar till betydande effektreduktion uppskalad mot fjärrvärmenätet, vilket i sin tur skapar förutsättningar för att optimera driften av kraftvärmeverket. Genom att sänka effekttopparna minskas behovet av dyr spetslastproduktion och systemet kan vid större deltagargrader drivas med mer kostnadseffektiva produktionsenheter. Detta leder både till lägre produktionskostnader och ett mer robust och jämnt belastat fjärrvärmesystem. Arbetet visar dessutom att en besparingsterm över systemnyttan kan bidra med effektflexibilitet genom att komplettera prismodeller med ekonomiska incitament. Detta gynnar i slutändan båda parter där kunder sparar pengar på effektabonnemangen genom rabatten och Mälarenergi får en mer kostnadseffektiv produktion med jämnare belastning.

Trots att modellerna och metoderna är framtagna och baserade på forskning, finns fortfarande begränsningar i studiens metod och tillämpning. Flexibilitetens värde varierar över tid och mellan olika kundsegment. Dessutom kan laststyrningen i vissa fall leda till ett ökat värmebehov när byggnaden återgår till sin normala temperatur eller tar igen den värme

man tidigare besparat (reboundeffekt). Fortsatt är besparingstermen heller inte praktiskt implementerad, vilket innebär att kundfeedback och empiriska resultat över systemnyttan saknas. Detta bör ses över i ett framtida arbete där nästa steg är att praktiskt implementera besparingstermen på en befintlig prismodell och vidare analysera de tekniska och ekonomiska följder det resulterar i.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1 INLEDNING 2

1.1 Bakgrund 2

1.2 Syfte 4

1.3 Frågeställningar 4

1.4 Avgränsning 4

2 METOD 5

2.1 Övergripande metodansats 5

2.2 Metodens antaganden 5

2.3 Datainsamling och databehandling 6

2.4 Modellering av laststyrning 7

2.4.1 Motivering bakom RC-modell och MPC optimering 7
2.4.2 Uppskalning av Mälarenergis kundbas 8

2.5 Systemoptimering av produktion 8

2.6 Förslag till utveckling av besparingsterm 9

2.7 Metodbegränsningar 9

3 ÄMNESMÄSSIG REFERENSRAM 11

3.1 Fjärrvärmens roll i energisystemet 11

3.2 Utveckling av prismodell och dess förändrade roll 12

3.2.1 Hur kostnadsstrukturen påverkar utformningen av prismodeller 12
3.2.2 Varför effekttoppar är avgörande för kostnader och investeringar 13
3.2.3 Dynamisk prissättning som verktyg för att styra efterfrågan 14
3.2.4 Hur svenska prismodeller ser ut i praktiken 15

3.3 Laststyrning av byggnader och dess roll i fjärrvärmens flexibilitet 17

3.3.1 Byggnader som termiska energilager 17
3.3.2 Direkta styrstrategier för laststyrning 18
3.3.3 Laststyrningens begränsningar 19

3.4 Systemnytta av flexibilitet och effektreduktion i fjärrvärme- och kraftvärmesystem 20

3.4.1 Systemnytta genom optimerad drift och lastfördelning i kraftvärmeverk 20
3.4.2 Systemnytta genom ekonomiskt optimerad peak shaving 21

3.4.3 Systemnytta genom termisk lagring i fjärrvärmenät 22

3.5 Sammanfattande analys och identifierade forskningsluckor 22

3.5.1 Prismodell 22
3.5.2 Laststyrning 23
3.5.3 Systemnytta 23

4 AKTUELL STUDIE 25

4.1 Studieobjekt 25

4.2 Modellering av laststyrning 26

4.2.1 Parameteridentifiering för den aktuella byggnaden 26
4.2.1.1 Degree day model (DDM) 26
4.2.1.2 Thermal capacity model (TCM) 26
4.2.2 Modellvalidering 27
4.2.3 Genomförande av MPC-optimeringen 27
4.2.3.1 Träningsperiod och horisont 27
4.2.3.2 Optimeringsproblemets struktur 28
4.2.3.3 GEKKO som optimeringsverktyg 29
4.2.4 Framtagning av effektreduktionsprofiler 30
4.2.4.1 Beräkning av optimerad total effekt 30
4.2.4.2 Uppskalning av reduktionsprofiler 30

4.3 Produktionsoptimering 31

4.4 Förslag till Besparingsterm 32

5 RESULTAT 33

5.1 MPC-modell 33

5.1.1 Träningsperiod, horisont och validering 33
5.1.2 Optimering av vårperiod 34
5.1.3 Optimering av höstperiod 37
5.1.4 Optimering av vinterperiod 39
5.1.5 Sammanställning av optimeringsresultat 41

5.2 Produktionsoptimering 42

5.3 Justering av prismodell 42

6 DISKUSSION 43

6.1 MPC-modell 43

6.2 Produktionsoptimering (EO3) 46

6.3 Prismodellsjustering – besparingsterm 48

7 SLUTSATSER.....50

8 FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE.....52

9 DEKLARATION OM ANVÄNDING AV STORA SPRÅKMODELLER (LLM:ER) I SKRIVPROCESSEN.....53

REFERENSER.....54

FIGURFÖRTECKNING

Figur 1 Validering av MPC-modell med träningsperiod 168 timmar och predikterad horisont 48 timmar genom jämförelse av mätt och predikterad inomhustemperatur 34
Figur 2 Normaliserad fjärrvärmesystemeffekt samt historisk och optimerad normaliserad byggnadseffekt under perioden april-maj 2025, givet ett tillåtet temperaturintervall på ±0,5 ℃ 34
Figur 3 Jämförelse av historisk och optimerad inomhustemperatur för april-maj 2025 och tillåten temperaturvariation ±0,5 ℃ 35
Figur 4 Utomhustemperatur april-maj 2025 35
Figur 5 Effektkurva för fjärrvärmesystemet april-maj 2025 med varierande deltagandegrad och tillåten temperaturvariation på ±0,5 ℃ 36
Figur 6 Effektkurva för fjärrvärmesystemet april-maj 2025 med varierande deltagandegrad och tillåten temperaturvariation på ±2,0 ℃ 36
Figur 7 Normaliserad fjärrvärmesystemeffekt samt historisk och optimerad normaliserad byggnadseffekt under perioden oktober 2025, givet ett tillåtet temperaturintervall på ±0,5 ℃ 37
Figur 8 Jämförelse av historisk och optimerad inomhustemperatur för oktober 2025 och tillåten temperaturvariation ±0,5 ℃ 37
Figur 9 Utomhustemperatur för oktober 2025 38
Figur 10 Effektkurva för fjärrvärmesystemet oktober 2025 med varierande deltagandegrad och tillåten temperaturvariation på ±0,5 ℃ 38
Figur 11 Effektkurva för fjärrvärmesystemet oktober 2025 med varierande deltagandegrad och tillåten temperaturvariation på ±2,0 ℃ 38
Figur 12 Normaliserad fjärrvärmesystemeffekt samt historisk och optimerad normaliserad byggnadseffekt under perioden januari 2026, givet ett tillåtet temperaturintervall på ±0,5 ℃ 39
Figur 13 Jämförelse av historisk och optimerad inomhustemperatur för januari 2026 och tillåten temperaturvariation ±0,5 ℃ 39
Figur 14 Utomhustemperatur för januari 2026 40
Figur 15 Effektkurva för fjärrvärmesystemet januari 2026 med varierande deltagandegrad och tillåten temperaturvariation på ±0,5 ℃ 40
Figur 16 Effektkurva för fjärrvärmesystemet januari 2026 med varierande deltagandegrad och tillåten temperaturvariation på ±2,0 ℃ 40

TABELLFÖRTECKNING

Tabell 1 Rörligt fjärrvärmepris för stora fastigheter och grupphusanslutna småhus, Mälarenergi 15
Tabell 2 Grundavgifter stora fastigheter, Mälarenergi 15
Tabell 3 Grundavgifter gruppanslutna småhus, Mälarenergi 16
Tabell 4 Rörligt fjärrvärmepris mindre flerbostadshus (2-4 lägenheter), Mälarenergi 16
Tabell 5 Flödesavgift mindre flerbostadshus (2-4 lägenheter), Mälarenergi 16
Tabell 6 Effektkostnad, Stockholm Exergi 16
Tabell 7 Energikostnad, Stockholm Exergi 17
Tabell 8 Returtemperatur (nov-mar), Stockholm Exergi 17
Tabell 9 Medelvärde av avvikelse mellan mätt och predikterad inomhustemperatur för januari 33
Tabell 10 Sammanställning av uppskalade resultat från optimering av byggnad med temperaturvariation ±0,5℃ 41
Tabell 11 Sammanställning av resultat från optimering av produktion med nya effektprofiler 42

BETECKNINGAR

Beteckning	Beskrivning	Enhet
R	Värmeförlustkoefficient	W/K
C	Värmekapacitet	Wh/K
τ	Tidskonstant	h
Q_{SH}	Effekt uppvärmning	W
Q_{DHW}	Effekt tappvarmvatten	W
Q_{Passiv}	Passiv effekt	W
$Q_{SH,opt}$	Optimerad effekt uppvärmning	W
$Q_{tot,opt}$	Total optimerad effekt	W
$Q_{tot,hist}$	Total historisk effekt	W
Q_{diff}	Effektskillnad	%
$Q_{sys,opt,norm}$	Optimerad systemeffekt (normaliserad)	-
$Q_{sys,hist}$	Historisk systemeffekt	W
$Q_{sys,opt}$	Optimerad systemeffekt	W
Q_{ref}	Rullande medelvärde systemeffekt (normaliserad)	-
T_{in}	Inomhustemperatur	K
T_{ext}	Utomhustemperatur	K
T_{set}	Börvärde inomhustemperatur	K
ΔT	Tillåten temperaturvariation	K
W_{track}	Följande vikt-målfunktion	-
$W_{comfort}$	Komfortvikt-målfunktion	-
$temp_{error}$	Avvikelse mellan aktuell inomhustemperatur och börvärdet	K

FÖRKORTNINGAR

Förkortning	Beskrivning
MILP-optimering	Mixed-integer linear programming – En matematisk linjär optimeringsmetod där både heltal och kontinuerliga tal kan användas
PSO	Particle Swarm Optimization – optimeringsmetod där man antar att flera punkter (lösningsförslag) rör sig runt i ett område för att hitta den bästa lösningen på ett problem
EO3	Energy optima 3 – optimeringsprogram
MPC	Model predictive control – modellprediktiv styrning
RC-model	Resistance–Capacitance-model
DDM	Degree day model
TCM	Thermal-capacity-model
EMPC	Economic model predictive control – ekonomibaserad modellprediktiv styrning

1 INLEDNING

Fjärrvärme spelar en viktig roll i det svenska energisystemet och utgör en viktig komponent i omställningen mot ett mer resurseffektivt samhälle. Samtidigt står fjärrvärmeleverantörerna inför utmaningar kopplade till effekttoppar, förändrade kundbeteenden och en mer varierad energianvändning. Dessa utmaningar gör att behovet av flexibilitet i fjärrvärmesystemen blir alltmer värdefullt. Traditionellt har värmeflexibilitet främst skapats på produktionssidan genom exempelvis ackumulatortankar, men med den ökade elektrifieringen kan dessa lösningar inom närtid vara otillräckliga för att hantera kortvariga toppar i värmebehovet. Detta har lett till ett växande intresse för kundbaserad laststyrning som ett kompletterande flexibilitetsresurs.

Tidigare studier har visat att laststyrning på kundsidan inom fjärrvärme är teoretiskt möjligt med hjälp av trögheten i byggnader vilket kan bidra till minskade effekttoppar och ökad systemeffektivitet. Även olika typer av prismodeller som incitament för ökad flexibilitet har behandlats i tidigare projekt. Forskningsluckan framkommer inte på grund av brist på tillgängliga studier, utan det handlar snarare om att befintliga studier inom dessa områden ofta är generella eller implementerade i specifika system. För Mälarenergi saknas i dagsläget en analys där man bedömer potentialen av systemnytta från kundbaserad laststyrning i kombination med en systemanpassad produktionsoptimering. Detta examensarbete genomförs därför på Mälarenergis begäran för att fylla denna kunskapslucka.

1.1 Bakgrund

Fjärrvärme är en effektiv metod för uppvärmning av byggnader och tappvarmvatten, som anses vara viktigt för framtida energisystem. För att säkerställa hållbarhet i fjärrvärmen behöver systemen ständigt utvecklas (Håkansson et al., 2024). Produktionen och leveransen av fjärrvärme baseras på kundens behov som behöver tillgodoses vid alla tidpunkter, vilket gör att produktionen kan behöva variera kraftigt på grund av kundens beteende. Vanligtvis uppstår en tydlig ökning av värmebehov under morgonen vilket främst beror på användning av tappvarmvatten och uppvärmning av kontorsbyggnader (Funkqvist, 2020). Fjärrvärmesystemens pannor som producerar värmen kan kategoriseras beroende på typ av produktion. Spetsproduktion, som behövs vid höga laster, är oftast dyrare och sämre ur ett miljöperspektiv i jämförelse med basproduktionen som är driftsatt under större delar av året. För att minska användandet av spetspannor, öka utnyttjandet av mer miljövänliga bränslen och optimera produktionen har flertalet olika metoder presenterats för ökad flexibilitet.

Flexibilitet inom fjärrvärmesystem kan möjliggöras på många olika sätt, med fokus på olika delar av systemet. Dagens system är främst flexibla i form av värmelagring på produktionssidan. Ackumulatortankar är vanligt förekommande hos värmeproducenten som lagrar överskottsvärme och avger värme vid behov vilket ökar möjligheten till varierande värmeproduktion oberoende av det aktuella värmebehovet. Även om denna typ av flexibilitet

är välstuderad och brett implementerad i anläggningar finns tydliga begränsningar vilket medför att ackumulatortankar ofta inte enskilt är tillräckliga för att täcka kortvariga toppar av effektbehov. Detta kan därför fördelaktigt kompletteras med att tillfälligt reglera effektbehovet hos kunden (Håkansson et al., 2024).

Att styra värmebehovet på kundsidan genom att tillåta en varierande inomhustemperatur kan öka flexibiliteten i ett fjärrvärmesystem (Funkqvist, 2020). En byggnads termiska tröghet kan utnyttjas för att flytta värmebehovet från tidpunkter med hög efterfrågan till timmar med lägre efterfrågan vilket bidrar till en jämnare värmelastkurva och effektivisering av produktionen. Denna metod innebär alltså inga stora investeringar gällande exempelvis ackumulatortankar eller utbyggnad av fjärrvärmenätet, då man i stället utnyttjar redan befintliga byggnaders förmåga att lagra värme. Dock medför detta att hänsyn behöver tas till kundens komfort och vilja till deltagande.

Kontu et al. (2018) är en av många studier som visar att markant systemnytta i fjärrvärmenät kan skapas med hjälp av kundbaserad laststyrning genom att utnyttja byggnaders värmelagringsförmåga som möjliggör temporär justering av efterfrågan. Vid implementering av laststyrning hos många kunder kan flexibilitet skapas för att minska fjärrvärmeleverantörens behov av dyr spetsproduktion, vilket bidrar till lägre systemkostnader och klimatpåverkan. Utnyttjandet av baslastanläggningar, tack vare ökad flexibilitet, medför också högre systemeffektivitet. Ytterligare systemnytta som understryks handlar om hantering av framtida osäkerheter, såsom större inslag av variabel elproduktion och ökande urbanisering. En profil för värmeefterfrågan med hög flexibilitet gör det möjligt att bättre anpassa sig till förändrade omständigheter och förutsättningar vilket ökar systemets robusthet.

Även om Funkqvist (2020) förklarar att kundbaserad laststyrning, med fokus på varierbar inomhustemperatur, är en effektiv och tekniskt implementerbar metod behövs, enligt Mokhtari et al. (2025), någon form av ekonomiskt incitament för att uppnå ökad flexibilitet på kundsidan. Ett incitament som kan användas för att utöka flexibiliteten på sekundärsidan är förändrad prissättning genom justering av prismodell (Lygnerud & Yang, 2024). En väl anpassad prismodell motiverar kunder med ineffektiva värmesystem att utföra förbättringar som gynnar dem på något vis. Dagens fåtal prismodeller med fokus på kundbaserad laststyrning innehåller ofta någon form av motiverande komponent. Ett exempel på sådan komponent är inkludering av värmemängdsjusterat flöde (m^3/MWh) som gör att delar av kundens kostnad är baserad på hur mycket vatten som passerar undercentralen per mängd värme. Höga flöden innebär att systemet på sekundärsidan är ineffektivt eftersom avkylningen i byggnaden är låg vilket resulterar i hög returtemperatur. En annan förekommande komponent i prismodeller består av ett bonus-malus-system som justerar värmekostnaden för kunden genom jämförelse av det uppmätta värdet och ett referensvärde för en specifik parameter. Exempel på parametrar som används i ett sådant system är returtemperatur, avkylning och flöde. När bonus-malus inkluderas i en prismodell betalar sämre presterande kunder en avgift som indirekt går till bättre presterande kunder som erhåller en bonus. En form av rabatt för låg returtemperatur kan också införas för att motivera kunden att installera lågtempererade värmesystem, exempelvis golvvärme.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att analysera hur kundbaserad laststyrning påverkar Mälarenergis kraftvärmeproduktion, samt att utforma ekonomiska incitament som möjliggör ett ökat kunddeltagande genom en vidareutveckling av den nuvarande prismodellen.

1.3 Frågeställningar

- Hur stor är den effektbaserade flexibilitetspotentialen på kundsidan, och hur påverkar olika nivåer av laststyrning den sammanlagda värmelastprofilen i Mälarenergis fjärrvärmesystem?

- Hur påverkar den identifierade flexibilitetspotentialen Mälarenergis systemdrift, särskilt effekttoppar, produktionskostnader, produktion utöver baslast och elproduktion?

- Hur kan en fjärrvärmeprismodell justeras så att den speglar systemnyttan av laststyrning och skapar tydliga ekonomiska incitament för kunder att bidra med flexibilitet?

1.4 Avgränsning

Avgränsningar för examensarbetet:

- Studien är begränsad till Mälarenergis fjärrvärmesystem i Västerås och resultaten är därmed inte direkt överförbara till andra system.

- Analysen av laststyrningen är baserad på ett flerbostadshus med mätdata från en större kund hos Mälarenergi, analysen exkluderar därmed vissa byggnadstyper, exempelvis villor.

- Beteende och acceptans bland kunder är inte undersökt empiriskt och kundsegmentet flerbostadshus är baserat på statistik från Mälarenergi.

- Investeringar av infrastruktur inom fjärrvärmenät och långsiktig planering är inte inkluderade i studien.

- Fjärrvärmeförluster mellan Mälarenergi och kund tas inte med i beaktande och utesluts från studien.

2 METOD

Metodvalen som gjorts är direkt kopplade till studiens syfte att analysera hur laststyrning på kundsidan kan påverka både värmelast och fjärrvärmesystemets produktionsdrift. De tre metodstegen, laststyrning, produktionsoptimering och prismodellsjustering, speglar samspelet mellan kund och Mälarenergi och är nödvändiga för att besvara studiens forskningsfrågor.

2.1 Övergripande metodansats

Studien bygger på en metod som kombinerar teknisk modellering, systemanalys och ekonomisk utvärdering. Arbetet inleds med att utveckla en Python-baserad peak-shaving-modell som simulerar hur en byggnad kan reducera sitt värmebehov genom laststyrning. Modellen använder en fysikaliskt baserad RC-modell (Resistance-Capacitance model) och en modellprediktiv styrning (MPC-optimering) för att optimera uppvärmningen över en rullande tidshorisont, där inomhustemperaturen tillåts variera inom ett bestämt komfortintervall.

MPC-modellen vidareutvecklas för att justera byggnadens effektbehov för att bidra till att sänka topparna i Mälarenergis fjärrvärmenät. Detta uppnås genom att inkludera och normalisera nätets historiska effektkurva i optimeringen, vilket gör att byggnaden kan styras i relation till nätets toppar och dalar.

Den optimerade värmeeffekten skalas därefter upp till Mälarenergis kundbas för att uppskatta den effektreduktion som kan uppnås beroende på deltagargrad. Reduktionen tas fram genom att jämföra de optimerade värmeeffekterna med det historiska basfallet.

I nästa steg används Mälarenergis interna optimeringsverktyg, Energy Optima 3 (EO3), för att analysera hur den frigjorda effekten påverkar produktionssystemets drift, kostnader och flexibilitet. Slutligen utvecklas ett förslag till en besparingsterm som kan appliceras på en befintlig prismodell i syfte att skapa ekonomiska incitament för kunder att implementera laststyrningen i sin byggnad. Metoden är utformad för att analysera både den tekniska potentialen, systemnyttan och de ekonomiska styrmedel som krävs för att göra Mälarenergi mer energieffektivt.

2.2 Metodens antaganden

För att genomföra arbetet bygger metodavsnittet på ett antal antaganden som är nödvändiga för att fortsätta arbetet framåt.

Studien utgår från att varje byggnad kan beskrivas med hjälp av den utvecklade 1R1C-modellen, där värmeförlusterna fångas av ett värmemotstånd (R) och byggnadens värmelagringsförmåga samlas i en kapacitetsterm (C). Den termiska massan, alltså hur mycket värme som kan lagras i väggar, golv och andra tunga material, ingår i denna C-parameter. Eftersom den verkliga termiska massan inte kan mätas direkt i Mälarenergis

kunddata behöver den i stället uppskattas. Det görs genom att använda historiska mätserier av utomhustemperatur, tillförd värmeeffekt och den observerade inomhustemperaturen.

Vidare antas kunden acceptera den bestämda inomhustemperaturvariationen som används för att se över olika effektbesparingar. Temperaturvariationerna ligger på ±0,5 °C respektive ±2 °C. Denna flexibilitet är en förutsättning för att kunna flytta uppvärmningseffekt i tid. Studien antar dessutom att kundernas beteendemönster är likvärdiga och att alla kunder inom samma kategori påverkas likadant av laststyrningen.

Ett ytterligare antagande är att historiska mätdata är representativa för framtida driftförhållanden. Detta innebär att de samband som identifieras i modellen antas gälla även under de perioder där optimeringen tillämpas.

Slutligen antas den byggnadstyp som används vid modelleringen att vara representativ för Mälarenergis kundbas. Detta innebär att alla byggnader under samma byggnadsbestånd behandlas likadant i modellen, även om deras verkliga värmedynamik kan skilja sig åt.

