

Energimyndighetens titel på projektet – svenska <b>Nätflexibla värmepumpar</b>	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska <b>Grid flexible heat pumps</b>	
Universitet/högskola/företag <b>RISE Research institute of Sweden</b>	Avdelning/institution <b>Energi och cirkulär ekonomi</b>
Adress <b>Box 857, 501 15 Borås</b>	
Namn på projektledare <b>Markus Lindahl</b>	
Namn på ev övriga projektdeltagare <b>Claes Sandels, Maria Håkansson, Martin Borgqvist, Jens Brage, Anders Lindgren, Magnus Berg, Mats Hagelberg, David Kroon,</b>	
Nyckelord: 5-7 st <b>Värmepumpar, Flerbostadshus, Efterfrågefleksibilitet, Lastmodeller, Balansansvar, Fastighetsägare, Nätägare</b>	

## 1 Förord

Nätflexibla värmepumpar är ett nationellt forskningsprojekt inom Energimyndighetens forsknings och innovationsprogram SamspeL. SamspeL syftar till att stödja forskning, utveckling och innovation inom elnätsområdet och ska bidra till utvecklingen av ett förnybart elsystem.

Projektet har finansierats av Energimyndigheten och ingående projektpartners och har pågått under två år, 2017 - 2018. Forskningsinstitutet RISE har varit projektledare och projektet har genomförts tillsammans med tre projektpartners; värmepumpstillverkaren Nibe, teknikutvecklaren Noda Intelligent Systems samt energibolaget Vattenfall.

## 2 Innehållsförteckning

3	Sammanfattning .....	4
4	Summary .....	5
5	Inledning .....	6
5.1	Syfte och mål .....	6
5.2	Avgränsningar .....	7
6	Bakgrund .....	7
6.1	Tidigare forskning om efterfrågefleksibilitet .....	9
6.1.1	Värmepumpar och efterfrågefleksibilitet .....	10
6.2	Drivkrafter för efterfrågefleksibilitet .....	11
6.3	Hinder för efterfrågefleksibilitet .....	11
6.4	Tariffer och lagar .....	13
6.5	Koalitioner av flerbostadshus med värmepumpar .....	14
7	Genomförande .....	15
7.1	Projektgruppens sammansättning .....	15
8	Lastmodellering av byggnader (AP1) .....	16
8.1	Slutanvändarbeteende .....	17
8.2	Apparatur- och varmvattenanvändning .....	17
8.3	Värmesystemet .....	18
8.4	Fallstudier .....	18
8.5	Resultat .....	20
8.5.1	Validering av värmebehov och inomhustemperaturer i en fastighet .....	20
8.5.2	Demonstration av värmeanvändning från en aggregering av byggnader .....	21
9	Dynamiska koalitioner och agentbaserad systemmodellering (AP2) .....	23
9.1	Matematisk metod för att sönderdela optimeringsproblem .....	24
9.2	Mjukvaruarkitektur för agentbaserad optimering .....	25
9.3	Resultat .....	26
9.3.1	Översiktlig beskrivning av data .....	27
9.3.2	Översiktlig beskrivning av demonstration .....	29
10	Fallstudier av förbrukarfleksibilitet och värmepumpar (AP3) .....	32
10.1	Demand flexibility potential from heat pumps in multi-family residential buildings .....	32
10.2	Market potential for using demand response from heat pumps in multi-family buildings .....	33
11	Hinder och drivkrafter för efterfrågefleksibilitet (AP4) .....	34
11.1	Hinder identifierade i kvalitativa studier .....	34
11.2	Intervjustudie .....	35
11.2.1	Backcasting scenario .....	36
11.2.2	Rekrytering och deltagare .....	37
11.2.3	Analys .....	39
11.3	Resultat .....	39
11.3.1	Fastighetsägare om efterfrågefleksibilitet .....	39
11.3.2	Balansansvariga om efterfrågefleksibilitet .....	42
11.3.3	Gemensamma perspektiv och potentiella konflikter .....	43
12	Slutsatser och diskussion .....	44

12.1	Projekt mål och måluppfyllnad.....	44
12.2	Tekniska slutsatser.....	45
12.2.1	Frågor och utmaningar för framtiden.....	46
12.3	Marknadsmässiga slutsatser.....	46
12.3.1	Frågor och utmaningar för framtiden.....	47
12.4	Organisatoriska och användarmässiga slutsatser.....	48
12.4.1	Frågor och utmaningar för framtiden.....	48
13	Publikationslista.....	50
14	Referenser.....	52
15	Bilagor.....	55

### 3 Sammanfattning

Nätflexibla värmepumpar är ett nationellt forskningsprojekt som har finansierats av Energimyndigheten genom programmet SamspeL. Projektet syftar till att ge en bättre bild över förutsättningar och potential för efterfrågefleksibilitet med koalitioner av värmepumpar i flerbostadshus. Potentialen har utvärderats dels kvantitativt i form av beräknad effektfleksibilitet och ekonomisk nytta, dels kvalitativt i form av en intervjustudie. Målet med projektet är att öka kunskapen och möjligheterna för efterfrågefleksibilitet i flerbostadshus med värmepumpslösningar.

I ett framtida elsystem kan efterfrågefleksibilitet användas för att balansera variationerna i tillgång och efterfrågan av el genom att utnyttja den termiska trögheten i större fastigheter som använder värmepumpar. Projektet har utvärderat potentialen för automatisk styrning av el-lasten i flerfamiljshus, vilket kan bidra till att tillvarata sådan flexibilitet. I det här fallet kan en större flexibilitet uppnås genom att bilda dynamiska koalitioner av ett antal fastighetsvärmepumpar.

Inom projektet har ett bibliotek med beräkningsmodeller för att beskriva el-lastprofiler för flerbostadshus och värmepumpar tagits fram. Modellerna har därefter använts för att simulera den tekniska potentialen för efterfrågefleksibilitet. Projektet har genom simuleringar visat på tillgänglig kapacitet, uthållighet och repeterbarhet för efterfrågefleksibilitet i flerbostadshus som värms med värmepump. Simuleringar av potentialen visar att man kan frigöra 10 MW under en timme för ett lokalt nätområde med 174 flerbostadshus genom att stänga av värmepumparna gemensamt. För ett elprisområde med drygt 10 000 flerfamiljshus är motsvarande siffra ca 170 MW.