2.3 Datainsamling och databehandling

Datainsamlingen består av två huvudsakliga delar, byggnads- och systemdata. Samtliga mätserier är sorterade i timvis data med datum, vilket överensstämmer med både byggnadsmodellens tidssteg och EO3:s indataformat. För att modellera effektbehovet används en representativ exempelbyggnad från Mälarenergis kundbas som är ett vanligt förekommande flerbostadshus i Mälarenergis fjärrvärmenät. I byggnaden analyseras energiprestanda och värmesystemens tröghet. Till byggnaden kopplas tidsupplöst data över dess historiska värmebehov vad gäller både tapp- och uppvärmningseffekter, utomhustemperatur, inomhustemperatur och slutligen också en uppskattning av börvärdet för inomhustemperaturen. Dessutom samlas fjärrvärmenätets totala effektprognos in för att framöver kunna optimera byggnaden med hänsyn till fjärrvärmenätets effektbelastning.

Datamaterialet utgör grunden för modelleringen och behöver därför bearbetas så att det hålls konsekvent, rimligt och direkt applicerbart i den fortsatta analysen. All databehandling genomförs i Python med funktionen importdata(), där mätvärden först läses in och omvandlas till korrekt format. Effekternas enheter konverteras för att säkerställa att samtliga beräkningar sker korrekt och mätvärden som anses orimliga och negativa filtreras bort för att undvika att modellen tränas på felaktiga observationer.

En central del av databehandlingen är normaliseringen av både byggnadens och fjärrvärmenätets effektprofiler. Normaliseringen utförs för att styrsignalen ska bli skalbar och stabil när den senare ska skalas upp mot fjärrvärmenätet och användas i olika scenarier. Utan denna normalisering skulle byggnaden behöva kompensera oproportionerligt mycket vid exempelvis en djup dal i nätets belastning, vilket i sin tur skulle leda till att den uppskalade styrningen skapar nya effekttoppar som är större än de historiska. Genom att normalisera effektkurvorna kan styrningen i stället utformas så att byggnadens optimering följer nätets effektvariationer, utan att toppar eller dalar förstärks. Detta är avgörande för att

den senare optimeringen ska ge en jämn och robust styrsignal som kan användas för samtliga deltagargrader.

Vid produktionsoptimeringen finns all information internt i optimeringsverktyget som produktionsenheternas marginalkostnader, kapacitetsbegränsningar, bränslepriser och historiska lastprofiler. Denna data tillsammans med elpriser från Nordpool för de valda perioderna och de optimerade effektkurvorna från byggnaden används för att möjliggöra analyser av kraftvärmeproduktionens ekonomiska potential. Tillsammans skapar dessa datakällor en helhetsbild av både efterfrågesidan och produktionssidan i fjärrvärmesystemet.

2.4 Modellering av laststyrning

Laststyrningen modelleras med en Python-baserad peak-shaving-modell som kombinerar en förenklad byggnadsmodell med MPC. Byggnadens värmedynamik representeras med en 1R1C-modell, där värmeförluster och värmelagringsförmåga beskrivs genom två centrala byggnadsparametrar. Dessa parametrar skattas från historiska mätdata med hjälp av både en steady-state-modell och en tidsdiskret RC-modell, vilket försäkrar att byggnadens termiska parametrar bestäms på ett realistiskt sätt.

De skattade parametrarna används därefter i en framåtblickande optimering där uppvärmningseffekten bestäms med hänsyn till fjärrvärmenätets aktuella belastning. Optimeringen styrs utefter nätets behov, när nätet upplever en effekttopp reduceras byggnadens uppvärmning, och när belastningen är låg tillåts en högre effekt. Optimeringen genomförs med Python-biblioteket GEKKO och inkluderar byggnadens värmedynamik, komfortbegränsningar för inomhustemperaturen samt begränsningar för tillåten uppvärmningseffekt. Styrningen sker med ett rullande tidsperspektiv, vilket betyder att endast den första timmen av den optimerade styrsignalen implementeras innan modellen uppdateras och optimeras på nytt. Resultatet blir en nätanpassad effektprofil för uppvärmning, vilken jämförs med den historiska profilen. Denna profil används sedan i den fortsatta systemanalysen för att studera hur laststyrningen påverkar produktionen i fjärrvärmesystemet. Modellens prestanda säkerställs genom validering mot uppmätta temperaturdata. Hur modellen tillämpas på den aktuella byggnaden och hur effektreduktionsprofilen integreras i scenarioanalysen beskrivs tydligare i kapitel 4.

2.4.1 Motivering bakom RC-modell och MPC optimering

RC-modellen används i denna studie då det är en välbeprövad metod för att beskriva byggnaders termiska beteende och används ofta i forskning om energiprestanda, laststyrning och peak shaving. Enligt Wang et al. (2019) fångar RC-modeller byggnaders värmedynamik genom ett nätverk av termiska resistorer och kapacitanser, där parametrarna kan identifieras direkt från mätdata. Wang förklarar även att en förenklad RC-modell kan ge tillräcklig noggrannhet för styrning och prediktion, samtidigt som de är beräkningsmässigt effektiva och robusta. Detta gör RC-modeller särskilt lämpliga för modellprediktiv styrning och analyser av laststyrning, vilket motiverar användningen av en 1R1C-modell i denna studie.

Implementationen av MPC valdes då det är en styrstrategi baserad på mycket forskning och som fungerar utmärkt för byggnadsapplikationer. Enligt Drgoňa et al. (2020) har MPC blivit en dominerande metod inom avancerad byggnadsstyrning tack vare dess förmåga att kombinera prediktiva modeller med optimering över en rullande horisont. MPC kan hantera både dynamiska system, komfortbegränsningar och externa parametrar såsom väderprognoser, vilket gör metoden särskilt lämpad för denna studie gällande reducering av effekttoppar genom laststyrning. Det positiva med MPC-styrning är dess hantering av begränsningar och förmåga att optimera baserat på framtida tillstånd, vilket gör den till en lämplig metod för peak shaving i byggnader. Trots att MPC är forskningstät och väl stärkt av många referenser nämner Drgoňa att metodens implementationer rent praktiskt är få och inte särskilt välbeprövade.

2.4.2 Uppskalning av Mälarenergis kundbas

Effektreduktionsresultaten från den modellerade byggnaden översätts till systemnivå genom att anta att byggnadens lastmönster och flexibilitet är representativa för en bredare kundgrupp. Genom att använda kundstatistik bestäms byggnadens relativa effektreduktion efter hur stor del av kundbasen den motsvarar, och samma procentuella reduktion appliceras på övriga kunder inom samma segment. Metoden bygger på att liknande byggnader antas ha liknande värmedynamik, komfortkrav och möjlighet till flexibilitet. Andelen levererad effekt från Mälarenergi till flerbostadshus var 38 % och kommer därför appliceras vid uppskalning till systemnivå, detta tydliggörs i avsnitt 4.2.4.2.

För att analysera hur olika implementeringsgrader påverkar systemet används scenarier där 20, 50 och 100 procent av energibehovet inom segmentet flerbostadshus antas ingå i laststyrning. Dessa kombineras med två olika temperaturintervall från byggnadsmodellen för att skapa möjliga framtida tillstånd. Deltagandenivåerna 20, 50 och 100 procent valdes för att representera låg, medelstor och full implementering av laststyrning i kundsegmentet flerbostadshus.

2.5 Systemoptimering av produktion

Systemoptimeringen utgör del två av metoden och syftar till att undersöka hur den reducerade effekten från byggnadsnivån påverkar Mälarenergis produktionssystem. Momentet genomförs med hjälp av EO3, som är Mälarenergis interna verktyg för driftoptimering av fjärrvärmeproduktion. EO3 används dagligen i verksamheten och är utformat för att simulera och beräkna den optimala driften av produktionen efter en viss värmelast. Modellen tar hänsyn till varje produktionsenhets tekniska begränsningar, bränslekostnader, verkningsgrader, start- och stoppkostnader samt möjligheten att producera el i kraftvärmeverket. Genom att kombinera dessa faktorer kan EO3 generera en produktionsplan som uppfyller värmebehovet till lägsta möjliga kostnad.

EO3-optimeringen genomförs genom att varje deltagandegrad körs separat men med samma övergripande arbetsgång. För varje period, höst, vinter och vår, skapas tre olika lastprofiler som motsvarar 20, 50 och 100 procent deltagande i laststyrningen. Dessa profiler används

som indata i EO3, där optimeringen körs med en tvåtimmars stegvis upplösning för att begränsa beräkningstiden. När samtliga scenarier har optimerats jämförs resultaten med ett basfall där EO3 körs med den historiska lasten. Jämförelsen används för att bedöma hur deltagandegraden påverkar systemets drift, genom förändringar i spetslastbehov eller produktionsfördelning.

De tre analysperioderna valdes för att representera tre olika driftförhållanden under tre årstider. Perioderna är en månad långa och sträcker sig över januari månad, 11 april – 11 maj och slutligen också oktober månad. Perioderna är tillräckligt långa för att ge stabila och pålitliga resultat men också tillräckligt korta för att möjliggöra en detaljerad modellering och optimering. Dessa perioder valdes eftersom de bedömdes ge de mest intressanta jämförelserna mot basfallet ur ett effektreduceringsperspektiv, med tydliga variationer i värmebehov och därmed flexibilitet.

2.6 Förslag till utveckling av besparingsterm

Den sista delen av metoden består i att justera en prismodell för att skapa ekonomiska incitament för kunder att delta i laststyrning. Detta utförs genom att låta en kostnadsterm representera systemnyttan från systemoptimeringen, som ett värde per reducerad kilowatt effekt. Detta värde används som grund för att utforma en tariffstruktur som belönar kunder proportionellt efter deras flexibilitet och bidrag till systemnyttan. Detta kommer därefter appliceras på en befintlig prismodell hos Mälarenergi där man delar upp den kvantifierade systemnyttan som finns kvar mellan Mälarenergi och kund efter att installations- och administrationskostnader täckts. På så sätt behålls kopplingen mellan pris och systemnytta, samtidigt som prismodellen blir rättvis och enkel att förstå.

2.7 Metodbegränsningar

Metoden som används i denna studie bygger på flera nödvändiga förenklingar och antaganden, vilket innebär att resultaten bör tolkas med viss försiktighet. RC-modellen som beskriver byggnadens värmedynamik utgår från en 1R1C-struktur och faktorer såsom solinstrålning, ventilationsflöden och icke-linjära värmeförluster bestäms som en gemensam term (Q_{passiv}) i optimeringen. Modellen fångar därmed byggnadens övergripande beteende men kan avvika från verkligheten i situationer där dessa faktorer spelar en större roll. Detta påverkar framför allt uppskattningen av byggnadens värmelagringsförmåga och därmed den flexibilitet som modellen identifierar.

En annan begränsning är antagandet att kunder accepterar de temperaturvariationer som modellen tillåter och att deras beteende är relativt homogent inom vald byggnadskategori. I praktiken kan komfortkrav, styrsystem och användningsmönster skilja sig åt betydligt mellan olika fastigheter, vilket innebär att den flexibilitet som modellen beräknar inte nödvändigtvis är fullt realiserbar i alla byggnader. Även uppskalningen till systemnivå bygger på antagandet att den valda exempelbyggnaden är representativ för hela kundkategorin. Variationer i byggnadsstandard, renoveringsgrad, styrstrategier och tekniska installationer kan därför leda till att den verkliga flexibilitetspotentialen blir något högre eller lägre än vad modellen visar.

Produktionsoptimeringen i EO3 baseras på historiska driftmönster, bränslepriser och elpriser, vilket innebär att resultaten främst speglar dagens förutsättningar. Om framtida prisnivåer eller produktionsförutsättningar förändras kan även systemnyttan av laststyrning förändras. Trots dessa begränsningar ger metoden en robust och praktiskt användbar uppskattning av den övergripande potentialen för kundbaserad effektreduktion i Mälarenergis fjärrvärmesystem och utgör därmed ett relevant underlag för både tekniska och ekonomiska analyser.

De tre analysperioderna representerar inte hela årets variationer, vilket innebär att resultaten bör tolkas som periodbaserade snarare än heltäckande.

3 ÄMNESMÄSSIG REFERENSRAM

Detta kapitel presenterar den teoretiska referensram som ligger till grund för examensarbetet. Syftet är att samla, strukturera och analysera relevant forskning och teori för att motivera val av metod, modelluppbyggnad och de antaganden som används i studien. Referensramen omfattar framförallt litteratur kring prissättning av fjärrvärme samt modellering och simulering av laststyrning hos kund med målet att öka effektflexibiliteten. Tidigare forskning ligger till grund för hur modellen konstrueras och hur de olika laststyrningsscenarierna utformas och analyseras.

Avsnittet tydliggör även vilka faktorer som är särskilt viktiga vid utformning av prismodeller, möjligheter till laststyrning, systemnytta och flexibilitet samt tekniska begränsningar. Dessa teoretiska utgångspunkter ligger sedan till grund för det fortsatta genomförandet av examensarbetet.

3.1 Fjärrvärmens roll i energisystemet

Den globala energiomställningen ställer höga krav på energisystem vilket gör fjärrvärme till en viktig del av dagens moderna energisystem då effektiv storskalig uppvärmning av diverse byggnader, såsom bostäder och lokaler, möjliggörs samtidigt som möjligheten till varierande värmekällor är stor. Omställningen drivs av effektiviseringsbehovet, lägre klimatpåverkan och en mer koldioxidsnål ekonomi. Fjärrvärmens roll i energisystemet kan förtydligas genom förklaringen av fjärrvärmens olika generationer och utveckling. Näten började med att vara ångbaserade med stora värmeförluster i slutet av 1800-talet för att sedan successivt utvecklas till femte generationens framväxande lågtemperaturnät med integrering av fördelaktiga material, styrning och betydligt lägre temperaturer. Detta har stor systembetydelse genom bland annat möjlighet till användning av spillvärme, solvärme och andra lågtempererade resurser som tidigare inte nyttjats, samtidigt som distributionsförluster och kapacitetsbehov minskar (Perea-Moreno et al., 2026).

Vanligtvis är dagens fjärrvärmesystem uppbyggda av en kombination av produktionsenheter med mål att täcka olika delar av värmebehoven. Baslastproduktion utgör grunden i energisystemet och utnyttjas ofta i största möjliga utsträckning. Vanligt förekommande bränslen för denna typ av produktion är biobränslen och avfall som förbränns. När basproduktionen inte täcker efterfrågan används olika former av spetslast för att tillfälligt kompensera vilket vanligtvis sker vid kalla förhållanden när mycket effekt behövs. Värmepumpar och gas- och oljepannor brukar användas som spetsproduktion. Dessa blandningar av värmeproduktion ger möjlighet till optimering av produktionen utifrån kostnader, tillgängliga resurser och miljöpåverkan (Lund et al., 2025).

Elektrifiering av samhället i samtid med ökat nyttjande av förnyelsebara energikällor ställer stora krav på flexibilitet vilket fjärrvärmen anses vara en potentiell resurs för. Fjärrvärmesystemen kan bland annat bidra till flexibilitet genom att övergå till eldriven värmeproduktion när elpriserna är låga eller när belastningen av elnätet är låg. Likaväl kan värmeproduktionen minskas när behovet av el i andra sektorer är stort, vilket ofta möjliggör ökad elproduktion. Ytterligare flexibilitet kan uppnås med hjälp av termisk lagring på olika sätt. Värmelagring kan exempelvis ske på produktionssidan genom ackumulatortankar som

möjliggör varierad framledning av värme oberoende av aktuell värmeproduktion. Lagring av värme kan också ske på kundsidan med hjälp av byggnaders värmetröghet. För att effektivt uppnå flexibilitet genom dessa metoder är förutsägelse av värmebehovet nödvändigt för att säkerställa att värmebehovet tillgodoses på ett optimalt sätt (Lund et al., 2025).

3.2 Utveckling av prismodell och dess förändrade roll

Fjärrvärmesystem utvecklades traditionellt som lokalt ägda marknader med reglerade monopol med höga fasta kostnader och stabil efterfrågan, där huvudmålet var att prissättningen främst skulle säkerställa att alla kostnader och utgifter täcktes. Utveckling har gått ifrån det traditionella ursprunget och förändrats till att nu fungera som en blandning av reglerade och avreglerade marknader där nya aktörer driver konkurrenskraften och därmed en dyrare prissättning. Wang et al. (2021) menar att det finns i regel två metoder för prissättning av fjärrvärme, kostnadsplus och marginalkostnadsbaserad prissättning. Kostnadsplus har traditionellt dominerat i reglerade miljöer medan marginalkostnadsbaserad prissättning har blivit alltmer relevant i avreglerade sammanhang. Följande underrubriker undersöker hur kostnadsstruktur och effekttoppar har format prismodeller och drivit dess utveckling.

3.2.1 Hur kostnadsstrukturen påverkar utformningen av prismodeller

Fjärrvärmesystem är intensiva gällande kapital, med stora fasta kostnader i produktion och fjärrvärmenät. Detta motiverar användningen av tariffer som innehåller flertalet komponenter där energipris och effektavgift separeras. Li et al. (2015) genomförde en systematisk litteraturstudie för att undersöka de två olika metoderna för prissättning, kostnadsplus och marginalkostnadsbaserad prissättning samt deras för- och nackdelar. Slutsatsen som dras från studien är att metoden kostnadsplus anses vara enkel att använda och hantera och anses även som ett stabilt alternativ när det kommer till att driva in intäkter till leverantörer. Eftersom priset till största grad är fast så baseras vinsten på hur höga kostnader företaget redovisar och incitamentet till att sänka kostnader eller att bli mer effektiva anses obefintligt. Marginalkostnaden ansågs spegla rörliga produktionskostnader vilket skapar incitament till effektiv drift och flexibilitet. Dock anses denna prissättning mer komplex och kan skapa oro bland leverantörer när det kommer till att driva in intäkter. Denna studie tar också upp vikten av att använda en hybridmodell för prissättning, som balanserar stabilitet av intäkter och styrsignaler mot effekttoppar. Detta möjliggörs genom att kombinera fasta avgifter, rörliga kapacitetsavgifter och säsongsbaserade priser.

Song et al. (2017) utförde en undersökning av hur övergången från främst energibaserade tariffer till en modell med större inslag av effektbaserad prissättning, påverkar både kundernas kostnader och systemets förutsättningar till dimensionering. Genom att använda historiska prisdata, tillsammans med verkliga lastprofiler, kan olika tariffstrukturer simuleras för olika typer av byggnader. På detta sätt går det att analysera hur kostnaderna fördelas mellan kunder beroende på hur prissättningen är utformad. Detta gör det möjligt att bedöma om prissättningen speglar de faktiska kostnader som uppstår i fjärrvärmesystemet.

Undersökningen resulterade i att användning av en marginalkostnadsprissättning teoretiskt sett skulle öka kundens incitament till en mer effektiv energianvändning. Däremot att endast

använda sig av marginalkostnadsprissättning ansågs otillräckligt i fjärrvärmesystem eftersom den inte fångar upp de betydande fasta kostnader som uppstår till följd av effekttoppar. Dessa fasta kostnader dimensioneras efter effekttoppar snarare än total energianvändning över året. Studien syftar till att om priset endast skulle styras efter energianvändning, riskerar man att inte täcka kapacitetskostnaderna, samtidigt som kunder med höga effekttoppar inte påverkas av de systemkostnader som man bidragit med.
Studien resulterar även i att en ökad andel av effektbaserade tariffer skapar incitament till att sprida ut sin värmeanvändning och därav minska effekttoppar. Detta resulterar i att man inte längre är beroende av att överdimensionera nät och produktionsanläggningar som måste täcka väldigt höga toppbelastningar. På så sätt gynnas leverantörer genom att minska sin produktion med låg marginalkostnad. Med andra ord fungerar effektkomponenten inte enbart som en säkerhetsåtgärd för att täcka sina fasta kostnader, utan även som ett styrmedel för att bättre koppla prissättningen till de faktiska kostnaderna i systemet. Studien visar därmed hur fjärrvärmens kostnadsstruktur, som inkluderar stora fasta och effektberoende kostnader, påverkar och motiverar utformningen av prismodeller (Song et al., 2017).

I takt med ökad elektrifiering, teknikutveckling inom värmepumpar och högre krav på energieffektivitet har konkurrensen för fjärrvärme förändrats. Detta har gjort prismodellen till ett strategiskt verktyg snarare än bara ett kostnadssystem. Lygnerud & Yang (2024) utförde en fallstudie som bygger på data från två svenska byggnader med Mixed-Integer Linear Programming (MINLP-optimering), för att analysera en kombinerad drift bestående av fjärrvärme och värmepump. Dessutom innehöll studien en enkätundersökning bland fjärrvärmeleverantörer, samt känslighetsanalyser av olika prismodeller, exempelvis marginalpriser, tidsbaserade priser och effektpriser. Resultatet visar på att implementering av effektkomponenter i prismodeller har stor betydelse när det kommer till att minska belastningen vid höga effekttoppar, vilket sker genom att styra värmeanvändningen. Systemkostnaderna speglas även mer realistiskt och bidrar på så vis till jämnare lastprofiler. Resultaten pekar också på att olika kombinationer av rörliga energipriser och kapacitetsavgifter kan bidra till att bättre ta vara på flexibiliteten i systemet. Studien visar också att valet av prismodell påverkar hur riskerna fördelas. Den lägsta risken för fjärrvärmeleverantörer uppstår när fastighetsägaren investerar i värmepumpen, medan fjärrvärmeföretaget ansvarar för drift och styrning.

Däremot lyfter man i en annan studie om val av prissättningsmetod, med fokus på kostnadsplus eller marginalkostnadsbaserad prissättning, att en hög effektandel kan innebära en ökad ekonomisk osäkerhet för kunder med varierande belastning (Li et al., 2015). Detta är något som tydligt också tas upp av Mokhtari et al. (2025) som förklarar hur spetsproduktion, som ofta bara används under ett begränsat antal timmar per år, får effekttoppar med oproportionerligt stor ekonomisk påverkan. Dynamisk prissättning och efterfrågestyrning har därför identifierats som smarta verktyg för att reducera topplaster och minska systemkostnader.

3.2.2 Varför effekttoppar är avgörande för kostnader och investeringar

Effekttoppar är en av de avgörande faktorerna för hur fjärrvärmesystem dimensioneras och vilka investeringar som krävs. Detta grundar sig i att det inte är den totala årliga energianvändningen som brukar styra kostnaderna, utan den högsta belastningen.

Produktionen och distributionsnätet måste alltid kunna leverera till den timme då efterfrågan är som störst, även om denna nivå ofta inträffar endast ett fåtal timmar per år. Mokhtari et al. (2025) tydliggör hur effekttoppar kräver hög kapacitet i både produktion och distribution eftersom dimensioneringen av nät och anläggningar baseras på topplast, inte årsmedelvärden. Resultaten som konstateras är att även relativt små reduktioner av topplasten kan minska behovet av framtida investeringar i både produktionskapacitet och fjärrvärmenätsutbyggnad. I simuleringarna som gjorts konstaterades det att ett dynamiskt pris kunde ge en reduktion på topplasten med hela 84,4 %, vilket illustrerar hur styrning av värmebehov direkt påverkar investeringsbehoven.

Song et al. (2017) visar på liknande sätt att effekttoppar driver oproportionerligt höga systemkostnader. Spetslastanläggningar, som ofta har höga bränslekostnader och låg driftstid, aktiveras endast när systemet belastas som mest men står ändå för en betydande del av kostnaderna. Detta innebär att varje kilowatt i topplast får en mycket större ekonomisk påverkan än motsvarande energimängd under baslastperioder. Därför lyfter Song att prissättningsstrategier med effektkomponenter är ett effektivt sätt att styra bort från toppar och därmed minska behovet av överdimensionering.

Lygnerud & Yang (2024) framför att effekttoppar inte bara påverkar driftkostnaderna i fjärrvärmesystem, utan ökar även fjärrvärmebolagens risker. När fastighetsägare installerar värmepumpar och endast använder fjärrvärme under de kallaste timmarna på året uppstår kraftiga toppar i värmebehovet som är svåra att förutspå. Detta innebär att fjärrvärmebolaget tvingas dimensionera produktion och kapacitet för ett värmebehov som uppstår under mycket få timmar per år men som ändå måste kunna täckas.

3.2.3 Dynamisk prissättning som verktyg för att styra efterfrågan

Dynamisk prissättning lyfts ofta fram som ett av de mest effektiva sätten att påverka värmeanvändningen i fjärrvärmesystem. Grundtanken är att priset varierar i takt med systemets faktiska kostnader och belastning, vilket gör att kunderna får tydliga ekonomiska signaler om när det är mer eller mindre gynnsamt att använda värme. När priset speglar systemets behov kan efterfrågan flyttas i tid genom incitament.

Bai et al. (2022) visar hur detta kan utformas i praktiken genom att modellera fjärrvärmemarknaden med leverantörer som sätter timvisa priser och att kunder svarar genom att optimera sin värmeanvändning. Metoden bygger på en optimeringsmodell där leverantörens beslut och kundernas respons beräknas samtidigt, vilket gör det möjligt att analysera hur prissignaler faktiskt påverkar efterfrågan. Resultaten visar att dynamiska priser kan minska toppeffekter, reducera behovet av spetslast och samtidigt ge kunderna lägre genomsnittliga kostnader. En viktig slutsats är att byggnaders flexibilitet är avgörande för att prissignaler ska få markant påverkan.

Studien visar fortsatt att dynamisk prissättning har stor potential att stärka fjärrvärmens systemnytta genom att jämna ut belastningen, minska kostnader och skapa bättre förutsättningar för förnybar och flexibel produktion. Samtidigt framgår det att införandet kräver goda möjligheter till mätning av parametrar, styrsystem och förståelse för kundernas flexibilitet vilket gör att dynamiska prismodeller fortfarande är relativt ovanliga i praktiken (Bai et al., 2022).

3.2.4 Hur svenska prismodeller ser ut i praktiken

Svenska fjärrvärmeprismodeller har tagit ett tydligt steg ifrån schablonbaserade lösningar och rör sig i stället mer mot modeller som är kostnadsriktiga och mätbaserade. Jung (2016) syftar på att många företag under de senaste åren gått från generaliserade värden och fasta effektantaganden till prismodeller där kundens faktiska effektuttag, energiförbrukning och ibland även flödesprestanda ligger till grund för kostnaden. Studien bygger på intervjuer med sex större fjärrvärmeföretag och resulterade i att denna utveckling främst drivs av tre faktorer, ökad mätkapacitet, behovet av att spegla verkliga produktionskostnader samt konkurrensen från andra energilösningar. Rent praktiskt innebär detta att prismodellerna ofta kombinerar flera komponenter.

Ytterligare en analys av fjärrvärmemarknaden visar att dagens prissättning påverkas av ökad datatillgång, mer avancerad mätning och ett växande behov av att spegla verkliga kostnadsstrukturer i produktionen. I rapporten konstaterar man att fjärrvärmesektorn präglas av en ökad komplexitet och att företagen därmed behöver utveckla prismodeller som bättre hanterar varierande bränslepriser, elmarknadsvolatilitet och konkurrensen från alternativa värmelösningar (Energimarknadsinspektionen, 2023).

Mälarenergis prisändringsmodell illustrerar en vanlig struktur där energiavgiften är säsongsdifferentierad, medan effektavgiften baseras på uppmätt baseffekt och maxeffekt. Genom att låta energipriset variera över året, med högre pris för vintertid och lägre sommarpris, skapas incitament för kunderna att minska belastningen under perioder då produktionen är som dyrast. Samtidigt används flödespremier för att belöna god avkylning och därmed effektivare användning av nätet (Mälarenergi, 2025). Tabell 1–5 presenterar Mälarenergis fjärrvärmepriser för 2026 för stora fastigheter, grupphusanslutna småhus och mindre flerbostadshus.

Tabell 1 Rörligt fjärrvärmepris för stora fastigheter och grupphusanslutna småhus, Mälarenergi

Energipris	[kr/MWh] exkl. moms	[kr/MWh] inkl. moms
Spetsenergi	1336	1670
Basenergi	468	585
Sommarpris	196	245

Tabell 2 Grundavgifter stora fastigheter, Mälarenergi

Baseffekt [kW]	Fast avgift [kr/år]	Baseffekt [kr/kW och år]	Maxeffekt [kr/kW och år]	Överuttagsavgift [kr/kW och år]
0–24	400	1191	730	1460
25–79	2117	1119	730	1460
80–149	11 845	999	730	1460
150–249	32 324	863	730	1460
250–499	79 204	676	730	1460
>499	171 865	491	730	1460

Tabell 3 Grundavgifter gruppanslutna småhus, Mälarenergi

Baseffekt [kW]	Fast avgift [kr/år]	Baseffekt [kr/kW och år]	Maxeffekt [kr/kW och år]	Överuttagsavgift [kr/kW och år]
0–24	348	972	608	1216
25–79	1838	913	608	1216
80–149	9781	814	608	1216
150–249	26 496	703	608	1216
250–499	65 103	549	608	1216
>499	140 732	398	608	1216

Tabell 4 Rörligt fjärrvärmepris mindre flerbostadshus (2-4 lägenheter), Mälarenergi

Energipris	[kr/MWh] exkl. moms	[kr/MWh] inkl. moms
Jan-Feb, Dec	788	985
Mar-Maj, Sep-Nov	624	780
Jun-Aug	236	295

Tabell 5 Flödesavgift mindre flerbostadshus (2-4 lägenheter), Mälarenergi

Flödesavgift	[kr/m^3] exkl. moms	[kr/m^3] inkl. moms
Jan-Apr	1,60	2
Okt-Dec	1,60	2

Även andra större aktörer, som Stockholm Exergi, använde liknande principer när även de uppdaterade sin prismodell för 2025. Företaget motiverar förändringen med behovet av att anpassa prissättningen till nya marknadsförutsättningar, ökade kostnader och ett växande fjärrvärmesystem. Den nya modellen innebär justerade energi- och effektpriser som varierar med säsong och utomhustemperatur, vilket stärker incitamenten för kunder att reducera effektuttag under kalla perioder. Samtidigt betonas att prismodellen ska främja ett effektivt fjärrvärmesystem och vara transparent för kunderna (Stockholm Exergi, 2025).
Även detta lyfts fram som en central punkt i Jungs studie där flera företag beskriver att kunddialogen blivit viktigare i takt med att prismodellerna blivit mer komplexa (Jung, 2016). Stockholm Exergis normalprislista för fjärrvärme för 2025 med priser exklusive moms visas i tabell 6–8.

Tabell 6 Effektkostnad, Stockholm Exergi

Effektnivå [kW]	Effektavgift [kr/år]	Effektpris [kr/kW, år]
10–99	0	1142
100–499	3315	1107
500–999	97 030	920
1000–2499	229 740	786
≥2500	484 850	683

Tabell 7 Energikostnad, Stockholm Exergi

Period	Utetemperatur [°C]	Energipris [kr/MWh]
april-oktober november-mars	≥ -3	322 863
januari-december	< -3	1200

Tabell 8 Returtemperatur (nov-mar), Stockholm Exergi

Temperatur [°C]	Bonus/avgift [kr/MWh, °C]
< 37,5	-2
> 37,5	+2

Sammanfattningsvis ser man tydligt att utvecklingen av svenska fjärrvärmeprismodeller alltmer rör sig mot större kostnadsriktighet och ett tydligare fokus på effekt, men fortfarande inom ramarna för relativt stabila och förutsägbara strukturer. Mer avancerade och dynamiska prismodeller förekommer, men används än så länge sparsamt. Det beror ofta på praktiska hinder som krav på mer detaljerad mätning, behov av tydligare kundkommunikation och att systemen måste kunna hantera mer komplex styrning. Resultatet är att marknaden befinner sig i ett slags mellanläge där traditionella prismodeller fortfarande dominerar, men kompletteras allt oftare med styrsignaler som ska uppmuntra flexibilitet, samtidigt som branschen värnar om transparens och långsiktig stabilitet (Jung, 2016).

3.3 Laststyrning av byggnader och dess roll i fjärrvärmens flexibilitet

I takt med att fjärrvärmesystem utvecklas, blir mer komplexa och integreras i bredare energisystem ökar behovet av flexibilitet, vilket bland annat kan ske genom styrning av efterfrågan. Byggnadsbaserad laststyrning inom fjärrvärme handlar om varierande värmeuttag från byggnader för att minska effekttoppar vilket jämnar ut belastningen. En stabilare last kan resultera i reducerade produktions- och investeringskostnader. I jämförelse till elsystem, där lagring kräver separat avancerad teknik, finns i värmesystem möjlighet till inbyggd flexibilitet i byggnaders termiska massa. Värme kan på så vis lagras temporärt i konstruktionen utan att den termiska komforten behöver påverkas nämnvärt.

3.3.1 Byggnader som termiska energilager

Byggnaders tröghet i konstruktionen skapar möjlighet att förskjuta värmeuttaget genom en temporär sänkning och ökning. Tidigare studier menar att byggnader som termiska energilager utgör en av de största outnyttjade flexibilitetsresurserna inom fjärrvärme. Romanchenko et al. (2019) använder en produktionsmodell med integration av byggnadsuppvärmning och dynamiska fjärrvärmesystem genom sammansättning av två olika optimeringsmodeller. Byggnadernas värmebalans modelleras utifrån termiska zoner och

kopplas till ett sammansatt system med fjärrvärmeproduktionen. Resultatet visar att ungefär 6 % av de representativa flerbostadshusens årliga totala värmebehov kan flyttas och att effekttoppar kan reduceras med upp till 18% med hjälp av byggnadernas tröghet vid en tillåten variation av inomhustemperaturen på endast 1 ℃. Studien förklarar även att antalet starter av spetslastpannor då kan minskas med 80 % vilket förklarar att små justeringar kan ge stora systemnyttor.

Liknande resultat presenteras i studien av Guelpa & Verda (2021) som baseras på en litteraturstudie kombinerat med simulering av olika strategier för styrning på efterfrågesidan (DSM) med både fysikbaserade modeller och black-box metoder. Studien visar att laststyrning utifrån nyttjandet av byggnaders termiska massa kan ge upp till 30% lägre effekttoppar, dubblering av lastfaktorn och potentiellt minska det primära energibehovet med 5%. Dessa positiva effekter möjliggörs genom att flytta värmebehovet från timmar med hög belastning till timmar med låg belastning när hög tillgång på billig produktion finns tillgängligt.

3.3.2 Direkta styrstrategier för laststyrning

Direkt laststyrning av byggnader, vilket möjliggörs av den termiska trögheten, kan utföras på några olika sätt. Direkt styrning innebär att tillförseln av värme aktivt regleras av leverantören eller ett automatiserat styrsystem. Avancerade optimeringsmetoder är vanligt förekommande vilket bland annat används i arbetet av Karasu et al. (2024) där en matematisk optimeringsmodell, vid namn Mixed-Integer Linear Programming (MILP), utvecklats för att reglera radiatorventiler i realtid. Modellen optimerar värmetillförseln av byggnader för att minska energianvändning och kostnader, reducera koldioxidutsläpp och kapa effekttoppar genom att generera optimala scheman för förvärmning. Studien visar att betydande resultat kan uppnås genom laststyrning. Upp till 17 % reduktion av kostnader och utsläpp är möjligt men tydliga begränsningar lyfts också. MILP-modellen övergår snabbt till beräkningsmässigt tung vid modellering av stora system, vilket tvingade författarna av studien att ta fram genetiska algoritmer för att hantera realistiska fall. Detta förklarar både styrkan och utmaningen med optimeringsbaserad laststyrning som ger hög precision men kräver effektiv modellformulering.

Laststyrning undersöks på liknande sätt i studien av Håkansson et al. (2024) som använder en economic model predictive control (EMPC) tillsammans med en grey-box modell av byggnadens värmedynamik. EMPC optimerar värmetillförseln för en bestämd framtid och balanserar energianvändning i relation till effekttoppar. Studien visar att 10–20% effektkapning anses uppnåeligt med endast något ökad total energianvändning. Återigen påvisar studierna att byggnader kan användas som energilager utan att komforten påverkas nämnvärt vid användning av direkt laststyrning för att reglera värmebehovet. Även denna optimeringsmetod har begränsningar. En av de viktiga utmaningarna är att EMPC är känsligt för kvaliteten av modellen som kräver noggrann identifiering av parametrar. Dessutom hanterar EMPC främst kontinuerliga variabler som gör det svårare att modeller diskreta beslut som start/stopp och kapacitetsgränser.

En EMPC modell optimerar utifrån ett ekonomiskt perspektiv och fokuserar därför på att minimera kostnader och maximera intäkter. Detta resulterar i att optimeringen inte tar hänsyn till att hålla komfortkrav inne i byggnaden, vilket är viktigt för vår aktuella studie.

Därför kommer vi använda en MPC modell som fungerar på liknande sätt som en EMPC-modell men där optimeringen fokuserar på att minimera effektkurvor, samtidigt som man håller inomhustemperaturen inom valt komfortintervall.
Studierna av Karasu et al. (2024) och Håkansson et al. (2024) visar sammantaget att optimeringsbaserad direkt laststyrning är effektiv, men att metodvalet påverkar både precision och beräkningsmöjligheter. MILP är särskilt lämpat när både kontinuerliga parametrar och diskreta beslut behöver modelleras. Optimeringsmetoden är även användbar när systemet har kapacitetsbegränsningar och effekttoppar samt när styrningen ska integreras i en produktionsoptimering eller andra större energisystem.

3.3.3 Laststyrningens begränsningar

Guelpa et al. (2019) förklarar att tekniska begränsningar påverkar resultatet av laststyrningen. Eftersom fjärrvärmenätet har stor termisk tröghet blir inte påverkan från styrningen av lasten linjär eller direkt. Begränsningarna handlar delvis om att fjärrvärmenätens storlek medför långa transporttider vilket bidrar till tröghet. Andra begränsningar handlar om termiska förluster i ledningar och att vatten med olika temperaturer blandas i ledningarna. Även de stora vattenvolymerna som ett fjärrvärmenät innehåller gör att effekten av laststyrning kan bli fördröjd och dämpad eftersom temperaturförändringar då sprids långsamt.

Att implementera laststyrning innebär inte bara tekniska utmaningar utan också utmaningar kring kundens beteende och acceptans till att justera värmetillförseln från leverantören. Den faktiska storleken på flexibilitet som kan uppnås i en byggnad beror på kundens komfortpreferenser, beteende och tillåtelse till minskad kontroll. Även om det tekniska perspektivet pekar på att byggnader kan användas som effektiva termiska energilager, är det kundens vilja att delta och tolerans till temperaturvariation som till stor del avgör det faktiska utfallet. Studier visar att många användare accepterar mindre variationer av inomhustemperaturen så länge komforten inte påverkas nämnvärt. Bai et al. (2022) förklarar att kunder kan tillåta avvikelser av inomhustemperaturen när ekonomiska incitament finns, så länge variationerna är begränsade.

Guelpa et al. (2019) förtydligar ovanstående begränsning då endast ungefär en tredjedel av studiens undersökta byggnader kunde laststyras på grund av brist på avtal som tillät schemaändringar. Den andra stora begränsningen som understryks i studien är beroendet av deltagarantalet för att uppnå en betydande toppreducering. När endast en mindre andel (30 %) av byggnaderna deltar i laststyrningen blir minskningen av toppeffekt låg (5 %). För att uppnå markanta resultat kan större delar av användarna komma att behöva delta i kombination med att större tidsförskjutningar av lasten tillåts. Denna begränsning har tagits i beaktande i detta examensarbete genom att även scenarion där stora delar av Mälarenergis kundbas deltar undersöks.

3.4 Systemnytta av flexibilitet och effektreduktion i fjärrvärme- och kraftvärmesystem

Systemnytta innebär optimerad drift och lägre investeringskostnader inom energisystemet. Detta kan uppnås lokalt inom kraftvärmeverket eller på kundnivå. När det kommer till systemnytta inom fjärrvärme- och kraftvärmesystem pratar man oftast om att reducera effekttoppar, öka produktionsflexibiliteten och att man på ett effektivt sätt utnyttjar den befintliga infrastrukturen.

3.4.1 Systemnytta genom optimerad drift och lastfördelning i kraftvärmeverk

I takt med att elsystemet blir mer ansträngt under kalla vinterdagar och effektbehovet ökar, har kraftvärmeverkens roll som flexibel resurs fått allt större uppmärksamhet. Fjärrvärmesektorn har traditionellt setts som trög när det kommer till rörlighet och förändring av distributionsbehov. Däremot med modern styrning, förbättrad mätning och avancerade optimeringsmetoder är det idag möjligt att anpassa produktionen på ett sätt som både stärker elsystemets stabilitet och minskar behovet av fossil spetslast.
Wang et al. (2021) undersöker hur kraftvärmeverk kan bidra till systemnytta genom att optimera sin drift för att nå effektreduktioner under perioder med hög belastning i elsystemet. Studien bygger på en detaljerad modellering av ett kraftvärmeverk med flera enheter, där Particle Swarm Optimization (PSO) testar många möjliga lösningar samtidigt och rör sig mot bättre och bättre alternativ genom att hela tiden jämföra sina tidigare resultat mot de bästa resultaten som andra partiklar har hittat. Genom att låta algoritmen iterativt justera lastfördelningen mellan enheterna kunde Wang bedöma hur mycket elproduktion som kan reduceras utan att värmeleveransen påverkas negativt. Viktigt att nämna är att studien endast går ut på att undersöka hur mycket flexibilitet som kan uppnås inom elsystem och därför läggs ingen tyngd på lönsamheten inom produktionen. Resultaten visar att kraftvärmeverket i vissa perioder kan minska sin elproduktion med över 20 %. Denna flexibilitet skapar systemnytta genom att minska behovet av dyr spetslast och kan därmed frigöra kapacitet i elsystemet under kritiska timmar. Studien visar dessutom att optimerad drift kan skapa stor klimatnytta, då minskad spetslast, som ofta består av olja och naturgas, leder till lägre utsläpp. Wang konstaterar att cirka 220 000 ton CO_2 utsläpp kan reduceras per värmesäsong, vilket visar hur flexibilitet i kraftvärmeproduktion inte bara är en optimeringsfråga, utan en systemfråga med betydande samhällseffekter. Det som är positivt med metoden är att den tar hänsyn till både tekniska begränsningar och driftmässiga möjligheter, vilket gör resultaten relevanta för energibolag som vill förstå hur mycket kapacitet som kan frigöras genom optimerad styrning.

EO3 är ett annat sätt att nå systemnytta genom produktionsoptimering. EO3 är ett produktionsoptimeringsverktyg som är anpassat för både kort- och långsiktiga simuleringar samt omfattande scenarioberäkningar inom kraftvärmeproduktion. Programmet bygger på mixed-integer-programmering, vilket gör det möjligt att modellera produktionsscenarier med hög precision. Genom sina låga beräkningstider kan EO3 genomföra detaljerade simuleringar av ett kraftvärmeverks drift på kort tid, samtidigt som produktionen optimeras utifrån ett ekonomiskt och energibesparande perspektiv (Energy Opticon, u.å). Denna studie kommer därför gynnas av att använda EO3:s mixed-integer-programmering snarare än PSO-optimering, som i stället bygger på stokastisk sökning och därför inte erbjuder samma

precision eller garanti för optimalitet. EO3 är därmed särskilt väl lämpat för en studie där små förändringar i lastprofilen kan få betydande konsekvenser för både driftmönster och kostnadsutfall.

3.4.2 Systemnytta genom ekonomiskt optimerad peak shaving

Systemnytta i kraftvärmesystem handlar inte enbart om teknisk flexibilitet, utan om hur olika åtgärder påverkar hela energisystemets kostnader, kapacitetsbehov och klimatpåverkan. Wang et al. (2023) går djupt in på systemnytta-perspektivet genom att analysera de ekonomiska konsekvenserna av olika tekniker för peak shaving i kraftvärmesystem. Denna studie använder en metod där både marginalkostnader, investeringskostnader och påverkan på elproduktionen vägs samman och utvärderas rent ekonomiskt. Metoden bygger på att beräkna den marginalkostnad som uppstår när kraftvärmeverket reglerar sin elproduktion, för att sedan jämföra detta med kostnader och intäkter från olika tekniska lösningar såsom elpannor, direkt ångextraktion, absorptionsvärmepumpar och elektriska värmepumpar.
Studien visar att tekniker som kombinerar värmeåtervinning med värmepumpsdrift ger störst systemnytta, eftersom detta ger upphov till stor effektreduktion utan att begränsa värmetillförseln. Elektriska värmepumpar lyfts fram som särskilt effektiva, då de både kan öka värmeproduktionen och frigöra el-kapacitet under perioder med hög belastning. En viktig poäng i studien är att systemnytta inte bara handlar om teknisk flexibilitet, utan också om hur den påverkar hela energisystemets kostnader och framtida investeringar. Det räcker alltså inte att en teknik kan reglera värme eller el, den måste också göra det på ett sätt som är ekonomiskt hållbart. I analysen framgår det också att elpannor bidrar med flexibilitet, men till en betydligt högre kostnad. Studien understryker därmed hur avgörande det är att välja teknik utifrån både tekniska möjligheter och ekonomiska konsekvenser, snarare än att enbart fokusera på reglering och drift (Wang et al., 2023).