Baserat på simuleringar av efterfrågefleksibiliteten har marknadspotentialen och de ekonomiska förutsättningarna för balansansvariga och nätbolag beräknats. Resultaten visar att med dagens system och priser är besparingspotentialen relativt blygsam. Man kan dock anta att besparingspotentialen kommer öka i framtiden om andelen förnyelsebar el i systemet leder till kraftigare svängningar i tillgången på el och därmed ökat behov av efterfrågefleksibilitet. Med dagens elpriser finns störst ekonomisk potential för nätföretaget genom att minska straffavgifter och effektabonnemang. I det undersökta fallet är besparingspotentialen i ett lokalt nät motsvarande ca 2800 kr/fastighet och år. För balansansvariga i ett elprisområde finns en besparingspotential på 2,7 milj. per år att tjäna på att medverka på mFRR-marknad och reglermarknad, omräknat blir det ca 270 kr/fastighet och år. Vinsten ska ställas mot kostnader för att hålla systemet igång och eventuell installation av utrustning.

Slutligen pekar den kompletterande intervjustudien på att fastighetsägare inte tycker att de ekonomiska incitamenten att erbjuda efterfrågefleksibilitet med värmepumpar är tillräckligt starka i dag. Både fastighetsägare och balansansvariga anser vidare att lösningen måste paketeras som en helhetslösning för att det ska bli intressant att låta flerbostadshusets värmepump bidra till efterfrågefleksibilitet. Balansansvariga anser dessutom att den här typen av flexibilitet inte är tillräckligt intressant då den bedöms som för liten och därav av liten nytta.

## 4 Summary

Grid flexible heat pumps is a national research project funded by the Swedish Energy Agency through the SamspeL program. The project aims at contributing a better picture of the conditions and potentials of demand response from coalitions of heat pumps in apartment buildings. The potential has been evaluated both quantitatively through estimated load flexibility and financial value, and qualitatively in an interview study with stakeholders. The project goal is to increase the knowledge and the potential for demand response based on coalitions of heat pumps in apartment buildings.

In a future energy system, demand response can be used to balance the differences between supply and demand of electricity by taking advantage of the thermal inertia in larger buildings with heat pumps. The project has evaluated the potential to automatically control the electricity load in apartment buildings, which could contribute to such flexibility. In this case, a larger flexibility could be achieved through forming dynamic coalitions of heat pumps in apartment buildings.

In the project, a model library to describe loads for apartment buildings with heat pumps has been developed. The models have been used to simulate the technical potential for demand response. Through simulations, the project has showed available flexibility, duration and repetition for demand response in apartment buildings heated with heat pumps. Simulations show that it is possible to aggregate 10 MW of demand response during one hour in a distribution grid area with 174 apartment buildings through turning off the heat pumps collectively. This would correspond to 170 MW for a price area with approximately 10 000 apartment buildings.

Based on the simulations of demand response, we have calculated the market potential and the financial conditions for balance responsible parties and distribution grid operators. The results show that with today's system and prices the saving potential is relatively modest. However, the saving potential might increase in the future when a larger share of renewable energy lead to greater variations in the power supply, which would lead to an increased need for demand response. Based on today's electricity prices, the biggest financial potential for the distribution grid operators is to reduce the power tariff costs. In our case, the saving potential in a distribution grid corresponds to 2800 SEK/building and year. For balance responsible parties within a price area, there is an estimated saving potential of 2.7 MSEK per year (or 270 SEK/building and year) from participating in the mFRR market and control market. The final profit needs to take into account any costs for maintaining the system, and for initial installation costs for equipment.

Finally, the complementing qualitative interview study with building owners suggest that they do not find the current financial incitement strong enough to participate in demand response programs with heat pumps. Both building owners and balance responsible parties believe that demand response solutions of the kind explored in this project need to be combined with other services in a more holistic solution in order to create value. In addition, balance responsible parties are skeptical to the flexibility from coalitions of apartment buildings, as they consider it too limited and thus of limited value and interest.

## 5 Inledning

Nätflexibla värmepumpar är ett nationellt forskningsprojekt inom forsknings och innovationsprogrammet SamspeL som finansieras av Energimyndigheten. Projektet startade i januari 2017 och avslutas i december 2018.

I ett framtida elsystem med en stor andel el från förnyelsebara källor kan efterfrågefleksibilitet användas för att balansera variationer i den förnybara elproduktionen från t.ex. vind och sol. Den termiska trögheten i större fastigheter som använder värmepumpar bedöms i detta sammanhang utgöra en stor potential. Projektet har utvärderat potentialen för automatisk styrning av el-lasten, vilket kan bidra till att tillvarata sådan flexibilitet. I det här fallet kan en större flexibilitet uppnås genom att bilda dynamiska koalitioner av ett antal fastighetsvärmepumpar.

Projektet syftar till att ge en bättre bild över förutsättningarna och potentialen för efterfrågefleksibilitet med värmepumpar i flerbostadshus. Potentialen har utvärderats dels kvantitativt i form av beräknad effektfleksibilitet och ekonomisk nytta och dels kvalitativt i form av en intervjustudie.

### 5.1 Syfte och mål

Det övergripande målet med projektet är att öka kunskapen om, och därmed möjligheterna för, efterfrågefleksibilitet i flerbostadshus med värmepumpslösningar. Lösningarna ska garantera komforten hos slutanvändare och gå att replikera i stor skala till låg kostnad. Projektet ska utvärdera och studera flexibiliteten genom metoder som kan uppskatta potentialen till förbrukarfleksibilitet och simulera hur den kan användas på marknaden. Projektet ska ta fram verifierade metoder och modeller som kan utföra sådana analyser, samt applicera dessa i ett antal verkliga fallstudier.

Följande projektmål har identifierats:

1. Ta fram en botten-upp-modell för simulering av lastprofiler i flerbostadshus.
2. Ta fram en praktiskt användbar dynamisk aggregationsmodell för storskaligt utnyttjande av större värmepumpar i flerbostadshus och energinät.
3. Skapa ett modellbibliotek baserat på öppen källkod, som kan användas för att utvärdera användarfleksibilitet baserat på dynamiska koalitioner.
4. Kvantifiera nyttan med efterfrågefleksibilitet baserat på dynamiska koalitioner med värmepumpar för en elmarknadsaktör genom att:
  - a. Kvantifiera tillgänglig flexibilitet i form av hur stor effekt som kan styras upp/ned, hur snabbt och hur länge för ett givet byggnadskollektiv inom ett lokalnät.
  - b. Kvantifiera det ekonomiska värdet av flexibiliteten i en verklig kundportfölj för en koalition av byggnader med värmepump som agerar på elmarknaden.
5. Identifiera primära drivkrafter och hinder för systemtjänster av den typ som utvecklas inom projektet.