Ju et al. (2024) stärker de slutsatser som Wang et al. (2023) presenterar. Detta görs exempelvis genom att visa att värmepumpslösningar i kombination med spillvärmeutnyttjande ger betydande systemnytta genom att både minska elbehovet i elsystemets mest ansträngda timmar och samtidigt öka den totala verkningsgraden i värmeproduktionen. Detta stämmer bra överens med Wangs slutsats om att tekniker som kombinerar värmeåtervinning och värmepumpsdrift är de mest kostnadseffektiva alternativen för peak shaving.

För att knyta dessa resultat till Mälarenergis system är det relevant att notera att flera av de tekniker som diskuteras i litteraturen är direkt applicerbara. Mälarenergi använder exempelvis både elpannor och värmepumpar i sin värmeproduktion, och har dessutom betydande möjligheter till värmeåtervinning genom rökgaskondensering. Detta innebär att de tekniker som Wang et al. (2023) och Ju et al. (2024) identifierat och som ger störst systemnytta inte bara är teoretiskt relevanta, utan fullt möjliga för Mälarenergis befintliga produktionsstruktur. Därmed blir resultaten särskilt betydelsefulla för att förstå vilka investeringar och driftstrategier som kan ge störst systemnytta i Mälarenergis fjärrvärmesystem.

3.4.3 Systemnytta genom termisk lagring i fjärrvärmenät

Ett tredje perspektiv som ger upphov till flexibilitet i fjärrvärmesystemet handlar om hur själva nätet kan användas som ett termiskt lager, där trögheten i ledningarna kan utnyttjas för att lagra och frigöra värme över dygnet. Detta är ett flexibilitetsperspektiv som denna studie med Mälarenergi inte kommer fullfölja, då fokus främst ligger på peak shaving och optimering av kraftvärmeverket.
Ju et al. (2024) bidrar med ytterligare ett perspektiv genom att visa på hur man kan använda fjärrvärmenätets termiska tröghet som ett energilager. Studien bygger på en numerisk modell av långa fjärrvärmeledningar, där simuleringar av temperaturdynamiken analysera för att undersöka hur mycket värme som kan lagras och frigöras internt i nätet. Modellen inkluderar både värmetransport, värmeförluster och tryckfall, och används för att studera hur temperaturvågor rör sig genom nätet vid olika driftstrategier. Resultaten visar att det är fullt möjligt att lagra betydande mängder värme i fjärrvärmenätet, utan extra investeringar. Denna lagring kan sedan användas för att avlasta kraftvärmeverket under perioder där elproduktion belastas kraftigt eller situationer där en låg värmeproduktion upplevs. Ju syftar på att den maximala värmelasten i anläggningen kunde ökas till 503 MW, och att värmeleveransen dessutom kan utökas även när elproduktionen ligger på en mycket låg nivå. Även vid den lägsta elproduktionen, 104 MW, kunde värmelasten fortfarande höjas ytterligare.

Genom att kombinera den numeriska modellen med PSO-optimering, kunde Ju också visa att värmelagringen ger störst nytta när den styrs aktivt över dygnet. På så sätt fungerar fjärrvärmenätet inte bara som en passiv infrastruktur, utan i stället som en rörlig och flexibel del av energisystemet där den termiska trögheten fungerar som ett effektivt och billigt värmelager. Studien visar att den lagrade värmen kan användas för att tillfälligt ersätta ordinarie värmeproduktion, vilket i sin tur frigör el-kapacitet under de timmar då elsystemet är som mest ansträngt. Det innebär att behovet av spetslast minskar, mer förnybar el kan integreras och att både el- och värmesystemet får en stabilare och mer robust drift (Ju et al., 2024).

3.5 Sammanfattande analys och identifierade forskningsluckor

3.5.1 Prismodell

För att summera forskningen av prismodeller så ser man att utvecklingen av prismodeller inom fjärrvärme rör sig mot ökad kostnadsriktighet, större fokus på effekttoppar och ett växande behov av att integrera flexibilitet i både produktion och efterfrågan. Studierna av Li et al. (2015), Song et al. (2017) och Jung visar att traditionella kostnadsplusmodeller inte längre speglar systemkostnaderna och att marginalkostnadsbaserade eller hybridmodeller bättre kan styra mot effektiv drift, särskilt när effektkomponenter införs. Samtidigt visar Lygnerud & Yang (2024) och Mokhtari et al. (2025) att värmepumpar och dynamisk prissättning skapar nya möjligheter att reducera topplaster, men också nya risker för fjärrvärmebolagen när kundernas beteende blir mer varierande och svårförutsägbart. Forskningen pekar tydligt på att effektbaserade tariffer och tidsdifferentierade priser kan minska belastningstoppar, förbättra systemnyttan och skapa incitament för flexibilitet, men

också att implementeringen i praktiken är begränsad av mätkapacitet, kundkommunikation och affärsmodellsrisker.

Trots att tidigare studier täcker omfattande delar av hur prismodeller kan utformas för att styra efterfrågan, så saknas fortfarande forskning som analyserar hur sådana prismodeller fungerar i ett specifikt fjärrvärmesystem med verkliga lastdata och lokala produktionsförutsättningar. De flesta befintliga modeller är generella, teoretiska eller utvecklade för andra marknader, vilket gör att deras resultat inte utan vidare kan överföras till svenska system med kraftvärmeproduktion, varierande kundstruktur och lokala effekttoppar. Det finns särskilda vetenskapsluckor kring analyser som kopplar samman kundbaserad laststyrning, verkliga värmelastprofiler och systemdrift i ett specifikt nät. Som sedan därefter utvärderar hur en prismodell kan utformas för att spegla den faktiska systemnyttan av flexibiliteten. Därmed finns ett tydligt behov av studier, likt denna, som kombinerar teknisk laststyrningsmodellering med en lokalt anpassad prismodellsanalys baserad på verkliga driftdata från ett svenskt fjärrvärmesystem.

3.5.2 Laststyrning

Kundbaserad laststyrning i fjärrvärmesystem handlar om att utnyttja byggnaders termiska tröghet för att möjliggöra en tidsbaserad förflyttning av värmeuttag för att minska effekttoppar. Tidigare studier visar att relativt små temperaturavvikelser kan medföra betydande fördelar, både för kunden och för värmeleverantören. Romanchenko et al. (2019) förklarar att dygnsvariationer kan jämnas ut med upp till 18% genom en temperaturvariation på 1°C och även minska starter av spetslastpannor med över 80%. Guelpa & Verda (2021) visar liknande resultat med upp till 30% lägre effekttoppar. För att dessa resultat ska kunna genomföras behövs någon typ av styrstrategi. Styrningen kan ske direkt genom optimerad reglering från leverantören eller indirekt genom prismodeller. Direkt styrning kan enligt Håkansson et al. (2024) minska effekttoppar med 10–20% utan nämnbar komfortpåverkan medan dynamisk prissättning, enligt Bai et al. (2022), också visat sig kunna styra kundens värmeuttag och öka flexibiliteten i nätet.

Forskningsluckorna handlar främst om simuleringarnas möjlighet till generalisering. Eftersom Mälarenergis fjärrvärmesystem och tillhörande är kunder unikt, precis som systemen som tagits till hänsyn i studierna som analyserats, krävs specifik anpassning till just dessa system. Dessutom studeras ofta direkt styrning från leverantör och indirekt styrning genom ekonomiska incitament separat, vilket lämnar en kunskapslucka kring resultatet för kombinerade strategier.

3.5.3 Systemnytta

Den samlade forskningen visar att flexibilitet i kraftvärme- och fjärrvärmesystem kan skapa betydande systemnytta på tre sätt, optimerad drift, ekonomiskt motiverad effektreduktion och utnyttjande av termisk lagring i infrastrukturen. Studierna av Wang et al. (2021), Wang et al. (2023) och Ju et al. (2024) visar att kraftvärmeverk kan frigöra stora mängder el-kapacitet genom smart lastfördelning, värmeåtervinning och styrning av värmeproduktion över dygnet. Optimerad drift kan minska elproduktionen med över 20 % utan att värmeleveransen påverkas, vilket både reducerar behovet av spetslast och minskar utsläppen av CO_2. Ekonomiska analyser visar samtidigt att alla flexibilitetslösningar inte är lika

värdefulla, tekniker som kombinerar värmepumpar och värmeåtervinning ger störst systemnytta eftersom de både ökar värmeproduktionen och minskar elbehovet under kritiska timmar, medan exempelvis elpannor ger flexibilitet men till en högre kostnad. Slutligen visar Ju et al. att fjärrvärmenätets termiska tröghet kan användas som ett effektivt och nästan kostnadsfritt värmelager, vilket ytterligare förstärker möjligheten att avlasta kraftvärmeproduktionen och skapa flexibilitet i elsystemet.

Trots betydande framsteg inom forskning om fjärrvärmeflexibilitet finns tydliga forskningsluckor som motiverar utförandet av denna studie. För det första saknas analyser som tydligt kopplar samman teknisk flexibilitet på kundsidan, systemeffekter inom produktion och ekonomiska incitament i en och samma studie. Befintliga studier behandlar ofta dessa delar separat, vilket gör att den faktiska systemnyttan av kundflexibilitet blir otydlig och svår att kvantifiera. För det andra är forskning om kundflexibilitet fortfarande begränsad, trots de stora möjligheterna till att effektivisera fjärrvärmesystemet. De flesta studier fokuserar på produktionsoptimering eller lagrings-området, medan kundernas roll som aktiva flexibilitetsresurser är relativt outforskat. För det tredje saknas metoder som översätter systemnyttan till praktiska och rättvisa ekonomiska incitament. Ofta när tekniska flexibilitetspotential identifieras så saknas fortfarande en tydlig koppling mellan denna potential och hur besparingen kan fördelas mellan energibolag och kunder på ett rättvist sätt. Dessa forskningsluckor motiverar behovet av en studie som inte bara analyserar flexibilitetens tekniska potential, utan även kvantifierar dess systemeffekter och utvecklar ett förslag till prismodellsjustering som skapar ekonomiska incitament för kunder.

4 AKTUELL STUDIE

I detta kapitel tillämpas den modell som utvecklats i metodavsnittet på en lägenhetsbyggnad inom Mälarenergis fjärrvärmenät. Syftet är att visa hur metoden fungerar i praktiken och hur de olika stegen, från databehandling till MPC-optimering, samspelar för att generera de effektreduktionsprofiler som senare används i uppskalningen och systemanalysen. Kapitlet utgör därmed en koppling mellan den teoretiska modellen och de resultat som analyseras i senare delar av arbetet. Modelleringen och optimeringen av den enskilda byggnaden har utförts i Python och är baserad på modellen skapad av Cederblad & Dahlberg (2022). Anpassningar och vidareutveckling har utförts för att uppnå denna studies mål.

Programmeringsdelen för laststyrningen finns uppladdad på GitHub.

4.1 Studieobjekt

Studieobjektet i denna studie består av tre sammanhängande delar som tillsammans beskriver hur laststyrning på byggnadsnivå kan påverka både fjärrvärmesystemets drift och de ekonomiska förutsättningarna för att implementera denna styrning. Arbetet utgår från ett flerbostadshus i Mälarenergis fjärrvärmenät som valts som representativ byggnad för att spegla värmedynamiken hos en typisk kund i flerbostadshussegmentet. Byggnaden studeras under tre perioder, en höstperiod (oktober 2025), en vinterperiod (januari 2026) och en vårperiod (april-maj 2025), vilka tillsammans representerar olika driftförhållanden och lastnivåer under året. Dessa perioder utgör grunden för att analysera hur byggnadens värmebehov kan förändras när uppvärmningen tillåts variera inom valda komfortgränser.

Den andra delen av studieobjektet utgörs av Mälarenergis produktionssystem, där fokus ligger på hur förändrade effektkurvor hos kunder påverkar produktionsfördelningen mellan baslast, kraftvärme och spetslast. Genom att använda de effektreduktionsprofiler som genereras på byggnadsnivå kan systemet analyseras under olika antaganden om kunddeltagande. Detta möjliggör en bedömning av hur reducerade effekttoppar påverkar systemets flexibilitet och behov av spetslastproduktion.

Den tredje delen av studieobjektet består av Mälarenergis prismodell för fjärrvärme. Här undersöks hur en justering av befintlig prismodell kan utformas för att skapa ekonomiska incitament för kunder att delta i laststyrning. Prismodellen analyseras utifrån hur den kan spegla värdet av reducerad toppeffekt och samtidigt vara begriplig för kunder och ekonomiskt hållbar för leverantören.

Studieobjektet avgränsas till att endast bestå av en representativ byggnad, tre tidsperioder, samt produktionsoptimering på systemnivå. Nätförluster, energianvändning över längre tidsperioder och beteendeförändringar hos kunder ingår inte i analysen. Tillsammans utgör dessa tre nivåer studieobjektet som studien analyserar.

4.2 Modellering av laststyrning

4.2.1 Parameteridentifiering för den aktuella byggnaden

För att modellen ska kunna beskriva byggnadens värmedynamik krävs att dess centrala parametrar skattas från mätdata. Detta sker i två steg, först med hjälp av en Degree day model (DDM) och därefter en tidsdiskret RC-modell (TCM). Tillsammans ger dessa modeller en fullständig beskrivning av byggnadens beteende.

4.2.1.1 Degree day model (DDM)

DDM förutsätter att byggnader är i termisk jämvikt, vilket innebär att summan av tillförd värme och passiva värmetillskott balanserar värmeförlusterna, baserat på skillnaden mellan inom- och utomhustemperatur. Baserat på de fysikaliska förhållandena, har följande formel använts:

$$Q_{SH} + Q_{\text{passive}} = R(T_{in} - T_{ext}) \quad (1)$$

(Cederblad & Dahlberg, 2022).

DDM-kurvanpassningen gjordes genom funktionen DDMcurvefit(), som använder minstakvadratmetoden (least squares method) för att anpassa modellen till mätdata och skattar på så vis värmeförlustkoefficienten R och det passiva värmetillskottet Q_{passive}. Parametrarna R och Q_{passive} står för hur snabbt byggnaden förlorar värme och hur mycket intern värme som tillförs från till exempel elektronik och människor. Anpassningen genomförs på ett rullande fönster om 168 timmar, där mätdata för Q_{SH}, Q_{DHW}, T_{ext} och T_{in} används som indata.

4.2.1.2 Thermal capacity model (TCM)

För att beskriva byggnadens dynamiska beteende används en tidsdiskret RC-modell (TCM) (Cederblad & Dahlberg, 2022). Temperaturutvecklingen i koden ges av:

$$T_{in}(t+1) = T_{in}(t) + \frac{R\big(T_{ext}(t) - T_{in}(t)\big) + Q_{SH}(t) + Q_{\text{passive}}}{C} \quad (2)$$

Här representeras C som byggnadens effektiva värmekapacitet och är den parameter som styr hur snabbt inomhustemperaturen förändras vid en given värmebelastning. Funktionen TCM() skattar C genom att minimera felet mellan simulerad och uppmätt inomhustemperatur. Vidare definieras tidskonstanten därefter som:

$$\tau = \frac{C}{R} \quad (3)$$

(Cederblad & Dahlberg, 2022)

En hög tidskonstant innebär att byggnaden reagerar långsamt på förändringar i värmetillförsel eller utomhustemperatur, vilket i sin tur innebär större flexibilitet för effektflyttning. Parametrarna uppdateras regelbundet under körningen, vanligtvis en gång per dygn, vilket gör modellen mer robust över längre perioder.

4.2.2 Modellvalidering

För att säkerställa att den framtagna modellen är tillräckligt noggrann genomförs en validering där simulerad inomhustemperatur jämförs med uppmätta värden. Detta sker genom ett annat läge i koden som undviker optimeringen och styrsignalen. I stället simuleras inomhustemperaturen i byggnaden framåt i tiden baserat på uppmätt initial innertemperatur, uppmätt värmeeffekt (Q_{SH}), passiva värmetillskott ($Q_{passive}$), utomhustemperatur och den framtagna RC-modellen. Med andra ord körs alltså modellen som en ren prediktionsmodell med fokus på jämförelse mellan beräknad och uppmätt innertemperatur. Valideringen genomförs genom att simulera:

$$T_{in}(t+1) = T_{in}(t) + \frac{R\big(T_{ext}(t) - T_{in}(t)\big) + Q_{SH}(t) + Q_{\text{passive}}}{C} \quad (4)$$

Alla termer är uppmätta eller identifierade förutom innertemperaturen. Utifrån detta kan modellens förmåga att beskriva byggnadens termiska respons utvärderas.

4.2.3 Genomförande av MPC-optimeringen

När parametrarna är identifierade och modellen validerad används parametrarna i en modellprediktiv styrning som optimerar uppvärmningen över en rullande tidshorisont via funktionen optimizerPeakshaving(). Modellen tränas först på tidigare mätdata för att sedan optimera uppvärmningen framåt. Endast den första timmen av styrsignalen används innan modellen rullas fram och optimeras på nytt. Detta arbetssätt motsvarar hur ett verkligt styrsystem skulle agera och gör att modellen kontinuerligt anpassar sig till förändrade förutsättningar.

4.2.3.1 Träningsperiod och horisont

Prediktionshorisonten valdes till 48 timmar och träningsperioden till 168 timmar vilket ligger i linje med slutsatser som Dhaliwal et al. (2026) framför i en studie med fokus på MPC för bostadshus. I studien undersöks hur olika prediktionshorisonter påverkar prestandan av modellen och horisonten presenteras som en av de mest betydelsefulla justerbara parametrarna för att möjliggöra proaktiv styrning och undvika effekttoppar genom exempelvis förvärmning. Studien visar därmed att horisontens längd har direkt påverkan på komfort och energibesparing.

I motsats till Dhaliwal et al. (2026), som varierar prediktionshorisonten som en designparameter utan koppling till väderprognosers tillförlitlighet, tar detta arbete hänsyn till att osäkerheten i väderprognoser ökar betydligt med tiden (SMHI, u.å). I detta fall används MPC-modellen i dåtid vilket gör att exakt mätdata gällande utomhustemperaturen finns tillgänglig men eftersom modellen även bör kunna användas framåt i tiden anpassas

prediktionshorisonten till väderprognoser. Därför används en horisont på 48 timmar i detta arbete, vilket balanserar möjligheten till proaktiv styrning mot begränsningar i tillgängliga väderprognoser och beräkningsbördan.

Vidare förklarar Dhaliwal et al. (2026) hur en sekventiell parameteruppskattning använts som gör att modellen kontinuerligt uppdateras med nya data under optimering. En funktionellt liknande typ av uppdatering av data används i detta arbete genom att införa en rullande träningsperiod för att modellen ska tränas på de senaste 168 timmarna (7 dygn) innan varje optimering. Dessa tillvägagångssätt syftar till att säkerställa att modellen är adaptiv och kan hantera varierade förutsättningar över tid i byggnaden och omgivningen. Valet av 168 timmar baserades dels på att återkommande beteenden, både helg och vardag, kan fångas när flera sammanhängande dygnscykler tas i beaktande, dels på en utvärdering av medelfelet mellan predikterad och mätt inomhustemperatur, vilket presenteras i avsnitt 5.1.1. Resultatet visar att medelfelet inte uppenbart förbättras eller försämras vid ökat antal timmar samtidigt som felet generellt är väldigt lågt (<1 %). Eftersom tillgängligheten av data är begränsad bör antalet timmar som används till träning även begränsas.

4.2.3.2 Optimeringsproblemets struktur

Framtagningen av optimeringsfunktionen i detta arbete liknar och bygger på principer som framförs i artiklarna av Guelpa et al. (2017) och Trabert et al. (2024), men har anpassats och generaliserats för att fungera på byggnadsnivå med förändrade lastprofiler.
Guelpa et al. använder en min-max-formulering i målfunktionen för att reducera effekttoppar i fjärrvärmenät med hjälp av justering av byggnaders värmebehov. Komfortbegränsningar införs också för att undvika oönskade temperaturavvikelser. Trabert et al. använder en liknande målfunktion, men den styr lasten mer direkt utifrån effekttoppar och syftar till att minska snabba variationer i värmeuttaget.

Liknande målfunktion och formulering av optimeringsproblemet, med vissa anpassningar, har använts i detta arbete med målet att minimera den högsta totala effekten under horisonten för att undvika effekttoppar samtidigt som komfort och fysikaliska begränsningar upprätthålls. Detta sker genom en strukturerat uppställt optimeringsproblem bestående av uppdelad målfunktion och begränsningar. Målfunktionen baseras på två olika mål, där varje del normaliseras och viktas för att åstadkomma en stabil och realistisk styrning.

Det primära målet är att följa en medelkurva skapad genom ett glidande medelvärde (Q_{ref}) av den historiska normaliserade effektkurvan för systemet. Först tas referenskurvan fram för att sedan minimera avvikelsen mellan referenskurvan och den optimerade totala systemeffekten ($Q_{sys,opt}$) enligt följande:

$$Objective_{track}\ min = w_{track} * \left(Q_{sys,opt,norm} - Q_{ref}\right)^2 \quad (5)$$

Denna formulering innebär att modellen aktivt försöker minimera effekttoppar och motsvarar den effektreduceringsstrategi som tidigare implementerats i bland annat studierna av Guelpa et al. och Trabert et al. men med annan formulering. Utöver detta mål införs ett sekundärt mål med fokus på komfort som komplement för att säkerställa realistisk styrning.

Ett komfortband introduceras för att sedan minimera avvikelsen mellan den aktuella innertemperaturen och börvärdet ($temp_{error}$). Komfortmålet formuleras enligt följande:

$$Objective_{comfort}\ min = w_{comfort} * temp_{error}^2 \quad (6)$$

Detta medför att byggnadens temperatur får variera inom bestämt komfortintervall men om temperaturen börjar driva mot gränserna reagerar optimeringen och uppmanar till att återgå mot börvärde. Detta fungerar som en mjuk komfortbegränsning som kompletterar hårda temperaturbegränsningar.