## 5.2 Avgränsningar

Följande avgränsningar har gjorts i projektet:

- Resultaten från projektet baseras på simuleringar, datamodeller och intervjuer, ingen styrning eller mätning av verkliga värmepumpar har ingått i projektet.
- Projektet har fokuserat på svenska förhållanden. Likheter och skillnader jämfört med andra länders elsystem har endast i begränsad omfattning tagits i beaktande.
- Vi har intervjuat fastighetsägare och balansansvariga om deras nytta av efterfrågefleksibilitet, hyresgäster eller andra energiaktörer har inte ingått i intervjustudien.
- Priser, marknad och lagar baseras på dagens situation.

## 6 Bakgrund

Sverige har ambitiösa miljömål gällande minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp och en ökad andel förnybar elproduktion. Flexibilitet för att balansera intermittent förnybar produktion pekas ut som ett nyckelområde för att visionen om det hållbara energisystemet ska kunna uppnås. Detta lyfts fram i många sammanhang, t.ex. i Samordningsrådet för Smarta Näts handlingsplan (SOU 2014:84, 2014) och det nu pågående uppdraget som Energimarknadsinspektionen utför avseende efterfrågefleksibilitet (Regeringen, 2015).

Just flexibilitet i efterfrågan och elkonsumenters möjligheter och incitament för att vara flexibla har identifierats som centrala frågeställningar. Detta gäller i synnerhet för hushållen och bebyggelsen, som står för ca 55 % av elkonsumtionen (beräkning baserad på elanvändning år 2014, källdata: (Energimyndigheten, 2016)). Hittills har fokus varit främst på enskilda hushåll, t.ex. (Bartusch, C., Alvehag, K., 2014), (Bartusch et al., 2011), (Broberg, 2014), (Nylén, 2011).

Det råder idag frågetecken kring vad potentialen för efterfrågefleksibilitet inom bebyggelsen är och hur den kan utvecklas för bland annat systemtjänster. Denna osäkerhet har därför gett upphov till flera forskningsprojekt som behandlar efterfrågefleksibilitet. I en doktorsavhandling (Sandels, 2016) presenteras förenklade botten-upp-modeller som kan simulera lastprofiler i småhus och kontorsbyggnader för att utvärdera efterfrågefleksibilitetslösningar. Valideringen av de utvecklade modellerna visade att dessa kan simulera representativa lastprofiler för aggregeringar av denna typ av byggnader. Relaterade modeller för simulering av förbrukning på lastnivå i byggnader har presenterats av forskargrupper på Uppsala Universitet (Widén, 2010) och Chalmers (Steen, 2015).

Möjligheterna för laststyrning har undersökts i flera fältförsök för villor finansierade genom Elforsk och ELAN-programmet. Dessa inkluderade bland annat demonstrationer i Göteborg (Fritz, et al., 2009) och i Skåne (Lindskoug, 2006). Det pågår även många värmepumpsorienterade projekt och det sker mycket

utveckling kring just el-värmda byggnader och tappvarmvattenberedares flexibilitet. Fokus är på små villavärmepumpar som regleras individuellt mot råkraftsmarknadens spotpriser. Ett typiskt sådant exempel är det svenska projektet ”Smarta kontrollstrategier för värmepumpssystem” (KTH, finansierad av Energimyndigheten) som bl.a. ska bygga två smarta styrsystemsprototyper för villavärmepumpar. Ett annat exempel är Vallentuna där ett fältförsök med 500 villavärmepumpar pågår i projektet ”Nya samverkansmodeller på elmarknaden” (SUST, finansierad av Energimyndigheten). Även detta ska främst styra mot spotpris, även om andra systemnyttor också kan ingå.

Det finns förutom dessa två svenska exempel många internationella projekt som inkluderar värmepumpar i laststyrning, t.ex. IEA Annex 42 ”Heat Pumps in Smart Grids” och inom olika delar av Horizon 2020-programmet. En byggnadstyp som saknas i ovanstående projekt och som är sparsamt förekommande i studier rörande efterfrågefleksibilitet är flerbostadshus. Dessa står för en betydande del av den totala bostadsytan i Sverige och är därmed viktiga att ta hänsyn till när storskaliga lösningar för efterfrågefleksibilitet i byggnadsbeståndet ska analyseras.

Fjärrvärme är den vanligaste uppvärmningsformen för flerbostadshus med ungefär 80 % av beståndet och det finns exempel på forskning där man undersöker flerfamiljshus möjlighet att genom sin värmetroghet balansera fjärrvärmenätet (Kensby, 2015). Resultat från denna forskning visar att tunga byggnader med en stomme av betong kan klara av relativt stora variationer i värmeförsel och samtidigt upprätthålla ett bra inomhusklimat.

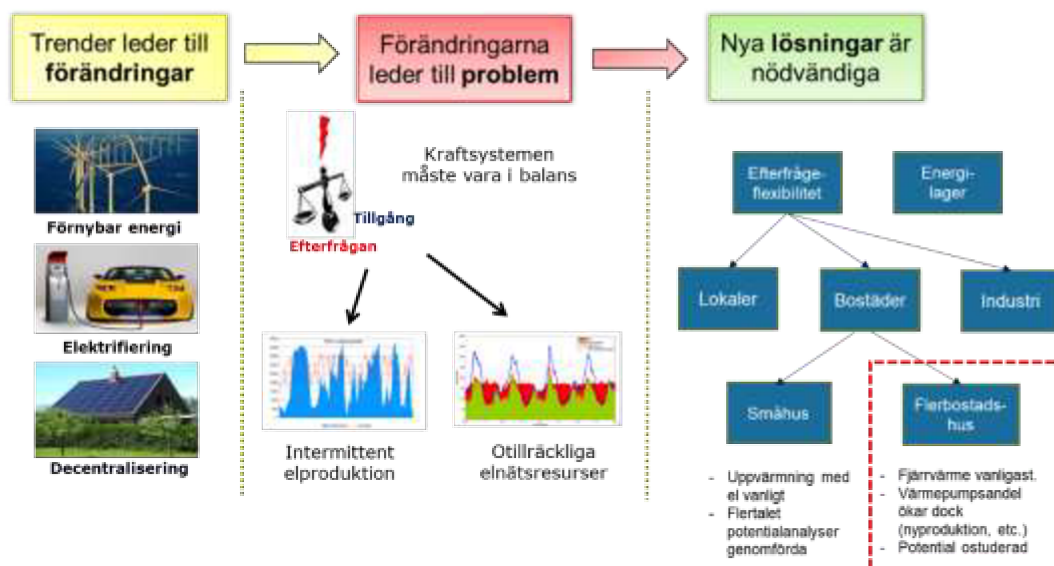
Vi har ett antal trender som kan förändra vårt kraftsystem och tillhörande elmarknader i grunden. I stora drag är de kopplade till integration av förnyelsebar energi, ökad elektrifiering i form av elbilar och värmepumpar, samt att produktionen blir mer decentraliserad; alltså att produktionsenheterna är mindre, fler och mer utspridda på lägre spänningsnivåer.