Två vikter används för att balansera målen i målfunktionen:

$$w_{track} = 1{,}0 \quad w_{comfort} = 0{,}01 \quad (7)$$

Vikterna är valda genom prövning av diverse värden för att huvudmålet ska vara dominerande samtidigt som komfort säkerställs. Dessa vikter är individuella för de specifika scenarion som behandlas i denna studie och kan därmed behöva justeras vid andra optimeringar. Exempelvis justeras komfortvikten ($w_{comfort}$) till 0,03 vid tillåten temperaturvariation ±2,0 °C för att inte hålla temperaturen lika strikt runt börvärde eftersom ett större temperaturintervall tillåts.

Angående optimeringsproblemets begränsningar har tre centrala aspekter tagits till hänsyn. Termisk dynamik i form av byggnadens temperaturutveckling modelleras med en första ordningens RC-modell. Därefter begränsas inomhustemperaturen till ett komfortintervall enligt nedan med utgångspunkt att tillåten temperaturvariation är ±0,5°C:

$$T_{set} - \Delta T \leq T_{in}(t) \leq T_{set} + \Delta T \quad (8)$$

Även en effektbegränsning införs för att göra huvudmålet möjligt och säkerställa att effektvariabeln representerar den faktiska effekttoppen:

$$Q_{SH}(t) + Q_{DHW}(t) \leq P \quad (9)$$

Optimeringen implementeras i funktionen optimizerPeakshaving(), som använder GEKKO för att lösa problemet. Funktionen optimizerSetTin() används när inomhustemperaturen initialt ligger utanför komfortintervallet, vilket säkerställer att optimeringen startar från ett rimligt tillstånd.

4.2.3.3 GEKKO som optimeringsverktyg

I optimeringssteget används det Python-baserade verktyget GEKKO, som är gjort för att lösa icke-linjära och dynamiska optimeringsproblem. GEKKO kombinerar optimering med lösning av differentialekvationer, vilket gör det väl anpassat för modellprediktiv styrning där framtida tillstånd och styrsignaler beräknas samtidigt. I detta arbete används GEKKO för att beskriva byggnadens värmedynamik med algebraiska ekvationer och differentialekvationer

och för att minimera den maximala effekten under horisonten. Verktyget hanterar även viktiga begränsningar, som komfortkrav, effektgränser och jämnhet i styrsignalen. Detta möjliggör att modellen kan lösa ett komplext och tidskopplat optimeringsproblem på ett stabilt sätt, vilket är centralt för att MPC-strategin ska fungera (Beal et al., 2018).

4.2.4 Framtagning av effektreduktionsprofiler

När optimeringen har genomförts för hela analysperioden genereras en tidsserie som beskriver hur byggnadens uppvärmning skulle ha sett ut om den hade styrts enligt den modellprediktiva strategin. Detta är en central del av studien eftersom det är först när den optimerade styrningen jämförs med den historiska driften som byggnadens flexibilitet kan kvantifieras. Syftet med detta avsnitt är därför att beskriva hur effektreduktionsprofilerna tagits fram och vilka beräkningar som ligger bakom dessa.

4.2.4.1 Beräkning av optimerad total effekt

Den optimerade uppvärmningseffekten $Q_{SH,\mathrm{opt}}(t)$ tas fram direkt från MPC-optimeringen. Tappvarmvatteneffekten $Q_{DHW}(t)$ betraktas som okontrollerbar och antas vara densamma som i den historiska datan. Den totala optimerade effekten beräknas därför som:

$$Q_{\mathrm{tot,opt}}(t) = Q_{SH,\mathrm{opt}}(t) + Q_{DHW}(t) \quad (10)$$

Denna beräkning motsvarar den struktur som används i koden, där den optimerade uppvärmningseffekten ersätter den historiska i datamatrisen medan tappvarmvatteneffekten lämnas oförändrad. Resultatet blir en tidsserie som beskriver hur byggnadens totala effektuttag skulle ha sett ut om den styrts optimalt.

4.2.4.2 Uppskalning av reduktionsprofiler

För att kunna använda byggnadens effektreduktionsprofil i systemanalysen behöver den översättas till fjärrvärmenätets nivå. Detta genomförs i tre steg.

Först beräknas den procentuella effektreduktionen timme för timme genom att jämföra den optimerade totala effekten med den historiska. Resultatet blir en normaliserad reduktionsprofil som beskriver hur mycket lasten förändras i relativa termer. Normaliseringen möjliggör även att profilen kan appliceras på andra byggnader inom samma kundsegment, oberoende av deras absoluta effektstorlek.

Därefter används denna normaliserade profil för att skapa tre scenarier som motsvarar olika nivåer av kunddeltagande (20 %, 50 %, 100 %) av flerbostadshusbeståndet. Varje scenario representerar en möjlig framtida implementeringsgrad av laststyrning. Den procentuella reduktionen multipliceras sedan med Mälarenergis totala fjärrvärmeleverans per timme, vilket ger en uppskattning av hur stor effektreduktion som kan uppnås på systemnivå om samma beteende upprepas av ett större antal byggnader.

Slutligen justeras resultaten för att endast inkludera den del av fjärrvärmeleveransen som faktiskt går till flerbostadshus, vilket motsvarar 38 % av den totala värmeförsäljningen enligt

data från Mälarenergi. Detta säkerställer att uppskalningen inte överskattar effektreduktionen genom att inkludera kundgrupper som inte omfattas av studien. De tre resulterande systemprofilerna används därefter som indata i produktionsoptimeringen.

Ny optimerad effektprofil beräknas utifrån historisk systemeffekt ($Q_{sys,hist}$), deltagandegrad, total optimerad effekt ($Q_{tot,opt}$) och total historisk effekt ($Q_{tot,hist}$) enligt följande:

$$Q_{sys,opt} = Q_{sys,hist} * \left(1 + Deltagandegrad * 0{,}38 * \left(\frac{Q_{tot,opt}}{Q_{tot,hist}} - 1\right)\right) \quad (11)$$

4.3 Produktionsoptimering

I detta steg analyseras hur den reducerade effekten från byggnadsnivån påverkar Mälarenergis produktionssystem. Detta görs genom att använda företagets interna optimeringsmodell, EO3, som är ett verktyg för driftoptimering av fjärrvärmeproduktion. EO3 tar hänsyn till varje produktionsenhets tekniska begränsningar, bränslekostnader, verkningsgrader, start- och stoppkostnader samt möjligheten att producera el i kraftvärmeverket. Genom att kombinera dessa faktorer kan modellen beräkna den kostnadsoptimala driften för hela systemet givet en viss värmelast.

EO3-optimeringen genomförs genom att effektreduktionsprofilen från MPC-modellen optimeras mot fjärrvärmesystemets last och används som indata i tre helårsbaserade sammanhängande simuleringar, med varierande deltagargrad. Detta ger en mer realistisk representation av hur laststyrningen påverkar produktionssystemets drift över tid, samtidigt som EO3 kan utnyttja informationen före och efter de studerade perioderna för att generera mer pålitliga resultat som är mer konsekventa till närliggande perioder.

De tre separata helårsoptimeringarna motsvarar deltagarscenarierna 20 %, 50 % och 100 % av flerbostadshusbeståndet. Varje scenario använder en uppskalad effektreduktionsprofil som beskriver värmelastens timvisa reduktion eller ökning av effekten vid de olika deltagarandelarna. Efter att optimeringarna har genomförts extraheras resultaten för de månader som är utsedda för studien, vilket möjliggör en fördjupad analys av systemeffekterna under perioder då laststyrning har stor betydelse.

För att göra beräkningarna hanterbara har optimeringen ställts in på en tvåtimmars stegvis upplösning. Detta innebär att EO3 optimerar produktionen i block om två timmar i taget, vilket reducerar beräkningstiden avsevärt utan att förlora strukturen i produktionsplaneringen. Varje körning genererar en produktionsplan som beskriver hur systemet skulle drivas under perioden givet den modifierade lastprofilen.

När samtliga scenarier har optimerats jämförs resultaten med ett basfall där EO3 körs med den historiska, icke-modifierade lastprofilen. Genom att analysera skillnaderna mellan basfallet och de tre deltagarscenarierna kan studien identifiera hur produktionssystemet reagerar på reducerade effekttoppar, exempelvis genom förändringar i spetslastbehov, elproduktion och kostnader. Detta utgör grunden för att bedöma systemnyttan av laststyrning i de tre perioderna.

4.4 Förslag till Besparingsterm

För att skapa ekonomiska incitament för kunder att bidra med laststyrning utformas en besparingsterm som kan appliceras på en prismodell så att ersättningen speglar den systemnytta som flexibiliteten genererar. Systemnyttan beräknas som skillnaden i produktionskostnader varje månad mellan scenarier med och utan laststyrning, dividerad med den maximala effektreduktionen på systemnivå månadsvis.

$$Besparing_{sys} = \frac{Månadsvis\ kostandsminskning(kr)}{(Maximal\ effektreduktion\ (kW)} \quad (12)$$

Detta ger ett värde per reducerad kilowatt som motsvarar den faktiska kostnadsbesparingen för fjärrvärmesystemet. En andel av detta värde, (X), tilldelas kunden som incitament, medan resterande del kvarstår hos Mälarenergi för att säkerställa kostnadstäckning och fortsatt driftoptimering.

$$Besparing_{kund} = X * Besparing_{sys} \quad (13)$$

Prismodellen implementeras som en effektrabatt där kunder som reducerar sin toppeffekt under definierade topplastmånader ersätts med ett belopp per verifierad kilowatt. Kundens ersättning i månaden beräknas som (X) multiplicerat med systemnyttan per kW och kundens uppmätta effektreduktion. Modellen är avsedd att vara enkel att kommunicera, lätt att applicera och direkt kopplad till den faktiska nytta som flexibiliteten skapar i det lokala fjärrvärmesystemet. Rabatten är tänkt att tillsättas till nästkommande månad. Viktigt att belysa är att rabatten endast kan tilldelas kunder i de fall där systemnytta nås, vilket hanteras av Mälarenergi. När optimeringarna visar ökade kostnader med laststyrningsimplementering avaktiveras laststyrningen och prisbilden för den månaden blir oförändrad.

5 RESULTAT

Detta avsnitt presenterar resultaten från studiens tre huvuddelar som består av byggnadsmodelleringen med peak shaving (MPC-modellen), produktionsoptimeringen samt den ekonomiska analysen kopplad till prismodellen. Tillsammans besvarar dessa delar studiens forskningsfrågor genom att först kvantifiera den tekniska flexibilitet som kan frigöras på byggnadsnivå, därefter analysera hur denna flexibilitet påverkar produktionssystemets drift och slutligen bedöma hur ekonomiska incitament kan utformas för att möjliggöra praktisk implementering.

Strukturen av resultatet följer studiens metod. Först presenteras effektreduktionen som uppnås genom MPC-optimeringen i tre representativa perioder (höst, vinter och vår). Dessa effektreduktionsprofiler ligger sedan till grund för systemoptimeringen i EO3, där förändringar i kraftvärmeproduktion analyseras vid olika nivåer av kunddeltagande. Slutligen kopplas systemnyttan till ett ekonomiskt värde per reducerad kilowatt, vilket används för att utvärdera och utforma en prismodell som kan skapa incitament för kundbaserad laststyrning.

5.1 MPC-modell

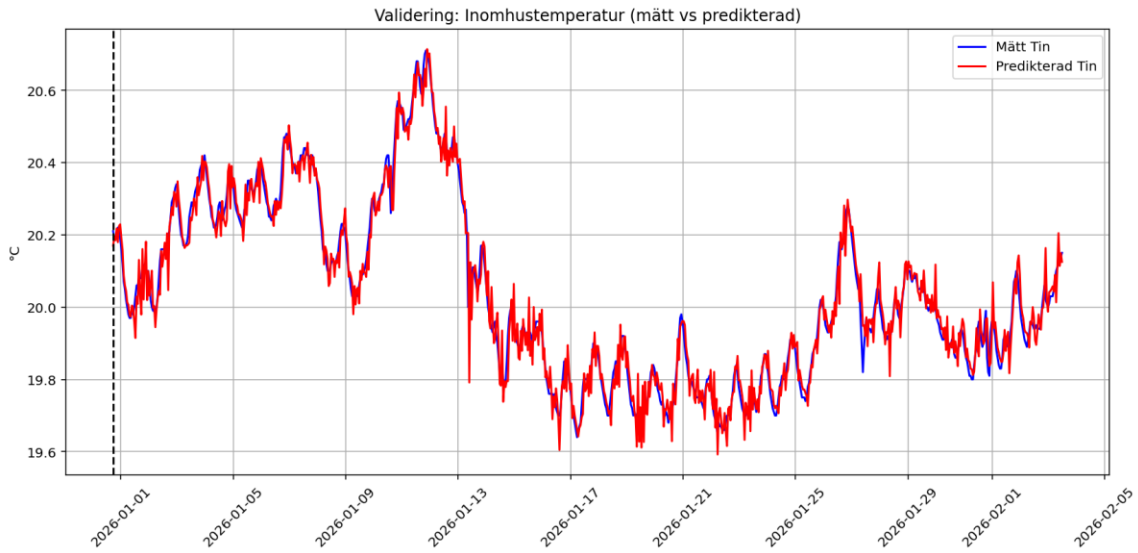
Nedan presenteras resultaten från MPC-modellen som utvecklades i Python. Resultaten är uppdelade i tre olika perioder bestående av april-maj 2025, oktober 2025 och januari 2026. Kommande figurer presenterar validering av modellen, jämförelse av historiskt och optimerat effektbehov, historisk och optimerad inomhustemperatur samt utomhustemperatur. Effekt och inomhustemperatur presenteras även i två olika varianter med tillåten temperaturvariation ±0,5 ℃ respektive ±2,0 ℃.

5.1.1 Träningsperiod, horisont och validering

Medelvärden för MPC-modellens avvikelse mellan predikterad och uppmätt temperatur med varierande antal timmar för träningsperioden presenteras i Tabell 9. Presenterade värden avser perioden januari månad.

Tabell 9 Medelvärde av avvikelse mellan mätt och predikterad inomhustemperatur för januari

Träningsperiod [timmar]	Prediktionshorisont [timmar]	Medelvärde avvikelse [℃]
120	48	-0,03248
168	48	-0,01631
240	48	0,00643
336	48	0,05129
408	48	0,07072

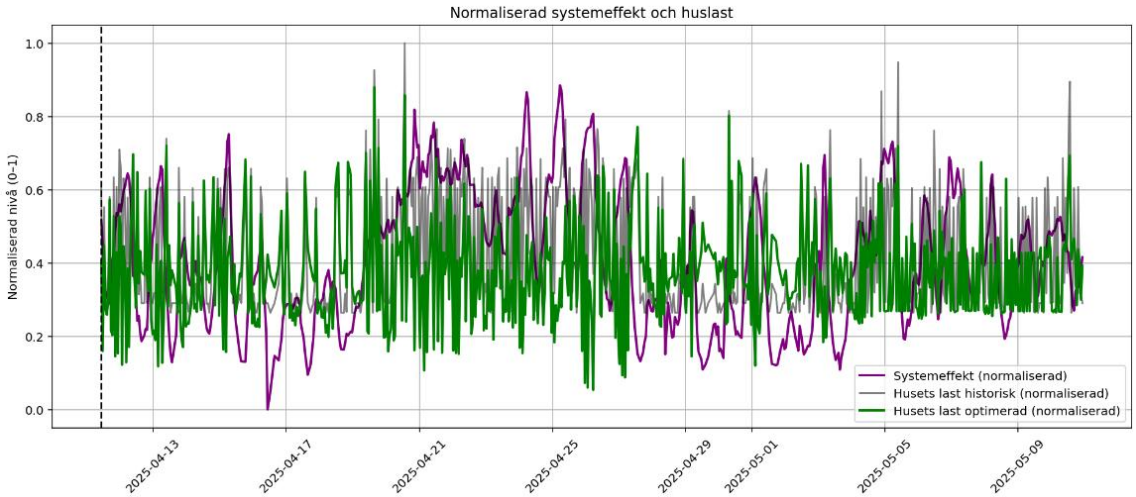


Figur 1 Validering av MPC-modell med träningsperiod 168 timmar och predikterad horisont 48 timmar genom jämförelse av mätt och predikterad inomhustemperatur

Figur 1 visualiserar modellens predikterade temperatur i jämförelse till mätt temperatur under januari med vald träningsperiod och prediktionshorisont 168 respektive 48 timmar enligt avsnitt 4.2.3.1. Den predikterade temperaturen följer den uppmätta temperaturen väl under hela perioden med små avvikelser, främst under hastiga temperaturförändringar. En tydlig korrelation mellan modellen och mätdata uppvisas vilket indikerar att modellen med god säkerhet kan beskriva byggnadens termiska behov och respons.

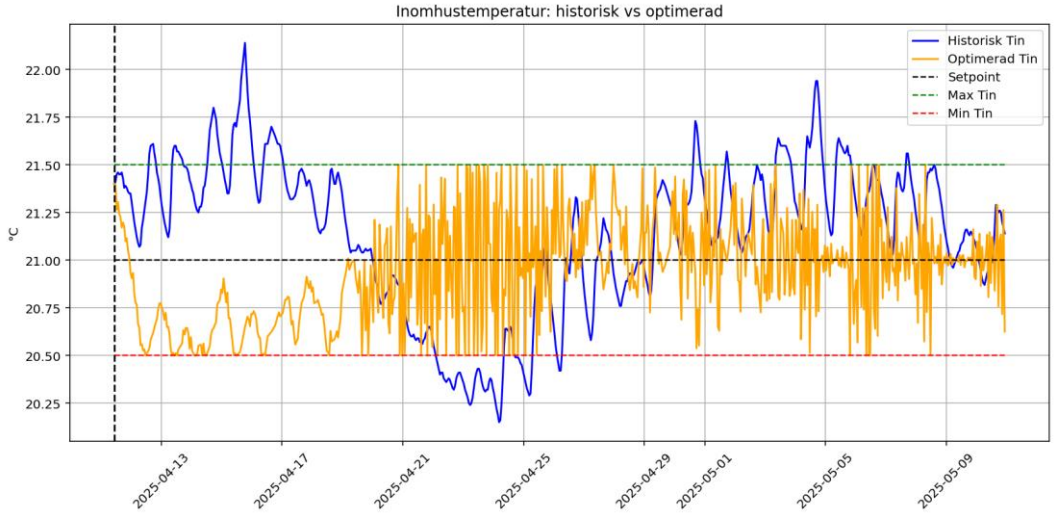
5.1.2 Optimering av vårperiod

Nedan presenteras resultat för perioden april-maj 2025. Värt att notera för denna period är att börvärde för inomhustemperaturen under denna period är satt till 21°C i jämförelse till 20°C för de andra perioderna eftersom den historiska temperaturen är betydligt högre under denna period.



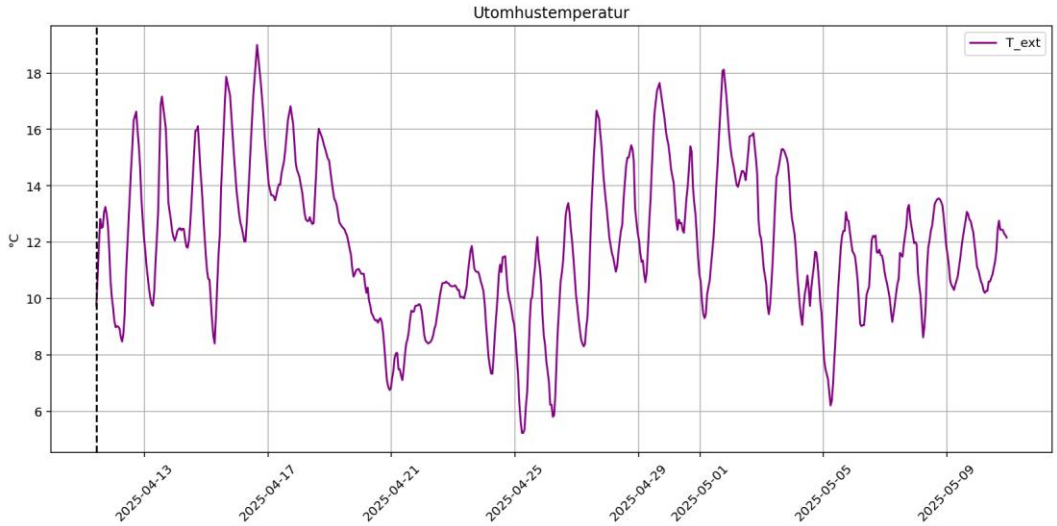
Figur 2 Normaliserad fjärrvärmesystemeffekt samt historisk och optimerad normaliserad byggnadseffekt under perioden april-maj 2025, givet ett tillåtet temperaturintervall på ±0,5 °C

Figur 2 visar den normaliserade systemeffekten tillsammans med både den historiska och optimerade normaliserade byggnadseffekten under perioden maj-april 2025. Systemeffekten uppvisar tydliga dygnsvariationer med återkommande toppar och dalar. Den historiska huseffekten följer delvis samma trend men med hastigare variationer med lägre amplitud. Efter optimering uppstår en tydligare anpassning av huseffekten till systemets variationer då toppar reduceras vid hög systemlast och dalar höjs vid låg systemlast. Skillnaden mellan kurvorna illustrerar hur optimeringen omfördelar värmeeffekten över tid för att jämna ut effektbehovet i nätet och reducera nätets toppbelastning.



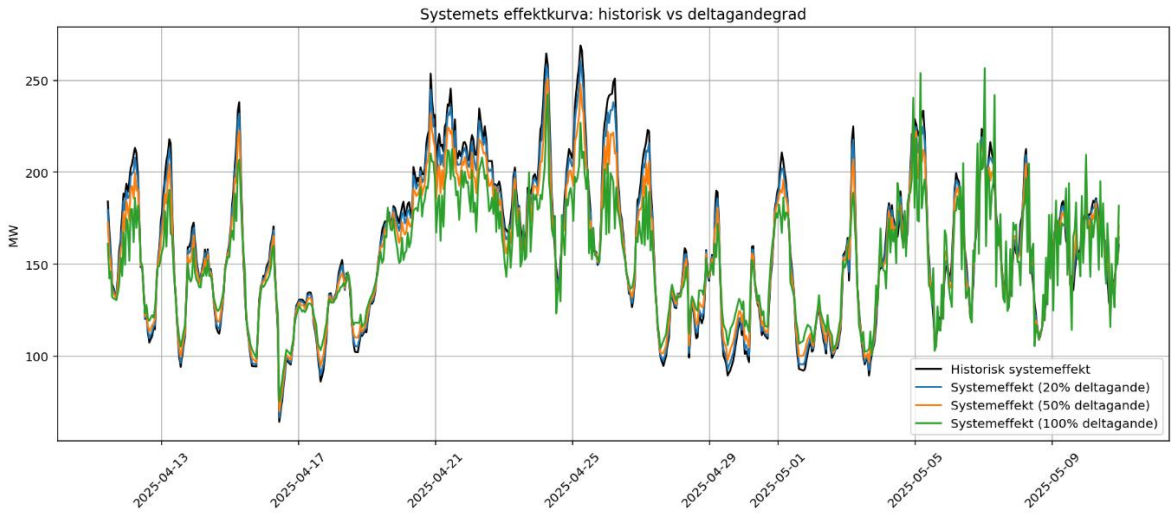
Figur 3 Jämförelse av historisk och optimerad inomhustemperatur för april-maj 2025 och tillåten temperaturvariation ±0,5 °C

Figur 3 presenterar en jämförelse av byggnadens historiska och optimerade inomhustemperatur för perioden april till maj. Den historiska temperaturen varierar i intervallet från drygt 20°C till drygt 22°C. Temperaturen efter utförd optimering varierar snabbt runt börvärdet (21°C) men håller sig alltid innanför tillåtet temperaturintervall (20,5–21,5°C).



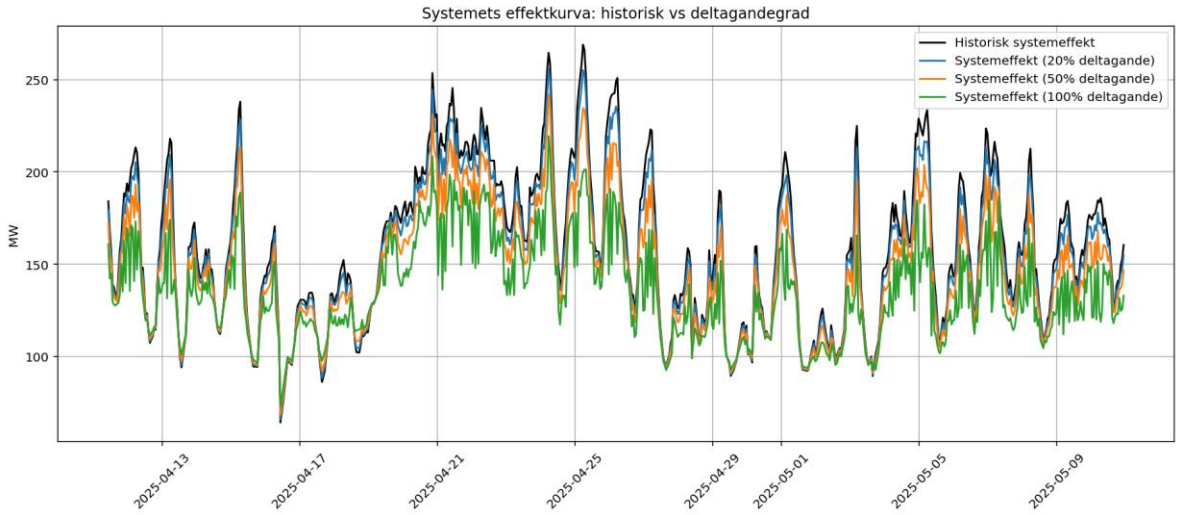
Figur 4 Utomhustemperatur april-maj 2025

Figur 4 visualiserar hur utetemperaturen varierar över vårperioden april-maj. Temperaturen uppvisar tydliga dygnsvariationer.



Figur 5 Effektkurva för fjärrvärmesystemet april-maj 2025 med varierande deltagandegrad och tillåten temperaturvariation på ±0,5 °C

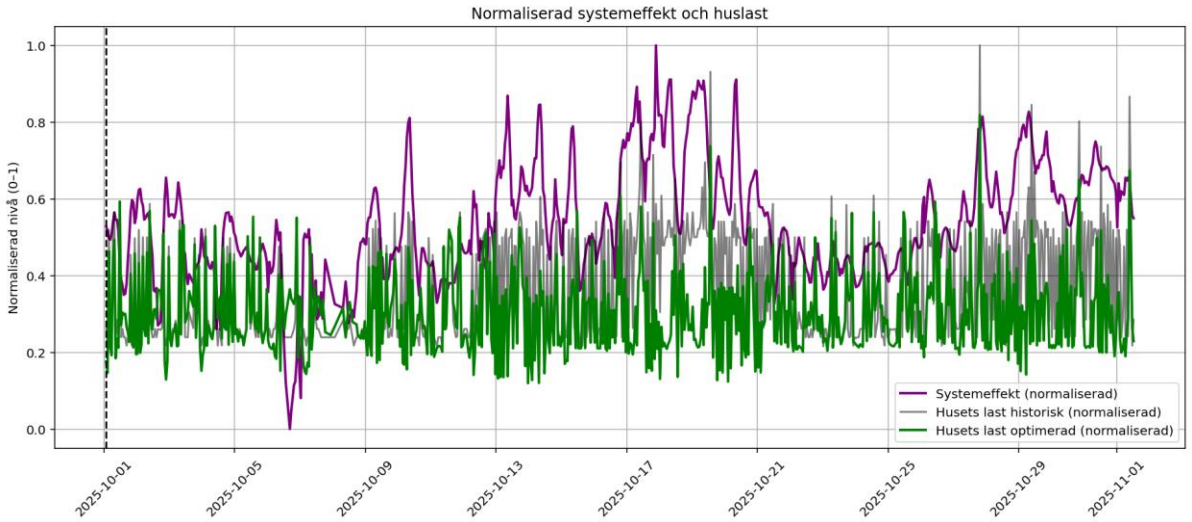
Figur 5 visar systemets historiska effektkurva i jämförelse till tre scenarier där olika andelar av kundsegmentet deltar i laststyrning. Den historiska effektkurvan visar markanta variationer över tid som successivt utjämnas när deltagandegraden ökar genom att topparna reduceras och dalarna höjs. Effekten av laststyrningen blir tydligast vid 100 % deltagande, där variationerna minskats betydligt i jämförelse till det historiska fallet. Figuren tydliggör därmed hur laststyrning med varierande deltagandegrad påverkar systemets totala effektuttag över perioden. Figur 6 visar liknande graf som Figur 5 men med ökat tillåtet temperaturintervall till ±2,0°C vilket bidrar till ytterligare jämnare effektkurva med lägre toppar och högre dalar.



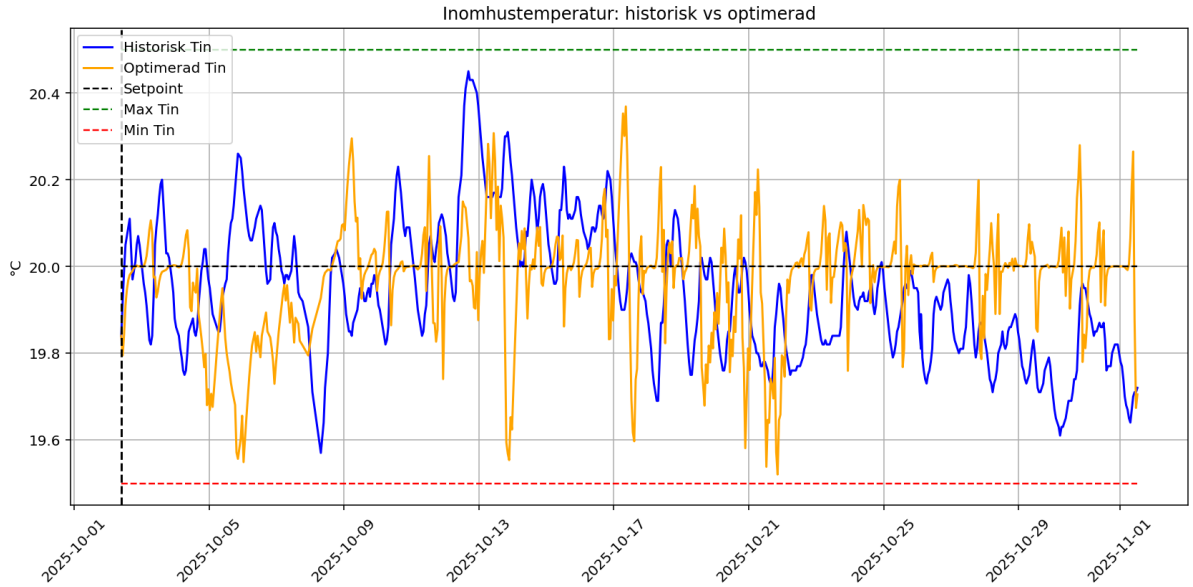
Figur 6 Effektkurva för fjärrvärmesystemet april-maj 2025 med varierande deltagandegrad och tillåten temperaturvariation på ±2,0 °C

5.1.3 Optimering av höstperiod

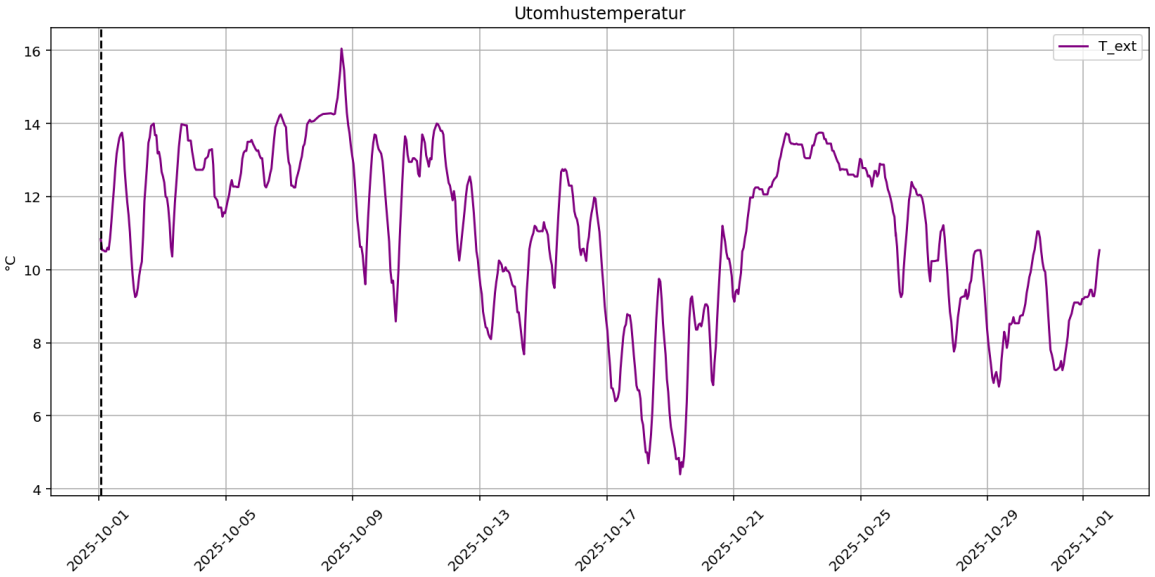
Nedan presenteras resultat för oktober månad 2025. Figur 7–15 presenterar liknande resultat som Figur 1–6, men för andra perioder, och fokuserar därmed på jämförelse mellan historiska parametrar och nya parametrar efter optimering. Total effekt, inomhustemperatur med två olika tillåtna temperaturintervall samt utomhustemperatur presenteras.



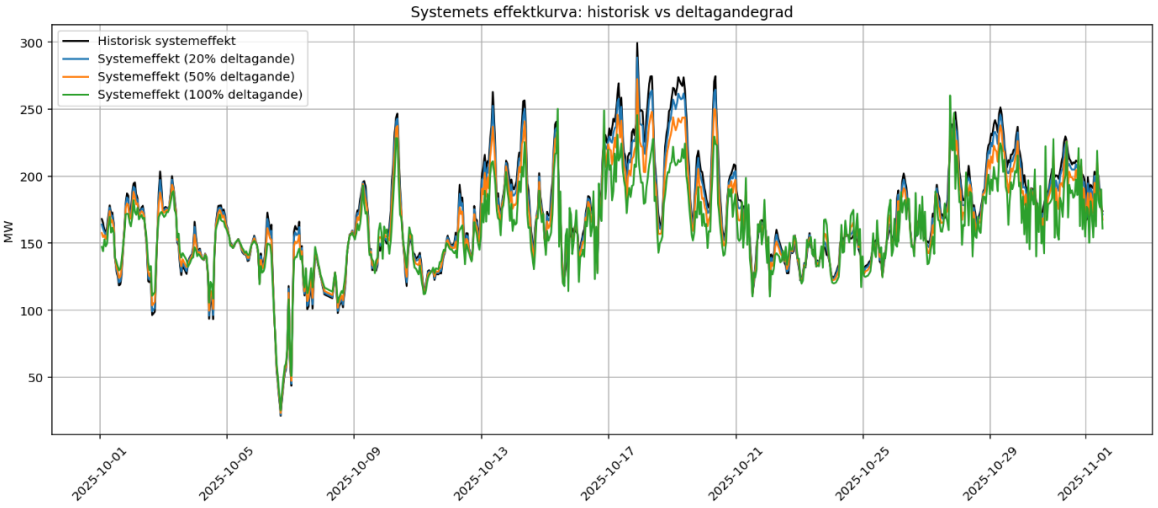
Figur 7 Normaliserad fjärrvärmesystemeffekt samt historisk och optimerad normaliserad byggnadseffekt under perioden oktober 2025, givet ett tillåtet temperaturintervall på ±0,5 °C



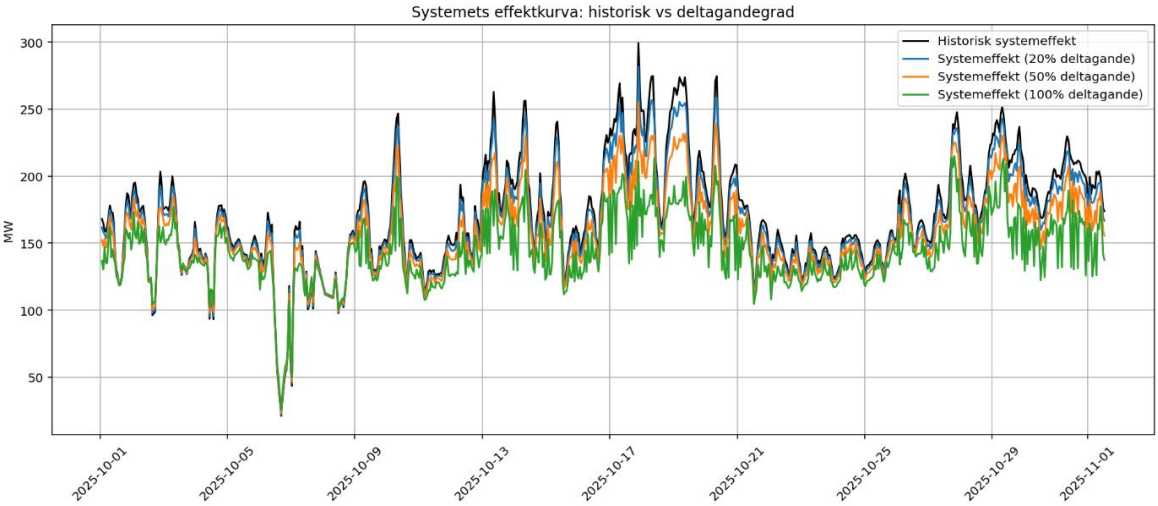
Figur 8 Jämförelse av historisk och optimerad inomhustemperatur för oktober 2025 och tillåten temperaturvariation ±0,5 °C



Figur 9 Utomhustemperatur för oktober 2025



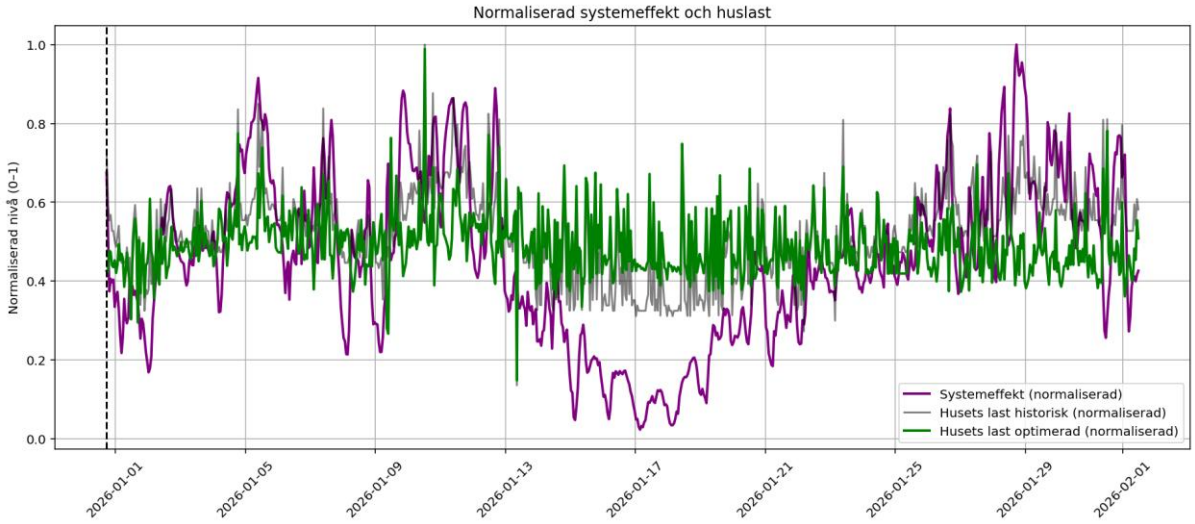
Figur 10 Effektkurva för fjärrvärmesystemet oktober 2025 med varierande deltagandegrad och tillåten temperaturvariation på ±0,5 °C



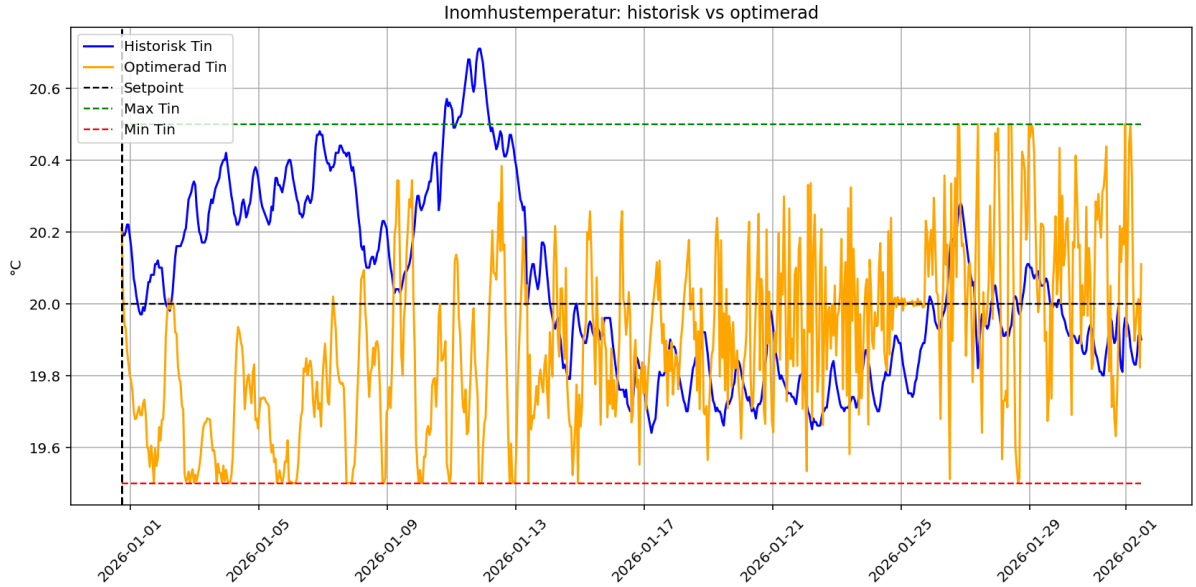
Figur 11 Effektkurva för fjärrvärmesystemet oktober 2025 med varierande deltagandegrad och tillåten temperaturvariation på ±2,0 °C

5.1.4 Optimering av vinterperiod

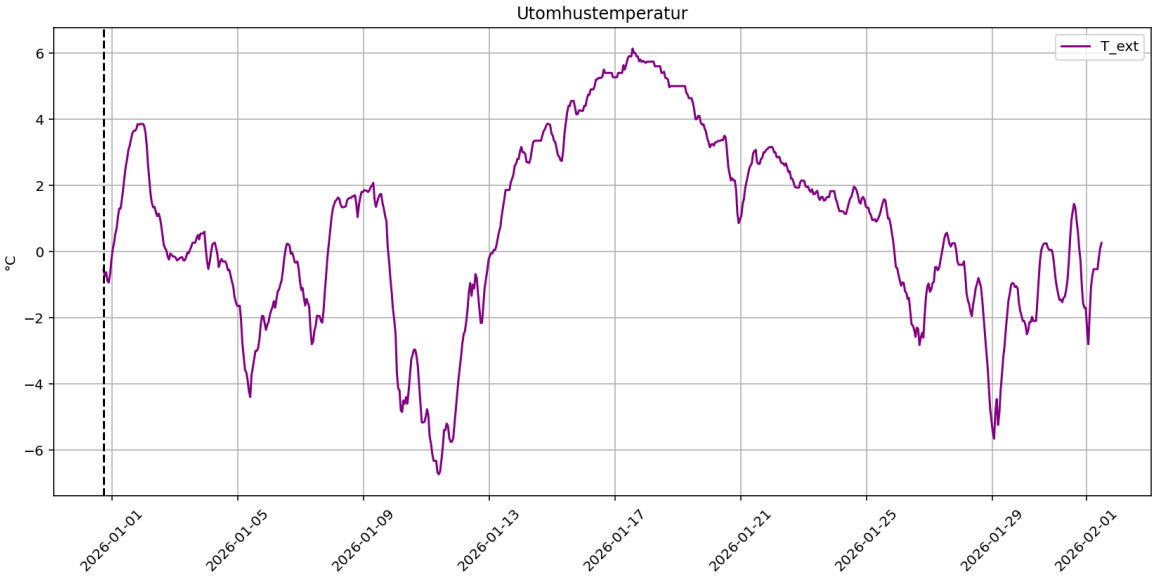
Nedan presenteras resultat för januari månad 2026.