De här trenderna leder till problem kopplat till obalans mellan tillgång och efterfrågan av el. Det här beror på att produktionen är svår att prognostisera på längre tidshorisonter, och att tillkommande laster på grund av befolkningsökning, urbanisering och ökad elektrifiering genom bl.a. elbilsaddning kan öka topplasten till en nivå som överstiger elnätets dimensionering. På så vis kan inte effekten överföras till de platser där den behövs. Att enbart satsa på traditionella lösningar såsom större konventionell produktion och bygga ut elnäten är inte tillräckligt för att lösa dessa obalansproblem.

Framväxten av den digitala ekonomin i kombination med teknikutveckling öppnar för nya typer av lösningar som kan lösa problemen. Här ingår två bredare lösningskategorier: efterfrågefleksibilitet och energilager (ex. batterier). Efterfrågefleksibilitet är slutanvändarnas förmåga och förutsättningar att förändra sin förbrukningsprofil givet ett incitament såsom ett elpris. Efterfrågefleksibilitet är ett komplext område och omfattar ett brett spektrum av frågor som måste besvaras för att realisera potentialen, såsom styrning och kommunikationslösningar, en marknadsdesign som ger de lämpliga incitamenten, regulatoriska förutsättningar för elmarknadsaktörer att införskaffa dem och acceptans från slutanvändare.



Det finns olika typer av kundkategorier med individuella förutsättningar för efterfrågefleksibilitet, såsom lokaler, bostäder och industrier. Bostäder är en intressant kategori då energiförbrukningen från denna sektor står för en stor andel av den totala användningen i en region eller ett land. Uppvärmningen av bostäder har en teoretisk potential för flexibilitet på grund av termiska tröghet och ackumulatortankar i byggnaderna.



**Figur 1. Översiktsbild för trender, potentiella problem som skapas av dessa, samt nya typer av lösningar som kan adressera problem**

Två underkategorier här är småhus och flerbostadshus. För småhusen är stor andel uppvärmda med antingen direktverkande el eller värmepump. Och eftersom husägaren ansvarar för elinstallation och avtal själv så finns det färre barriärer för att realisera den här flexibiliteten. Flertalet studier har genomförts för att kartlägga denna teoretiska potential genom simulering, samt den praktiska potentialen genom pilotprojekt (Smart Grid Gotland och Klokel). Flerbostadshus har också potential för flexibilitet. Denna är generellt mindre då en stor andel av byggnaderna värms upp med fjärrvärme. Antalet byggnader som värms upp med värmepumpar ökar dock kontinuerligt, och idag finns ca 32 000 flerbostadshus som värms upp med värmepump i Sverige (Energimyndigheten, 2016). Fler fastighetsägare installerar värmepumpar som en energieffektiviseringsåtgärd och för att undvika höjda fjärrvärmekostnader. Det finns många frågor att utreda, dels vilken potential som egenlitgen finns på en teknisk och ekonomisk nivå, dels hur flexibiliteten realiserar organisatorisk då flexibiliteten måste koordineras mellan fastighetsägare och lägenhetsinnehavare med olika behov.

### 6.1 Tidigare forskning om efterfrågefleksibilitet

Samtidigt som produktionen av förnyelsebar energi i form av t.ex. vind- och solenergi blir större, ökar behovet av att kunna hantera den osäkerhet som uppstår i elnätet och system (t.ex. Fisher and Madani, 2017, Paterakis et. al., 2017). En viktig pusselbit här anses vara efterfrågefleksibilitet, som innebär att olika aktörer inklusive slutanvändare har möjlighet att baserat på någon form av extern signal

aktivt flytta delar av sin elanvändning från höglasttimmar till låglasttimmar och på så sätt både bidra till att jämna ut balansen i systemet samt göra ekonomiska besparingar (Paterakis et. al., 2017). Förbrukningen kan även flyttas till/från timmar med hög respektive låg produktion av t.ex. vind- och solkraft. Många existerande lösningar drar nytta av information- och kommunikationsteknologier (IKT) för att beräkna optimal flytt av laster och automatiskt genomföra dessa. Det finns olika kategorier av lösningar för efterfrågefleksibilitet, där en huvudkategori bygger på att kunden får olika ekonomiska kompensationer/rabatter baserat på en viss mängd flyttade laster under en förbestämd tidsperiod (s.k. ”incentive-based demand response”), och en annan huvudkategori som innebär att kunden själv agerar på prissignaler (s.k. ”price-based demand response”) (Paterakis et. al., 2017). Hittills har främst de kunder som förbrukar mycket el, t.ex. elintensiva industrier, visat intresse för och möjlighet att utnyttja efterfrågefleksibilitet (t.ex. Sweco, 2016). Andra kunder inom t.ex. fastighetsbranschen, samt hushåll, anses kunna spela en viktig roll i framtiden genom ökad efterfrågefleksibilitet (Energimarknadsinspektionen, 2016a) men här finns i dagsläget ett antal stora hinder för både incitament att delta och praktiskt deltagande, vilka summeras nedan.

Energimarknadsinspektionen (2016b) beskriver ”kunderna, producenterna av förnybar produktion, och elnätsföretagen” som de aktörer som i framtiden kommer att vinna mest på efterfrågefleksibilitet, liksom energitjänsteföretag och andra aktörer som kan erbjuda smarta tjänster och avtal relaterade till efterfrågefleksibilitet.

#### **6.1.1 Värmepumpar och efterfrågefleksibilitet**

I Sweco's studie från 2016 framställs fastigheter med värmepumpar som den aktör med störst potential att kunna ställa om delar av sin elförbrukning, vid sidan av vissa industrier. Fischer och Madani (2017) summerar 240 akademiska artiklar för att ge en samlad bild av rollen som värmepumpar skulle kunna spela i framtidens smarta nät, i den internationella sammanställningen finns dock inga insikter om användares perspektiv och tankar, eller kvalitativa perspektiv. Här beskrivs värmepumpar som en viktig komponent på efterfrågesidan i ett smart grid, eftersom de gör det möjligt att koppla isär elkonsumention och uppvärmning genom att t.ex. utnyttja byggnaders termiska tröghet. Fisher och Madani beskriver olika tekniska förutsättningar i byggnaders konstruktion som påverkar flexibiliteten hos värmepumpar, bl.a. hur stor efterfrågan på värmekomfort är, kapaciteten på värmepump och lagring. Både internationella (t.ex. Fischer och Madani (2017)) och nationella studier (Sweco, 2016) rekommenderar att man framöver fokuserar på koalitioner av värmepumpar och potentialen hos sådana att påverka flexibiliteten och marknaden, eftersom denna anses större än individuella kunder/hushåll. En viktig anledning är att små enskilda elkunder i dag inte har möjlighet att själva delta på elmarknaden genom att erbjuda sin flexibilitet, då de har svårt att nå upp till den budvolym som är minimikrav (fömrävarande 0,1 MW på Elspot) (se t.ex. Sweco, 2016).

## 6.2 Drivkrafter för efterfrågeflexibilitet

Paterakis et. al. (2017) ger en sammanställning över de fördelar efterfrågeflexibilitet kan ha för systemet, marknaden och dess aktörer. Vad gäller systemet, så har efterfrågeflexibilitet potential att göra det mer balanserat, ta bort topparna, samt minska elkonsumention vilket kan bidra till ökad energieffektivisering. Positiva effekter på marknaden kan vara lägre och mer stabila elpriser, bättre kontroll av marknadskrafter, samt ekonomiska fördelar för kunder (ibid.). Energimarknadsinspektionen (2016a) listar liknande fördelar, där efterfrågeflexibilitet kan bidra till att lättare hålla frekvensen i elsystemet; minska risken för effektbrist; använda resurserna i elsystemet mer effektivt; samt jämna ut belastningen i elnätet på lokal nivå. Det verkar alltså finnas viktiga tekniska/systemorienterade samt samhällseliga drivkrafter, men av litteraturen att döma betydligt mindre drivkrafter för enskilda hushåll och små kunder, där de ekonomiska besparingarna beskrivs som det som ska motivera kunderna att delta, men där de verkliga besparingarna i dag är små och riskerar att inte väga upp investeringarna. Energimarknadsinspektionen (2016b) framhåller här att den stora nyttan i framtiden kommer att komma från att hushållskundernas elanvändning för uppvärmning automatiskt styrs om efter prissignaler. Det framkommer dock inte hur man ska få hushållen med sig så länge besparingarna är så pass små. Ett incitament som nämns är att hushållen skulle vilja bidra till samhällsnyttan genom att erbjuda sin flexibilitet, men att detta skulle gälla i stor skala och långsiktigt kan dock anses osannolikt.

Här är det också relevant att ta upp Boork et. al.'s (2014) studie av 32 europeiska pilotprojekt inom området för smarta elnät, där målet var identifiera gemensamma framgångsfaktorer och hinder för slutanvändare att engagera sig i lösningar för smart elnät över lag. Motivationen var att öka kunskapen om de sociala förutsättningarna för användare att i olika roller involveras bättre i lösningar för smarta elnät. Boork et. al. identifierade sju framgångsfaktorer, som är så pass generella att de kan antas vara relevanta även för efterfrågeflexibilitet i flerbostadshus. Dessa ska enligt författarna inte ses som fastställda, utan ge förslag för framtida aktiviteter. Framgångsfaktorerna inkluderar:

- Att se och bemöta användare som människor med behov och förväntningar istället för ”punkter” i ett energinät.
- Att på djupet förstå användare och deras vardag eftersom verkligheten kan skilja sig från den bild man förväntas visa upp.
- Att motivera användare med positiva incitament istället för ”bestraffningar”.

Dessa handlar alltså inte direkt om efterfrågeflexibilitet, utan kan ses som allmänna riktlinjer för satsningar som syftar till att öka kunders deltagande i elsystemet.

## 6.3 Hinder för efterfrågeflexibilitet

I litteraturen finns en rad övergripande hinder som i dag hindrar ett aktivt deltagande på elmarknaden genom efterfrågeflexibilitet. Paterakis et. al. (2017) bidrar t.ex. med en aktuell översikt över efterfrågeflexibilitet internationellt, där detaljer inom varje hinder eventuellt kan skilja mellan länder beroende på hur långt

man har kommit i utvecklingen. Här har vi försökt att lista övergripande hinder och slå samman de från olika källor som pekar på samma eller liknande utmaning:

### **Regelverk stödjer förnärvarande inte efterfrågefleksibilitet (fullt ut)**

Enligt Paterakis et. al. (2017) har få EU-länder skapat de lagar som behövs. Regelverken skiljer sig markant mellan olika EU-länder där det i vissa länder finns stöd och i andra inte, vilket enligt Smart Energy Demand Coalition (SEDC) skapar en fragmentarisk marknad inom Europa (SEDC, 2015). I Sverige är det enligt SEDC's rapport möjligt enligt lag att delta i efterfrågefleksibilitet, men att detta behöver förstärkas genom att tydligare definiera roller och ansvar. Utrymme för förenklingar finns också.

### **Det är svårt för mindre aktörer att agera på marknaden**

Paterakis et. al. (2017) visar att elmarknaden behöver omformas för att tillåta nya aktörer delta på lika villkor, t.ex. med tanke på vad som ska vara lägsta möjliga bud, om det ska vara möjligt för aktörer att gå samman till koalitioner som tillsammans kan lägga större bud, och i så fall vilka geografiska begränsningar är rimliga för sådana koalitioner. Energimarknadsinspektionen (2016b) formulerar detta som: *"Det finns marknadsbarriärer och andra hinder för kunderna att sälja sin flexibilitet till marknader och/eller till nätägare."*

### **Oklara roller på marknaden**

Nya roller och affärsmodeller skulle behövas för att tillåta efterfrågefleksibilitet och framförallt då det gäller koalitioner av aktörer där det idag saknas kunskap eller förslag på lösningar. Paterakis et. al. (2017) trycker t.ex. på behovet av mer kunskap vad gäller roller och ansvar som en koalition skulle kunna ta, samt konkreta lagförändringar i flera länder där detta förnärvarande inte är lagligt. Enligt Energimarknadsinspektionens (2015) sammanställning av tekniska krav och andra villkor för efterfrågefleksibilitet, så råder det oklarhet om vilka aktörer ska erbjuda efterfrågefleksibilitet och till vem. Ytterligare en utmaning är att definiera aggregatorns roll och huruvida aggregatorn också ska ha balansansvar, för att undvika konflikter mellan olika intressen.

### **Svårt att utvärdera nyttan av efterfrågefleksibilitet**

Ytterligare hinder ligger i osäkerheten kring effekterna av införandet av efterfrågefleksibilitet på marknaden (Paterakis et. al. (2017)). Det saknas t.ex. verktyg för att följa och utvärdera de besparingar som efterfrågefleksibilitet skulle kunna leda till, samt en pålitlig bild av hur många kunder som faktiskt skulle utnyttja efterfrågefleksibilitet. Energimarknadsinspektionen (2016b) trycker på att det saknas "smarta tjänster och avtal för kunder som vill vara flexibla" eller jämföra "eventuella avtal och tjänster från olika aktörer om att använda sin efterfrågefleksibilitet."