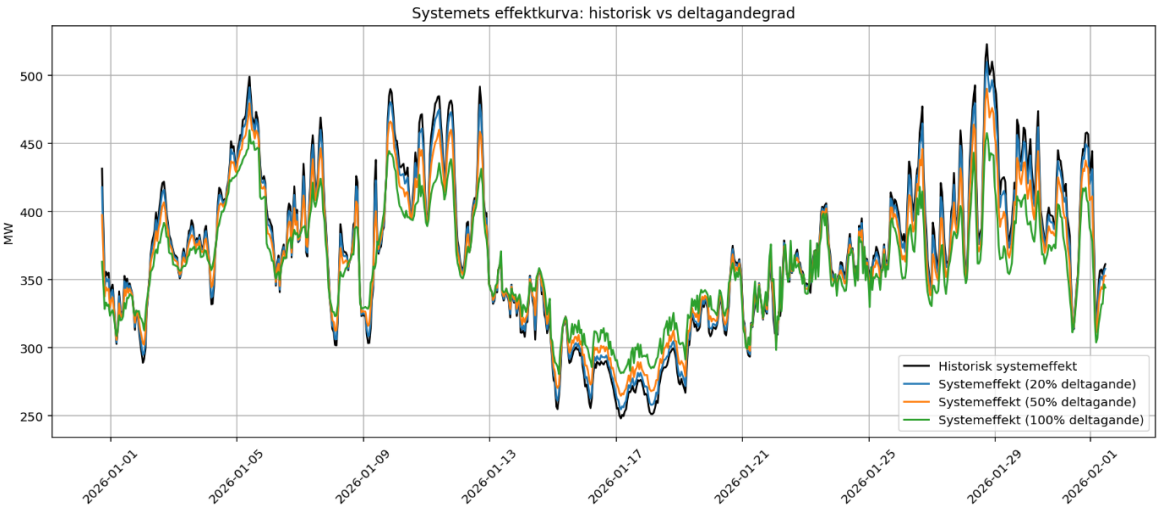
Figur 12 Normaliserad fjärrvärmesystemeffekt samt historisk och optimerad normaliserad byggnadseffekt under perioden januari 2026, givet ett tillåtet temperaturintervall på ±0,5 °C



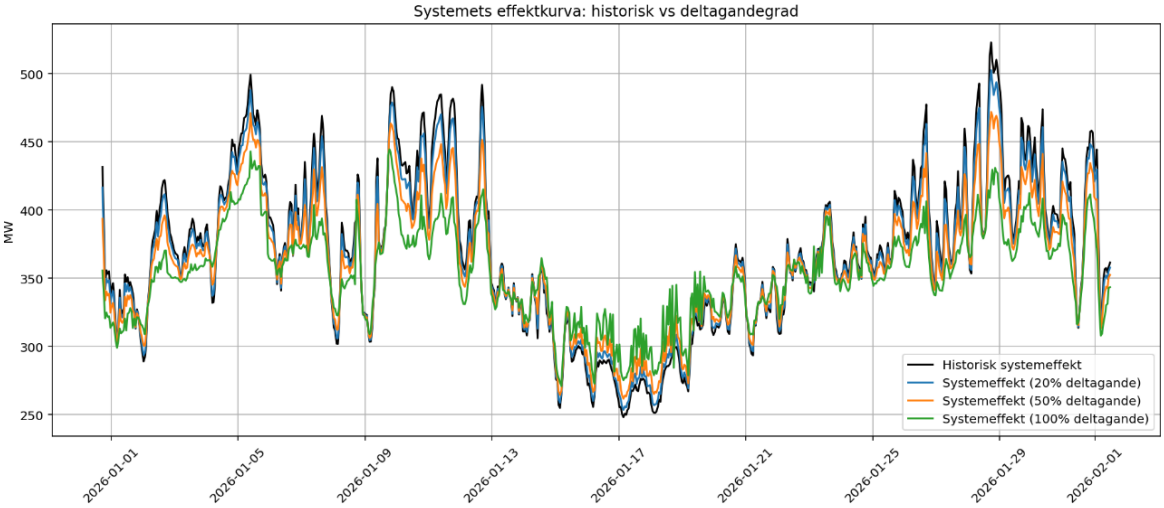
Figur 13 Jämförelse av historisk och optimerad inomhustemperatur för januari 2026 och tillåten temperaturvariation ±0,5 °C



Figur 14 Utomhustemperatur för januari 2026



Figur 15 Effektkurva för fjärrvärmesystemet januari 2026 med varierande deltagandegrad och tillåten temperaturvariation på ±0,5 °C



Figur 16 Effektkurva för fjärrvärmesystemet januari 2026 med varierande deltagandegrad och tillåten temperaturvariation på ±2,0 °C

5.1.5 Sammanställning av optimeringsresultat

Tabell 10 Sammanställning av uppskalade resultat från optimering av byggnad med temperaturvariation ±0,5℃

Period (Deltagargrad)	Maxeffekt historisk (MW)	Maxeffekt optimal (MW)	Toppreducering (%)	Energiminskning i jämförelse till basfallet (%)
Apr-maj 2025 (20%)	268,9	260,5	3,1	0,9
Apr-maj 2025 (50%)	268,9	250,6	6,8	2,3
Apr-maj 2025 (100%)	268,9	256,6	4,6	4,6
Okt 2025 (20%)	299,3	288,6	3,6	1,3
Okt 2025 (50%)	299,3	272,5	8,9	3,2
Okt 2025 (100%)	299,3	260,2	13,1	6,3
Jan 2026 (20%)	523,0	509,9	2,5	0,5
Jan 2026 (50%)	523,0	490,3	6,3	1,2
Jan 2026 (100%)	523,0	459,8	12,1	2,4

Tabell 10 presenterar en sammanställning av de viktigaste uppskalade resultaten från MPC-optimeringen bestående av periodvis maximal historisk och optimal effekt för systemet. Utifrån dessa värden beräknas toppreducering uttryckt som ett förhållande mellan optimal och tidigare högsta effekt i fjärrvärmesystemet. Utöver detta presenteras även procentuell energiminskning i jämförelse till historisk energimängd. Toppreduceringen, precis som energiminskningen, ökar generellt när deltagandegraden ökar, med ett undantag för vårperioden april-maj med 100 % deltagargrad. Det är viktigt att understryka att målet är att jämna ut effektkurvan genom lastförflyttning och kapning av effekttoppar, och inte att reducera total mängd energi. Energiminskningen som presenteras i tabellen bör därför ses som en bieffekt av optimeringen snarare än ett eget mål.

5.2 Produktionsoptimering

Resultat genererade från optimeringsprogrammet EO3 presenteras nedan.

Tabell 11 Sammanställning av resultat från optimering av produktion med nya effektprofiler

Period (Deltagargrad)	Kostnad i relation till historiskt (%)	Förändring i produktion över baslast (MWh)	Elproduktion i relation till historiskt (%)
Apr-maj 2025 (20%)	145,0	0	98,6
Apr-maj 2025 (50%)	124,9	0	98,8
Apr-maj 2025 (100%)	49,2	0	98,1
Okt 2025 (20%)	100,3	0	100,0
Okt 2025 (50%)	100,4	0	99,8
Okt 2025 (100%)	99,2	0	99,0
Jan 2026 (20%)	98,2	-1050	99,8
Jan 2026 (50%)	91,6	-2350	99,5
Jan 2026 (100%)	87,0	-3820	98,0

Tabell 11 presenterar hur produktionskostnad, produktion över baslast och elproduktion förändras vid olika deltagargrader och under olika perioder. Kostnad och elproduktion redovisas procentuellt som relation till basfallet, där 100 % motsvarar historiska värden. I vissa fall, främst under april-maj vid låg deltagargrad, när systemet är lågt belastat uppstår ökade kostnader. Vidare förklaring till detta och potentiella åtgärder presenteras i avsnitt 6.2

Förändring i produktion över baslast visar hur mycket energi som produceras över baslastnivån i jämförelse till historiskt. I detta fall definieras baslasten som den sammanlagda kapaciteten för värmeproduktion från Mälarenergis huvudsakliga produktionsenheter. All värmeproduktion utöver dessa produktionsenheters kapacitet tillhör produktion över baslast. Under perioderna april-maj och oktober ligger aldrig produktionen över baslast vilket förklarar att ingen förändring sker oavsett deltagargrad. Däremot under januari ligger produktionen relativt ofta över baslast vilket gör att optimeringen kan reducera denna del av produktionen.

5.3 Justering av prismodell

Eftersom besparingstermen inte implementerats praktiskt, och endast ses som ett ekonomiskt incitamentsförslag, så kommer inga resultat för denna del av studien att genereras. I stället är besparingstermen baserad på resultaten från peak-shaving-analysen och produktionsoptimeringen. Resultaten av besparingstermen kommer att förbli oredovisade då underlag om investeringskostnader och administrativa kostnader vid laststyrningsimplementering är obefintliga i dagsläget. Detta gör det inte möjligt att avgöra hur stor del av besparingen som potentiellt kan gå till kunden. Detta kommer därför i stället diskuteras i nästkommande kapitel.

6 DISKUSSION

I detta kapitel diskuteras studiens resultat i relation till syftet att undersöka hur laststyrning kan bidra till effektreduktion och hur en justering av prismodell kan utformas för att skapa ekonomiska incitament för värmeflexibilitet. Här diskuteras bland annat hur peak-shaving-analysen och produktionsoptimeringen bör tolkas, vilka antaganden som påverkat utfallet och hur väl prismodellen fångar systemnyttan.

6.1 MPC-modell

MPC-modellen som delvis baseras på en 1R1C-modell fångar, enligt modellvalideringen i Figur 1, flerbostadshusets generella temperaturdynamik, med små variationer beroende på bland annat val av träningsperiod. Sensitivitetsanalysen med tillhörande avvikelser som gjordes i denna studie och som presenteras i Tabell 9 analyserar endast ett fåtal, ansedda rimligt antal timmar för just denna undersökning, varianter av träningsperioder. Avvikelserna är mycket små för samtliga träningsperioder vilket tyder på att modellens exakthet är tillräcklig, då ett temperaturintervall på ±0,5 ℃ används.

Skillnaderna mellan predikterad och uppmätt temperatur tyder på att modellens parametrar är känsliga för diverse förhållanden som ingår i träningsperioden gällande exempelvis väder och drift. Detta är väntat för denna förenklade modell som inte explicit uttrycker solinstrålning och ventilationsvariationer. En mer avancerad modell med flera uppdelningar av resistanser, kapacitanser och zoner skulle kunna beskriva byggnadens termiska dynamik med högre säkerhet, men samtidigt betonar Wang et al. (2019) att sådana modeller ofta leder till icke-identifierbara parametrar och överdriven komplexitet. Studien påpekar också hur en avancerad modell lätt övergår till en enklare när förenklingar behöver göras för att nå en robust, beräkningseffektiv och implementerbar modell. Trots användandet av en förenklad modell bedöms prediktionerna ligga tillräckligt nära mätdata för denna studie. För att utveckla modellen behövs betydligt mer data som i detta fall var otillgänglig.

Figur 3, 8 och 13 visar hur MPC-modellen har valt att variera inomhustemperaturen i byggnaden över de tre perioderna. Figurerna visar att modellen lyckas hålla temperaturerna inom angivet komfortintervall (±0,5℃) samtidigt som byggnadens tröghet utnyttjas genom variation inom intervallet. De optimerade temperaturerna varierar mer mellan intervallets gränser än den historiska temperaturen, vilket förväntas när målet är att skapa flexibilitet. Det bör noteras att modellens börvärde för inomhustemperaturen är konstant för perioderna och satt till 20 ℃ för höst- och vinterperioden och 21 ℃ för vårperioden baserat på ett medelvärde av den historiska varierande inomhustemperaturen. Modellens optimerade temperaturvariation inom intervallet tyder på att byggnadens termiska tröghet används som en resurs för lastförflyttning. Oscillationernas hastighet beror på husets tidskonstant, med andra ord husets förmåga att lagra värme i relation till värmeförluster. Enligt figurerna kan temperaturen varieras drastiskt vilket tyder på att tidskonstanten är relativt låg. Detta medför lägre flexibilitet då möjligheten till förflyttning av last försämras eftersom husets lagrade energi minskar snabbt. Man bör dock ha i åtanke att maximal temperaturförändring

för det tillåtna temperaturintervallet ±0,5 °C är 1,0 °C, vilket kommer att ske relativt fort i alla byggnader.

Den optimerade effekten för byggnaden presenteras för de olika perioderna i Figur 2, 7 och 12 och följer systemets variationer i högre utsträckning än den historiska effekten. Detta syns genom att reduktion av toppar och fyllning av dalar sker med hänsyn till systemets aktuella effektleverans. Målet med laststyrningen är att jämna ut systemkurvan vilket sker när huseffekten justeras med hänsyn till systemet. Detta uppnås genom att systemet, inklusive byggnaden, styrs mot det rullande medelvärdet för systemet med justering av husets effekt. Huruvida medelvärdet kan följas beror på flertalet parametrar, däribland husets och systemets termiska egenskaper, samt tillåtet komfortintervall. I detta fall syns tydligt att huset justeras för att påverka systemets last i rätt riktning samtidigt som byggnadens flexibilitet begränsas av termisk tröghet och det satta komfortkravet.

Utförd normalisering av systemet och byggnaden i kombination med glidande medelvärde möjliggör mjuk laststyrning som är implementerbar på olika stora delar av kundbasen. Eftersom optimeringen utförs på en enskild byggnad för att sedan skalas upp till större delar av kundbasen är det viktigt att optimeringen utförs på ett sådant sätt att inte nya toppar bildas senare vid implementering av optimeringen för resterande delar av systemet. Om optimeringsproblemets struktur endast fokuserar på att jämna ut systemets effektkurva kan en aggressiv styrning i form av kompensation förväntas från byggnaden. Detta eftersom byggnadens effektstorlek i relation till hela systemet är försumbar vilket gör att magnituden av byggnadens effekt varierar enormt för att bidra till noterbar skillnad i systemet. Detta skulle medföra att nya toppar skapas vid senare proportionell uppskalning vilket undviks med normalisering. Med normalisering och ett glidande medelvärde uppmanas husets effekt att justeras i relation till systemets trend i stället för dess absoluta effektnivåer. Detta gör att inte nya toppar bildas vid implementering av samma styrning för flertalet byggnader eftersom varje hus uppmanas att följa samma mjuka och normaliserade riktning vilket tydliggörs nedan.

En mer aggressiv styrstrategi kan implementeras för att uppnå större effektreduktion per kund. Detta skulle betyda att byggnaden i fråga styrs med större variationer i effektuttag för att bidra till en större skillnad på systemnivå. Denna styrsignal kan, som tidigare diskuterat, tas fram genom att utgå från absoluta effekter i stället för normaliserade. Denna typ av styrning kräver andra förutsättningar med största skillnaden att andelen av kundbasen eller antalet byggnader som deltar behöver vara känt för att säkerställa att inte nya toppar skapas. En utjämning av systemets effektkurva, precis som vid normalisering, kan förväntas men vid implementering av olika andelar av kunder behöver optimeringen redigeras för att ett fördelaktigt resultat ska kunna erhållas. Eftersom denna studie undersöker en byggnad med målet att skala upp till olika andelar av kunderna har en konservativ styrning med normalisering valt att användas.

Figur 5, 10 och 15 visualiserar hur systemets totala effekt varierar beroende på deltagargrad. Resultaten visar att systemets effekt successivt jämnas ut när andelen deltagare ökar från 20 % till 100 %. Redan vid 20 % deltagande åstadkoms viss toppkapning och fyllning av dalar

vilket markant förstärks desto fler byggnader som implementerar laststyrningen. Figurerna illustrerar flexibilitetspotentialen på systemnivå när många byggnader deltar. Det bör noteras att deltagandegraden fortfarande är uttryckt som 20 %, 50 % och 100 % av flerbostadshusens andel 38 %. Med andra ord skulle ytterligare utjämning av effektkurvan potentiellt uppnås vid inkludering av andra kundsegment. I dessa resultat bekräftas normaliseringens funktion eftersom den generella trenden efter optimering är en betydligt jämnare effektkurva med lägre toppar och högre dalar än tidigare.

Figur 6, 11 och 16 visar liknande resultat med skillnaden att temperaturvariationen ±2,0 °C använts i optimeringen. Utifrån dessa resultat tydliggörs vidare hur smart styrning i kombination med varierad innertemperatur kan bidra till flexibilitet på kundsidan. Ytterligare kapning av toppar och fyllning av dalar uppnås, men på bekostnad av komfort.

Sammanställningen av resultaten som framförs i Tabell 10 visar att toppreduceringen ökar med deltagandegrad, men också att toppeffekten tydligt varierar med årstiderna. Vid jämförelse av möjligheten till toppreducering mellan de olika perioderna syns det att den procentuella reduceringen är relativt lika över samtliga perioder med undantag för vårperiodens fåtal nya toppar som uppstått. Att en likvärdig procentuell toppreducering anses möjlig för vinter-, vår- och höstperioden kan motiveras av att flexibilitetens karaktär ändras med årstiderna. Under vintern är andelen styrbar effekt (uppvärmningseffekt i relation till tappvatteneffekt) stor, vilket ger en hög absolut potential för laststyrning. Under vår och höst är andelen styrbar effekt lägre men flexibilitetsutrymmet är i stället högre till följd av mildare och högre variation av utetemperaturen. En mindre temperaturskillnad mellan klimatet utomhus och inomhus gör att byggnadens avsvalning sker långsammare vilket därmed bidrar till större möjligheter att flytta laster utan att kompromissa med komforten.

Det finns flera potentiella felkällor som kan påverka resultatens tillförlitlighet. De mest uppenbara mätfelen i temperatur- och effektdata har försökt behandlas enligt metodavsnittet 2.3 men andra mer svåridentifierade mätfel kan ge upphov till avvikelser såsom de få oväntade topparna som observerats i Figur 5 som visualiserar fjärrvärmesystemets effektkurva under vårperioden. En annan potentiell källa till dessa beteenden är målfunktionens struktur som är väldigt simpel med fokus på att följa det rullande medelvärdet samtidigt som temperaturen hålls inom komfortintervallet. Utökning av begränsningar och justering av målvikterna skulle förmodligen bidra till färre nya effekttoppar. Exempelvis skulle en begränsning som bestämmer att ny effekt inte får överstiga historisk effekt kunna läggas till. Slutligen kan modellfel anges som en felkälla eftersom 1R1C-modellen inte explicit inkluderar solinstrålning eller ventilationsvariationer, vilket, tillsammans med känsligheten för val av träningsperiod och horisont, kan medföra att vissa dynamiska effekter underskattats.

Vidare presenterar Tabell 10 att den procentuella energiminskningen ökar med deltagargraden. Målet med denna studie är inte att minska den totala energianvändningen, utan snarare att jämna ut energianvändningen för att undvika höga effekttoppar. Jämförelsen till basfallet utan laststyrning blir något orättvis på grund av komfortkravet som

utgår från ett konstant börvärde (20℃ i januari och oktober samt 21℃ i april-maj) medan den historiska temperaturen varierar kraftigt över perioderna. Komfortkravet medför alltså att byggnaden försöker hålla en temperatur som inte alltid sker historiskt, vilket delvis förklarar skillnaden i energimängd. Oavsett minskar energianvändningen något vid högre deltagargrad eftersom topparna kapas mer än dalarna fylls på grund av modellens uppbyggnad. Optimeringens målfunktion formulerades med fokus på enbart att följa systemkurvans rullande medelvärde samt att bibehålla komforten. Denna energiskillnad hade kunnat manipulerats genom införandet av en energibalans-term i optimeringens målfunktion.

Generaliserbarheten i denna studie begränsas främst av att endast en specifik byggnad har analyserats. Trots att flertalet bostadshus ofta uppvisar liknande termiska egenskaper och beteenden kan olika byggnaders reaktion på styrsignaler variera. Uppskalningen som sker proportionerligt innebär att alla byggnader som inkluderas antas ha liknande tidskonstant, komfortkrav och värmesystem. I praktiken kan dessa faktorer variera betydligt vilket gör att resultaten bör tolkas med viss försiktighet och mer som en indikation på hur flerbostadshus kan bidra till flexibilitet i ett fjärrvärmesystem, snarare än exakta värden för effektreduktion. Vid hänsynstagande till dessa osäkerheter gällande generalisering bör studiens generella struktur vara applicerbar på andra system med viss anpassning. Resultaten visar att även relativt små förändringar i enskilda byggnader kan bidra till betydande effekter på systemnivå när större delar av kundbasen deltar, vilket besvarar studiens centrala bedömning av laststyrning.

Sammanfattningsvis visar resultaten från MPC-optimeringen att laststyrning i flerbostadshus kan bidra till en markant effektreducering på systemnivå. Detta besvarar delar av studiens syfte angående att bedöma flexibilitetspotentialen på kundsidan och dess påverkan på Mälarenergis fjärrvärmesystem. Genom analys av olika deltagandegrader tydliggörs det att även relativt låga nivåer av kunddeltagande kan bidra till märkbara fördelar och att potentialen ökar när fler byggnader deltar. Resultaten indikerar därmed att laststyrning kan vara ett effektivt verktyg för att frigöra kapacitet i fjärrvärmesystemet och kraftvärmeverket. Genom laststyrning kan utrymme för optimerad drift baserat på elpriser och värmebehov skapas.

6.2 Produktionsoptimering (EO3)

Produktionsoptimeringen som utförts i EO3 visar hur kraftvärmeverket skulle kunna drivas för att minimera kostnaderna under de tre perioderna som studerats. Tabell 11 visar relativt små förändringar gällande kostnad och elproduktion, och i vissa fall till och med högre kostnader än tidigare. En möjlig förklaring är att Mälarenergis fjärrvärmesystem idag redan har en hög grad av flexibilitet genom befintliga ackumulatorer, inklusive ett bergrum, vilket innebär att marginalnyttan av ytterligare optimering begränsas. Ackumulatorerna jämnar redan ut stora effektvariationer, vilket medför att laststyrning på kundsidan inte alltid leder till tydliga förändringar av produktionsplaneringen.