### **Infrastruktur och investeringskostnader**

Diverse kostnader för nya investeringar av infrastruktur och teknologier utgör ett stort hinder för främst hushåll men även mindre företag (Paterakis et. al. (2017)). Energimarknadsinspektionen (2016b) lyfter här fram att ett hinder är att de flesta potentiella kunder inte har någon teknik installerad i dag som skulle möjliggöra efterfrågefleksibilitet. Energimarknadsinspektionen (2015) skriver: *”I allmänhet anses det vara dyrt att installera utrustning som krävs för effektstyrning, speciellt för direkt fjärrstyrning av konsumenternas anläggningar. Privatkunder kan t.ex. ha flera olika sorters system (direktverkande, vattenburen elvärme, golvvärme, värmepump), och det är komplicerat och dyrt att ta fram ett system som kan hantera alla dessa system. [...] Att styra konsumenters elanvändning med hjälp av spotpriset innebär också en kostnad för (i slutänden) konsumenten då det krävs att man abonnerar på information om priset. Ett företag nämner också att tjänsten inte alltid är tillräckligt tillförlitlig.”*

### **Tekniska hinder**

Ett stort hinder för efterfrågefleksibilitet som lyfts fram av elhandlare och eltjänsteleverantörer i Energimarknadsinspektionens rapport (2015) är tillgången till mätdata om kundens elanvändning som behövs för att kunna leverera tjänster. Det är i dag svårt att få tag på tillförlitliga data och att installera mätutrustning hos kunderna är dyrt.

### **Lågt intresse bland elkonsumenter**

Paterakis et. al. (2017) trycker på att den största utmaningen är få kunder intresserade och motiverade att delta, vilket bekräftas av Energimarknadsinspektionens analys (2016a) av läget i Sverige. Elkonsumenter konsumerar el för att de har behov att uppfylla, snarare än att agera utifrån ett ekonomiskt rationellt beteende och detta innebär att det är svårt att göra realistiska uppskattningar. För andra kunder än hushåll framhålls risken för störningar i den primära verksamheten som ett hinder för att vilja satsa på efterfrågefleksibilitet. Ytterligare ett hinder är bristen på tydlig, enkel information angående t.ex. kontrakt, där kunder lätt kan förstå och jämföra olika alternativ. Att slutkunden är den största utmaningen för efterfrågefleksibilitet med hjälp av värmepumpar framställs även i IEA HPT Annex 42 rapport (IEA HPT, 2017).

### **Integritet och datasäkerhet**

Paterakis et. al. (2017) nämner även frågan om integritet, datasäkerhet och databehandling, där det i dag saknas både lagar och tekniska lösningar.

## **6.4 Tariffer och lagar**

Enligt litteraturen kommer dagens närtariffer och regelverk behöva arbetas om för att stödja och uppmuntra till efterfrågefleksibilitet. Mycket kort kan sägas att nya regler måste uppmuntra och inte ”straffa” elkunder som bidrar med efterfrågefleksibilitet i olika lägen (Sweco, 2016), och att *”efterfrågefleksibilitet kommer in i prissbildningen på dagen före-marknaden och prissätts genom tidsdifferentierade elnätstariffer”* (Energimarknadsinspektionen, 2016b). Energimarknadsinspektionens (2016b) rapport listar åtgärder för ökad

efterfrågefleksibilitet i det svenska elsystemet, åtgärder inom kundområdet, elmarknadsområdet, elnätsområdet, och inom området skatter och stödsystem.

### 6.5 Koalitioner av flerbostadshus med värmepumpar

Hur många av de drivkrafter och hinder som listas ovan kan överföras till koalitioner av flerbostadshus med värmepumpar? Vad vet man inte och därmed behöver studera närmare? Av litteraturen att döma anses koalitioner av mindre aktörer/aggregerade mindre laster ha en stor potential, men det finns få detaljer om hur detta ska gå till rent praktiskt. Detta verkar alltså vara ett relativt utforskat område än så länge.

Vad gäller efterfrågefleksibilitet i flerbostadshus så visar Sweco's studie (2016) att det finns ett generellt stort intresse för el- och energifrågor bland aktörerna, samt en viss kännedom om efterfrågefleksibilitet. Däremot anses möjligheterna att utnyttja den samma begränsade, förutom för de flerbostadshus med värmepumpslösningar som har större potential. Många jobbar med energieffektiviseringsfrågor, som anses vara enklare och inte så komplexa som efterfrågefleksibilitet. Vad gäller "aggregerad förbrukarfleksibilitet" så skriver Sweco att vi i framtiden kan komma att se aggregatorer (t.ex. elhandlare) som "genom avtal om fjärrstyrning med flera mindre elkonsumenter" kan samla ihop dessas flexibilitet och bjudas på någon marknad. Däremot är det oklart i nuläget hur "roll- och ansvarsfördelningen för aggregatorer och balansansvariga kommer se ut i framtiden."

Enligt Sweco's rapport till Samordningsrådet för smarta elnät (2014) så är en viktig fråga hur många kunder som måste gå samman genom en aggregator för att komma upp i volymer som gör det lönsamt att agera på elmarknaden. Vidare står det i rapporten:

*"Drivkraften för kunden att anlita en aggregator kan vara att erbjudandet det bakas ihop med energitjänster så som optimering av värmepumpen, löpande kontroll att systemet fungerar optimalt, sammankoppling med hemlarm, etc. Flertalet fältstudier har också visat att den stora vinsten för kunden inte är att flytta lasten, utan att kunden kan minska energikonsumtionen med 10-15% genom att optimera driften av värmesystemet utan någon komfortförlust. Detta går dock att uppnå även utan att en extern part aktivt styr din anläggning. En annan drivkraft för kunden kan vara att få ett rabatterat elpris jämfört med dem som inte låter sig styras."* (Sweco, 2014)

Fischer (2017) har i sin nyligen publicerade doktorsavhandling gjort simuleringar av hur koalitioner av värmepumpar skulle fungera. Här handlar det om flera hundra värmepumpar i samma "pool"/koalition. Fischer betonar att flexibiliteten i sådana koalitioner kan variera stort både kortsiktigt under dagen och långsiktigt under året på grund av olika uppvärmningsbehov samt skiftande utomhustemperaturer. Enligt Fischer så påverkas flexibiliteten också av att det i en koalition skulle finnas en stor naturlig variation mellan fastigheterna. Faktorer som spelar roll här och som påverkar möjligheten till att utnyttja flexibilitet är t.ex. värmepumpen själv och dess

kapacitet, hur den är installerad, lagringsmöjligheter, byggnadens fysik, var i området fastigheten ligger, och inte minst de boendes behov.