En annan observation i resultaten är att laststyrningen bidrar till betydligt lägre kostnader under vinterperioden, till skillnad från vår- och höstperioden där kostnadsbesparingen är betydligt lägre eller till och med negativ. Värmebehovet under januari månad är markant högre och kräver en produktion från kraftvärmeverket närmare högsta möjliga värmeproduktion. Under dessa förhållanden utnyttjas ackumulatorerna till högre grad för att jämna ut variationer i värmelasten. Laststyrningen på kundsidan får en tydligare påverkan på produktionsplaneringen under sådana perioder och därmed även kostnaderna. Under andra perioder är befintliga ackumulatorer större i förhållande till värmebehovet, vilket påverkar nyttan av laststyrning. Resultaten från januari visar därför att laststyrningen är mest värdefull när systemet är hårt belastat och när ytterligare flexibilitet är nödvändigt för att undvika dyrare produktionsalternativ eller behovet av spetslast.

Att kostnaderna i vissa fall uppgår till över 100 % innebär att produktionsoptimeringen leder till något högre kostnader än basfallet. Detta behöver inte betyda att optimeringen utförts felaktigt, utan kan i stället tolkas som en konsekvens av att flexibiliteten i systemet är begränsad under dessa perioder. När värmebehovet ligger nära eller under baslastnivån är det inte säkert att det finns värmeproduktion att flytta från dyra till billigare timmar vilket leder till att vissa styrningar resulterar i marginellt högre kostnader. Detta förklarar varför vår- och höstperioden uppvisar en ökning i kostnader trots optimering, i jämförelse till vinterperiodens kostnadsminskning där produktionen ofta ligger över baslast.

En viktig felkälla i denna del av studien som bör diskuteras är perioden som användes vid optimering i programmet. Optimeringen utfördes för ett helt år, med justerade effektbehov för undersökta perioder och historiska effektbehov för övriga perioder. Analysen fokuserar på endast tre specifika perioder, vilket innebär att optimala beslut som fattas för de studerade perioderna kan påverkas av kostnads- och produktionsförhållanden i andra månader före och efter perioderna. Detta betyder att resultaten för de analyserade perioderna inte är isolerade från andra perioder och att optimeringen potentiellt kan ha prioriterat andra delar av året för att slutligen uppnå lägsta totala kostnad över hela året. Med andra ord kan de ökade kostnaderna i oktober och april-maj delvis också bero på genomförandet av optimeringen. Detta bör betraktas som en metodologisk begränsning och en indikation på att en framtida periodspecifik optimering bör utföras.

Resultaten visar också att elproduktionen minskar i nästan alla scenarier, vilket är en naturlig konsekvens av att värmebehovet jämnas ut. När värmebehovet minskar i de optimerade scenarierna enligt Tabell 10, på grund av att topparna kapas mer än dalarna fylls, och den totala värmeproduktionen sjunker minskar även elproduktionen. Detta eftersom kraftvärmeverket producerar el i relation till värme, vilket förklarar varför elproduktionen ligger strax under historiska nivåer i samtliga undersökta perioder. Samtidigt är det tydligt att värmeproduktionen procentuellt minskar mer än elproduktionen, vilket innebär att andelen el i relation till producerad värme faktiskt ökar. Det är också viktigt att understryka att mer el teoretiskt skulle kunna produceras, men att detta inte anses lönsamt om inte värmebehovet finns, beroende på elpris. Kraftvärmeverket har som huvuduppgift att producera värme för att tillgodose värmebehovet, vilket gör att produktionen ofta styrs av värmelasten och inte tvärtom.

Trots att resultaten inte visar stora kostnadsbesparingar under vår- och höstperioden kan de vara värdefulla ur ett framtidsperspektiv. Vid potentiella framtida förändringar, såsom annorlunda produktionsmix, ökad volatilitet av elpriset, eller utfasning av någon av ackumulatorerna eller produktionsenheterna, kan laststyrningens påverkan på produktionen öka betydligt. Resultaten kan på så vis användas för att undersöka hur laststyrning eventuellt bör integreras i framtida investeringsbeslut och hur flexibilitet på kundsidan kan samspela med produktionen i ett mer dynamiskt energisystem. Utöver förbättrade möjligheter till fördelaktiga investeringsbeslut kan laststyrningen användas i närtid vid speciella situationer som till exempel under haverier av produktionsenheter. Detta skulle potentiellt minska behovet av dyrare tillfällig värmeproduktion.

Slutligen bör det noteras att den totala mängden värme som säljs minskar något i samtliga scenarier och perioder, vilket påverkar både elproduktion och kostnader. Detta beror delvis på, som tidigare diskuterat, toppkapningen och fyllningen av dalar i effektkurvan, men även på att komfortkravet i optimeringen av byggnaden utgår från ett konstant börvärde för innertemperaturen vilket inte alltid stämmer överens med den historiska temperaturprofilen som varierar kraftigt. Detta innebär att byggnaden ibland värms mindre än historiskt som medför lägre energianvändning, vilket också påverkar produktionsoptimeringen. Detta kan hanteras i framtida studier genom att införa en term angående energibalans i optimeringens målfunktion.

6.3 Prismodellsjustering – besparingsterm

Den föreslagna prismodellsjusteringen syftar till att skapa tydliga och ekonomiska incitament genom en besparingsterm för att gynna kunder som väljer att implementera laststyrning. Eftersom studiens fokus delvis ligger på att identifiera hur en prismodell kan justeras för att spegla systemnyttan av flexibilitet, snarare än att utveckla en fullständig dynamisk tariff eller genomföra en praktisk implementering. Har besparingstermen utformats utifrån att vara enkel att förstå, rättvis och tydlig. Detta är i linje med studiens syfte och forskningsfråga, som syftar till att få kunder att bidra med värmeflexibilitet i form av prisincitament, snarare än att utveckla en ny prismodellsstruktur.

Detta angreppssätt ligger i linje med tidigare forskning av Mokhtari och Bai, som visar att dynamisk prissättning är ett effektivt sätt att styra värmelaster och aktivera flexibilitet i fjärrvärmesystem. Dynamisk prissättning fungerar genom att priset styr kundernas värmeanvändning över tid. På ett liknande sätt fungerar laststyrning, där det i stället är systemets belastning som styr förändringen av värmebehov hos kund. I båda fallen handlar det om att påverka kundernas värmebehov i tiden för att jämna ut effekttoppar, så principen är densamma.

Mokhtari et al. (2025) förklarar i sin studie att dynamiska priser fungerar som en tydlig signal som får kunder att frivilligt flytta sin värmeanvändning i tiden när priset varierar. Detta antyder att kunder även kan acceptera att deras värmeanvändning justeras automatiskt av leverantören beroende på nätets belastning, särskilt i utbyte mot en ekonomisk ersättning

i form av ett rabatterat pris. Bai et al. (2022) betonar vidare att många kunder är villiga att anpassa sin värmelast, men saknar kunskap eller verktyg för att göra det själva. Därför lyfts återigen dynamisk prissättning som ett effektivt sätt att möjliggöra lastförflyttning utan att kunden behöver vara aktiv i styrningen. Detta motiverar skapandet av besparingstermen som tas fram i denna studie.

Till skillnad från dessa studier, som använder mer avancerade optimeringsmetoder för att generera timvisa prisprofiler, bygger förslaget på besparingstermen i denna studie på en förenklad men robust princip. Där ersättning till kund speglar den faktiska systemnytta som laststyrningen genererar. Genom att uttrycka systemnyttan som ett värde per reducerad kilowatt, baserat på hur mycket kostnaderna minskar när effekttopparna sänks, skapas ett rättvist mått på flexibilitetens ekonomiska värde. Detta möjliggör en prismodell där en andel av systemnyttan tillfaller kunden, medan resterande del kvarstår hos energibolaget, i detta fall Mälarenergi. På så sätt balanseras kundincitament med ekonomisk stabilitet för leverantören.

En viktig styrka med denna ansats är att den är praktiskt genomförbar. Förslaget på besparingstermen kräver ingen avancerad modellering av kundernas styrstrategier, komfortgränser eller tekniska system, vilket ofta är faktorer som krävs vid mer avancerade prismodellstariffer. Modellen är dessutom enkel att kommunicera till kunder, eftersom ersättningen uttrycks i kronor per reducerad kilowatt och kan integreras i deras befintliga värmeavtal eller effektabonnemang.

Modellen har dock vissa begränsningar. Besparingstermen fångar inte variationer i flexibilitet inom månaden, och inte heller skillnader mellan kundsegment och potentiella reboundeffekter som kan uppstå när man ska ta igen energimängden. Modellen tar heller inte hänsyn till hur kundernas beteende kan förändras från en månad till en annan. Dessa aspekter skulle kunna studeras vidare genom att kombinera modellen med mer detaljerade flexibilitetsmodeller och dessutom att testa den i praktiken.

7 SLUTSATSER

Detta examensarbete syftar till att undersöka hur laststyrning på kundsidan bidrar till reducerade effekttoppar i Mälarenergis fjärrvärmesystem. Den identifierade effektreduktionen används sedan för att kvantifiera den systemnytta som flexibiliteten skapar genom att analysera hur produktionskostnader och drift påverkas. Slutligen utvecklas även ett förslag på en besparingsterm, vars syfte är att representera systemnyttan som laststyrning bidragit till och används som ekonomiskt incitament för att gynna både kund och Mälarenergi.

Arbetet består av tre delar, modellering av laststyrning, produktionsoptimering i EO3 och slutligen prismodellsjustering i form av besparingstermen. Modelleringen av laststyrning är baserad på en MPC-styrning där byggnadens värmedynamik simulerades under olika perioder, och där små tillåtna variationer i inomhustemperaturen användes för att jämna ut effektbehovet. Modellen och optimeringen visar att flerbostadshus kan bidra med en tydlig och praktiskt användbar effektbaserad flexibilitet på kundsidan. Modellen lyckas jämna ut byggnadens effektbehov genom att tillåta små variationer i innertemperaturen inom bestämt komfortintervall, vilket resulterar i märkbar reducering av toppeffekter i alla studerade perioder. Effektreduktionen ökar med deltagandegraden och redan vid måttliga nivåer av kunddeltagande kan betydande systempåverkan identifieras. Forskningsfrågan besvaras då redan vid 20 % deltagande bland flerbostadshusen reducerar systemets maximala effekt med cirka 3 %, beroende på period. Vid 50 % deltagande ökar reduktionen till omkring 6 %, och vid 100 % deltagande uppnås ungefär 12 %. Laststyrningen bidrar därmed till att jämna ut effektprofilen i samtliga studerade perioder, utan att komfortkraven överskrids.

Nästa steg i arbetet handlar om Produktionsoptimering i EO3 där flexibilitetspotentialen kvantifieras och påverkan på Mälarenergis systemdrift analyseras. Resultaten visar att laststyrningen på kundsidan ger begränsad systemeffekt under perioder som höst och vår, men ger betydande flexibilitet under högt belastade perioder som vintertid. Detta grundar sig i att Mälarenergi har stora värmetillgångar i form av ackumulatortankar och bergrum som används för att jämna ut effektkurvorna under perioder där systemet är låg till måttligt belastat. Detta redovisas tydligt för höst- och vårperioderna där totalkostnaderna i vissa scenarion ökar. På vintern räcker inte värmetillgångarna till vilket gör att laststyrningsmodellen användas för att reducera toppar som annars hade täckts av spetslast, vilket direkt resulterar i stora kostnadsbesparingar. Dessutom minskar värmeproduktionen något i samtliga scenarier som följd av att effekttopparna reduceras mer än dalarna fylls. Detta medför att även elproduktionen minskar, men andelen producerad el i relation till producerad värme ökar. Frågeställningen om hur flexibilitetspotentialen påverkar Mälarenergis systemdrift kan således besvaras med att effekttopparna i systemet tydligt minskar, men att påverkan på produktionskostnader och elproduktion varierar mellan perioderna. Den största systemnyttan uppstår under vinterförhållanden, då laststyrningen ersätter dyr spetslast och därmed ger betydande ekonomiska fördelar.

Den sista delen av examensarbetet består av förslaget till en utvecklad besparingsterm för att skapa ekonomiska incitament för kunder att implementera laststyrning. För att besvara frågeställningen utvecklades en term där systemnyttan av laststyrning beräknades månadsvis genom att jämföra produktionskostnader med och utan effektreduktion. Denna systemnytta uttrycktes därefter som ett värde per reducerad kilowatt, vilket möjliggjorde att en andel av

kostnadsbesparingen kunde tilldelas kunden som en effektrabatt. Termen är transparent och rättvis och bygger på att ersättningen ska spegla den faktiska nytta som flexibiliteten genererar i fjärrvärmesystemet, snarare än att baseras på avancerade prisprofiler. Slutsatsen är att en prismodell som fördelar en del av systemnyttan till kunden skapar ett tydligt och rättvist incitament för att bidra med effektflexibilitet. Modellen kan dessutom integreras i befintliga prismodeller utan att ändra deras grundstruktur, vilket gör den praktiskt genomförbar och lätt att kommunicera och implementera. Sammantaget visar tidigare forskning att värmeflexibilitet nås genom att flytta värme i tid och att priset ofta är den bakomliggande faktorn. Detta motiverar därför utvecklingen av en systembaserad besparingsterm som besvarar forskningsfrågan genom att erbjuda ekonomiska incitament för kunden, samtidigt som Mälarenergi gynnas av att fler kunder implementerar laststyrning och säkerställer därmed en jämnare och mer balanserad effektefterfrågan.

8 FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE

Resultaten visar tydligt att laststyrning kan skapa betydande systemnytta för Mälarenergi och att en besparingsterm kan utformas för att främja värmeflexibilitet på kundsidan. Under arbetets gång identifierades dock flera utvecklingsmöjligheter som skulle kunna fördjupa analysen och ge resultat som ligger närmare en verklig implementering.

Ett första förslag på fortsatt arbete är att praktiskt testa besparingstermen. I denna studie utvärderades den aldrig i verkligheten. Genom att uppskatta installationskostnader och fastställa en rimlig kundandel av den återstående systemnyttan hade termen kunnat implementeras direkt i en befintlig prismodell. Ett sådant pilotprojekt skulle ge värdefull kunskap om kundernas respons, faktisk aktiverad flexibilitet och hur ersättningsstrukturen fungerar i praktiken.

Ett andra förslag på förbättring rör begränsningen i kunddata. Studien baserades på en enda representativ flerbostadsbyggnad, vilket ledde till generaliseringar och antaganden om att alla byggnader inom segmentet beter sig likadant. Genom att inkludera flera byggnadstyper och analysera skillnader i konstruktion, drift och flexibilitet skulle resultaten bli mer verklighetsbaserade. Detsamma gäller kundbeteenden och komfortnivåer, där en fallstudie av acceptabla temperaturvariationer hade gjort det möjligt att bättre uppskatta faktisk flexibilitet och sätta mer realistiska scenarier för deltagandegrader.

Ett tredje förslag är att testa modellen i andra fjärrvärmenät. Mälarenergi har stora värmelager som dämpar effekttoppar, vilket sannolikt innebär att systemnyttan i denna studie underskattas. I nät med mindre lagringskapacitet skulle laststyrning få större påverkan på produktion, kostnader och systemdrift. Genom att tillämpa modellen på nät med olika lagringsvolymer, produktionsmix och lastprofiler kan framtida studier ge en mer heltäckande bild av modellens potential och begränsningar.

Sammanfattningsvis finns flera tydliga vägar för vidare arbete. Genom att kombinera praktiska tester, mer omfattande kunddata och analyser av andra fjärrvärmenät kan framtida studier ge en mer realistisk bild av hur laststyrning faktiskt fungerar i praktiken.

9 DEKLARATION OM ANVÄNDING AV STORA SPRÅKMODELLER (LLM:ER) I SKRIVPROCESSEN

Vi bekräftar användningen av Microsoft Copilot för språkredigering och förbättring av läsbarheten. Innehåll är utvecklat på egen hand och verktyget användes därför inte för att generera fakta eller för att göra tolkningar. Vi tar därmed fullt ansvar för riktigheten, originaliteten och den akademiska integriteten i allt innehåll som presenteras i detta examensarbete.

REFERENSER

Bai, L., Pinson, P., & Wang, J. (2022). Variable heat pricing to steer the flexibility of heat demand response in district heating systems. *Electric Power Systems Research*, *212*, 108383. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108383

Cederblad, M., & Dahlberg, A. (2022). *Heat storage in buildings: Achieving thermal peak shaving through indoor temperature flexibility* (Masteruppsats). Mälardalens universitet, Akademin för ekonomi, samhälle och teknik, Framtidens energi. https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1675358/FULLTEXT01.pdf

Dhaliwal, G., Gunay, B., & Beausoleil-Morrison, I. (2026). Parametric analysis of model predictive control for residential HVAC systems. *Energy and Buildings*, *351*, 116662. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116662

Drgoňa, J., Arroyo, J., Cupeiro Figueroa, I., Blum, D., Arendt, K., Kim, D., Ollé, E. P., Oravec, J., Wetter, M., Vrabie, D. L., & Helsen, L. (2020). All you need to know about model predictive control for buildings. *Annual Reviews in Control*, *50*, 190–232. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.09.001

Energimarknadsinspektionen, (2023-08-14), *Analys av fjärrvärmemarknaden*. https://ei.se/download/18.76bbf3bf18d54be176612cc/1706683149088/Konsultrapport-Analys-av-fj%C3%A4rrv%C3%A4rmemarknaden-Sweco-2023.pdf

Guelpa, E., Marincioni, L., Deputato, S., Capone, M., Amelio, S., Pochettino, E., & Verda, V. (2019). Demand side management in district heating networks: A real application. *Energy*, *182*, 433–442. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.131

Guelpa, E., & Verda, V. (2021). Demand response and other demand side management techniques for district heating: A review. *Energy*, *219*, 119440. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119440

Håkansson, H., Önnheim, M., Gustavsson, E., & Jirstrand, M. (2024). Effects on district heating networks by introducing demand side economic model predictive control. *Energy and Buildings*, *309*, 114051. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114051

Ju, H., Wang, Y., Feng, Y., & Zheng, L. (2024). Numerical Study on Peak Shaving Performance of Combined Heat and Power Unit Assisted by Heating Storage in Long-Distance Pipelines

Scheduled by Particle Swarm Optimization Method. *Energies*, *17*(2), 492. https://doi.org/10.3390/en17020492

Karasu, M. B., Yanıkoğlu, İ., Aykut, A., Ay, D., & Özpoyraz, İ. (2024). Thermal request optimization of a smart district heating system. *Energy and Buildings*, *324*, 114841. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114841

Kjeang Funkqvist, B. (2020). *Modellering och driftoptimering av laststyrning i fjärrvärmesystem* (Masteruppsats). Lunds universitet, Institutionen för energivetenskaper. https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOId=9007431&fileOId=9007432

Kontu, K., Vimpari, J., Penttinen, P., & Junnila, S. (2018). City Scale Demand Side Management in Three Different-Sized District Heating Systems. *Energies*, *11*(12). https://doi.org/10.3390/en11123370

Li, H., Sun, Q., Zhang, Q., & Wallin, F. (2015). A review of the pricing mechanisms for district heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *42*, 56–65. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.003

Lund, H., Østergaard, P. A., Sorknæs, P., Nielsen, S., Skov, I. R., Yuan, M., Thellufsen, J. Z., Mathiesen, B. V., Benson, S. M., Jentsch, A., Zhang, X., Werner, S., Wiltshire, R., Möller, B., & Duic, N. (2025). District heating in clean energy systems. *Nature Reviews Clean Technology*, *1*(8), 532–546. https://doi.org/10.1038/s44359-025-00076-8

Lygnerud, K., & Yang, Y. (2024). Capturing flexibility gains by price models for district heating. *Energy*, *294*, 130848. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130848

Energy Opticon. (u.å.). *Långtidsoptimering i Energy Optima 3*. https://energyopticon.com/sv/energy-optima-3-sv/sv-long-term-production-optimization/

Mokhtari, R., Junker, R. G., Madsen, H., & Li, R. (2025). A methodological framework for designing dynamic heat price for demand response in district heating. *Energy*, *324*, 135937. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135937

Mälarenergi. (u.å.). *Prisändringsmodell 2025*. https://www.prisdialogen.se/wp-content/uploads/2020/11/Prisandringsmodell-2025-Malarenergi.pdf

Perea-Moreno, A.-J., Muñoz-Rodríguez, D., Hernandez-Escobedo, Q., Salmerón-Manzano, E., & Manzano-Agugliaro, F. (2026). Worldwide scientific landscape on district heating systems. *Energy Efficiency*, *19*(3), 19. https://doi.org/10.1007/s12053-026-10419-4

Romanchenko, D., Nyholm, E., Odenberger, M., & Johnsson, F. (2019). Flexibility Potential of Space Heating Demand Response in Buildings for District Heating Systems. *Energies*, *12*(15). https://doi.org/10.3390/en12152874

SMHI. (u.å.). *Kan man lita på väderprognoser?* Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut. https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/vaderprognoser/kan-man-lita-pa-vaderprognoser

Song, J., Wallin, F., & Li, H. (2017). District heating cost fluctuation caused by price model shift. *Applied Energy*, *194*, 715–724. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.073

Stockholm Exergi. (u.å.). *Prisändringsmodell 2025*. https://www.stockholmexergi.se/wp-content/uploads/2024/10/Prisdialogen_2025_Prisandringsmodell_rp.pdf

Jung, T. (2016). *Effekter av prismodellsförändringar inom fjärrvärme* (Masteruppsats). Lunds universitet, Institutionen för energivetenskaper. https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOId=8878591&fileOId=8878677

Trabert, U., Pag, F., Orozaliev, J., Jordan, U., & Vajen, K. (2024). Peak shaving at system level with a large district heating substation using deep learning forecasting models. *Energy*, *301*, 131690. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131690

Wang, C., Song, J., Zhu, L., Zheng, W., Liu, Z., & Lin, C. (2021). Peak shaving and heat supply flexibility of thermal power plants. *Applied Thermal Engineering*, *193*, 117030. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117030

Wang, X., Wu, Y., & Fu, L. (2023). Evaluation of combined heat and power plants with electricity regulation. *Applied Thermal Engineering*, *227*, 120364. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120364

Wang, Z., Chen, Y., & Li, Y. (2019). Development of RC model for thermal dynamic analysis of buildings through model structure simplification. *Energy and Buildings*, *195*, 51–67. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.042

Box 883, 721 23 Västerås **Tfn:** 021-10 13 00
Box 325, 631 05 Eskilstuna **Tfn:** 016-15 36 00
E-post: info@mdu.se **Webb:** www.mdu.se