## 7 Genomförande

Arbetet i projektet har varit fördelat på fyra arbetspaket, dessutom fanns ett separat arbetspaket för projektledning och resultatspridning:

AP1: Laststyrning av byggnader

AP2: Dynamiska koalitioner och agentbaserad systemmodellering

AP3: Fallstudie av förbrukarflexibilitet och värmepumpar

AP4: Hinder och drivkrafter för förbrukarflexibilitet

AP5: Projektledning

I arbetspaket 1 och arbetspaket 2 har man utvecklat olika typer av modeller, medan AP1 har fokuserat på byggnaderna har AP2 fokuserats intelligenta styrsystem för koalitioner av värmepumpar och hur de kopplar till marknaden. Modellerna i AP1 har också legat till grund för de fallstudier som genomförts inom AP3. Arbetspaket 3 har utförts genom två examensarbeten där det ena har uppskattat potentialen för efterfrågeflexibilitet från värmepumpar i flerfamiljshus. Baserat på resultaten från det första examensarbetet har därefter marknadspotentialen för förbrukningsflexibilitet utvärderats i ett andra arbete. AP4 har genomförts i form av en intervjustudie av balansansvariga aktörer och fastighetsägare. Kopplat till AP4 har också en litteraturstudie genomförts, litteraturstudien ingår som en del i rapportens bakgrund, se kapitel 6.

I kapitel 8-11 nedan beskrivs genomförande och resultat från respektive arbetspaket. Slutsatserna presenteras sedan i kapitel 12.

### 7.1 Projektgruppens sammansättning

RISE Research Institute of Sweden har varit projektledare för projektet som genomförs tillsammans med tre projektpartners; värmepumpstillverkaren Nibe, teknikutvecklaren Noda Intelligent Systems och energibolaget Vattenfall. I projektgruppen har följande personer ingått:

Markus Lindahl	RISE (Projektledare)
Claes Sandels	RISE
Maria Håkansson	RISE
Martin Borgqvist	RISE
David Kroon	Nibe
Jens Brage	Noda
Anders Lindgren	Vattenfall
Mats Hagelberg	Vattenfall
Magnus Berg	Vattenfall

RISE har varit projektledare och även ansvarat för att driva arbetet i två av projektets arbetspaket, dels arbetet om lastmodellering av byggnader och dels utredningen om hinder och drivkrafter för förbrukarflexibilitet. För arbetspaketet om dynamiska koalitioner och agentbaserad systemmodellering har Noda ansvarat. Vattenfall har ansvarat för genomförande av fallstudier av förbrukarflexibilitet och värmepumpar. Detta har genomförts genom två examensarbeten. Nibe har varit behjälplig med värmepumpskunskap inom hela projektet. På de gemensamma projektmötena har slutsatser och frågeställningar från delprojekten diskuterats, det gör att alla partners har bidragit med kunskaper även i de delprojekt där man inte har arbetat lika aktivt.

## 8 Lastmodellering av byggnader (AP1)

I det här arbetspaketet har lastmodeller för flerbostadshus som är lämpliga för efterfrågefleksibilitetsstudier med många byggnader utvecklats. Den framtagna modellen har validerats mot uppmätt data från en verklig byggnad. Modellresultaten har demonstrerats från en aggregering av byggnader. För mer en detaljerad beskrivning av modell och simuleringsresultat se den bifogade artikeln ”*Modeling Aggregation of Multi-Family Building loads useful for Demand Response Analysis*” i bilaga 4.

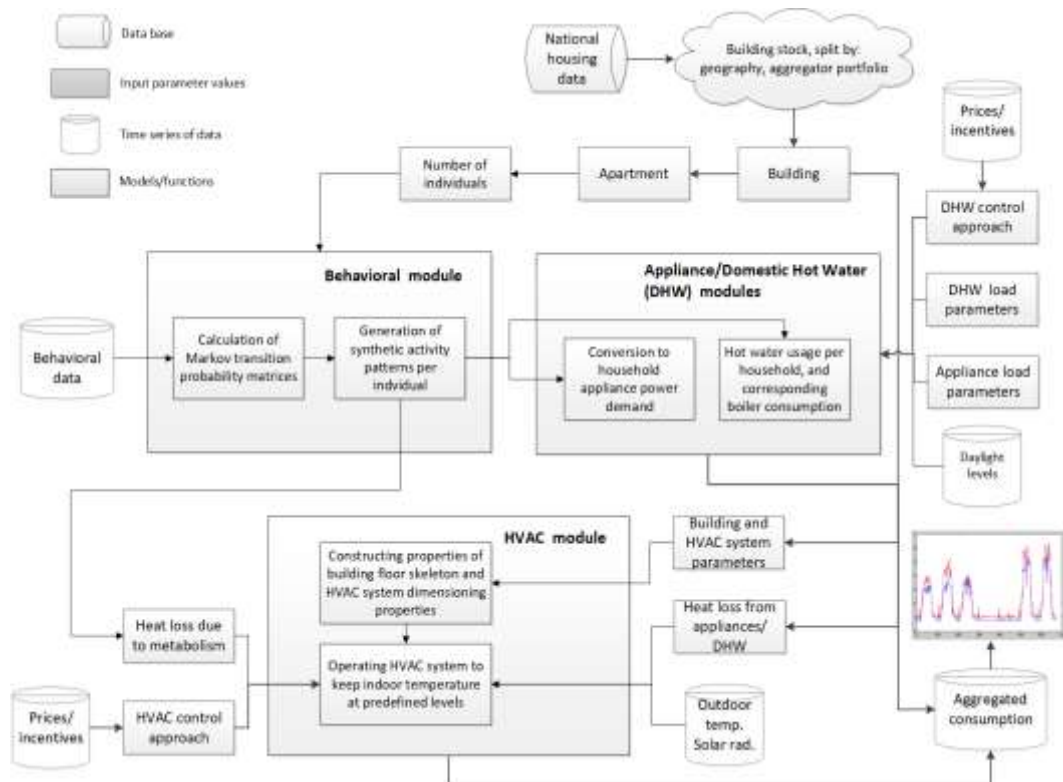
I den här delen av rapporten presenteras botten-upp simuleringsmodellen som genererar lastprofiler i flerbostadshus, som i nästa steg kan användas för att estimeras lastflexibilitet i uppvärmningssystemet. Dessutom presenteras ett axplock av de resultat som har simulerats med hjälp av data från två användarfall.

Modellen kombinerar fysiska och beteendemässiga energirelaterade processer i flerbostadshus och består av tre moduler för att representera dessa:

- (i) Beteendet hos slutanvändarna,
- (ii) Användning av varmvatten och elapparater
- (iii) Användning av uppvärmningssystem för att leverera inomhuskomfort och varmvatten.

Modul (iii) styrs primärt av väderlek, termiska egenskaper i byggnaden, egenskaper i värmesystemet, och utfall i modul (i) och (ii). Huvudmålet med modellen är att dess grundstruktur ska vara så enkel som möjligt, medan den ska vara representativ för hur riktiga flerbostadshus konsumerar energi. Diagrammet i Figur 2 visar modellens översikt gällande indata, funktioner, utdata, och relationerna sinsemellan. Varje modul är beskriven i korthet i undersektioner nedan.





Figur 2. En översikt av lastmodellen; dess moduler, indata och utdata

## 8.1 Slutanvändarbeteende

Slutanvändarnas beteenden simuleras med icke-homogena Markov-kedjor. En Markov-kedja är en tidsdiskret stokastisk process som beskriver hur olika beslut utvecklas över tid genom att man hoppar mellan olika tillstånd med viss sannolikhet. De använda data för att estimeras dessa sannolikheter är tagna från tidsstudiedata från SCB som genomfördes år 1996 med 463 deltagare. Deltagarna förde journaler om deras dagliga aktiviteter var 5e minut för en veckodag och helgdag. Data är mer än 20 år gammal men är den enda i sitt slag i Sverige, och har bevisats att kunna representera nyckelkaraktäristik i energianvändning av slutanvändare 13 år senare (Wäckelgård, 2010). Frågan är brukarmönstren har förändrats sedan studien gjordes, t.ex. har det skett en stor ökning i användningen av smarta telefoner och plattor de senaste åren. En detaljerad fortsättningsstudie med nya insamlade dagsboksdata från slutanvändare är högst intressant.

## 8.2 Apparat- och varmvattenanvändning

Markov-kedjorna genererar aktivitetsdata hos slutanvändarna som sedan kopplas till konverteringsfunktioner som översätter det till en el eller varmvattenförbrukning. Tre olika konverteringsfunktioner är definierade för förbrukningen:

1. Konstant förbrukning (el och varmvattenflöden) under aktiviteten, såsom Tv-tittande eller duschande. Här är det möjligt att apparaten är i stand-by-läge när den inte används.

2. Förbrukning som börjar när aktiviteten avslutas och sen pågår enligt en förbrukningscykel efter det, såsom att fylla diskmaskinen och sedan låta den köra sin diskningscykel
3. Förbrukning som startar när aktiviteten triggas och sedan avslutas med dess påbörjande, såsom att fylla upp ett bad.

Den enda kategori av apparater som inte kan representeras av de tre ovan nämnda konverteringsfunktioner är belysning. Här har en annan konverteringsmodell definierats som är beroende av antalet personer som är i hemmet samt dagsljusnivåer.

### 8.3 Värmesystemet

Tre typer av dynamiker är inkluderade i värmesystemsmodulen: (i) värmebehovet i byggnaden (uppvärmning och varmvatten), (ii) installationsegenskaper för värmesystemet, samt (iii) möjliga tillvägagångssätt för styrning av systemet. En förenklad lumped capacitance-metodik med en inomhustemperaturnod används för att modellera byggnadens värmebehov. Inomhustemperaturen kommer att avvika från referenstemperaturen givet ett antal störningssignaler, såsom utomhustemperaturen, solstrålning, interngenerering från apparater och människor, samt varmvattenförbrukning. Värme kommer läcka från byggnaden om utomhustemperaturen är tillräckligt låg, samt försvinna genom ventilationsluften ifall det inte finns några återvinningssystem. Dessutom plockas värme ut från systemet genom varmvattenanvändning i form av duschar och bad. Solstrålning och interngenerering kan man se som gratisenergi till byggnadssystemet. Den fysiska designen för värmesystemets installation styrs av värmeförselskonceptet (värmepumpar, fjärrvärme, eller en kombination av dessa två), den installerade värmeeffekten (kopplat till värmebehov vid den kallaste väderleken), och värmepumpens COP<sup>1</sup> Slutligen, för faktor (iii) kan man styra värmepumpen utifrån rullande medelvärde för utomhustemperaturen, eller inomhustemperaturen.

### 8.4 Fallstudier

Data från två fallstudier har samlats in för att validera och demonstrera den utvecklade lastmodellen.

Den första fallstudien innehåller timvis mätdata från ett flerbostadshus i Jönköping med 150 lägenheter som har samlat in för ett helt år. Fastigheten har en total uppvärmd yta om 9 500 kvm och är byggd på 1960-talet. I data finns timvisa energiförbrukningsvärden för fjärrvärmeimport och elanvändning från två värmepumpar i byggnaden, inomhustemperaturtidsserier från fyra lägenheter samt utomhustemperaturer från det geografiska området. Värmepumparna förser huset med basvärme och fjärrvärme används vid kallare temperaturer. Parametervärden

---

<sup>1</sup> Värmepumpens värmefaktor; dvs. hur mycket värme värmepumpen producerar i relation till förbrukad el. Värmefaktorn beror på ett antal faktorer såsom rådande utomhusklimat och temperaturskillnad mellan värmekällan och värmesänkan.

för byggnadens termiska egenskaper har samlats in för en typbyggnad från 1970-talet från Boverket (Boverket, 2013).

I det andra fallstudien ska modellen demonstreras genom att simulera ett flertal byggnader och studera den aggregerade lasten från dessa. Parametervärden för uppvärmningssystem och klimatskal har samlats in för 30 olika byggnader från Boverket i Stockholm (Boverket, 2013). Parametervärdena för de två användarfallen är sammanställda i tabellen nedan.

**Tabell 1. Parametervärden för fallstudie 1 och 2 som används vid simuleringarna**

Parameter	Fallstudie 1	Fallstudie 2
Ålder	1960	N(1965, 25) <sup>2</sup>
Antalet byggnader	4 st	30 st
Antalet personer	300 personer	2 per lägenhet
Antalet lägenheter	150 lägenheter	Beroende på byggnadsarea
Isoleringsnivå	13,1 kW/°C	Beror på byggnadsålder och storlek
Värmeåtervinning i ventilation	0,0 %	0,0 %
Luftomsättning	0,2 h <sup>-1</sup>	0,2 h <sup>-1</sup>
Termisk tröghet	100 timmar	100 timmar
Referensinomhustemperatur	21 °C	21 °C
COP för värmepump	2,5 <sup>3</sup>	I snitt 3,75 <sup>4</sup>
Dimensionerande utomhustemperatur	-14,0 °C	-14,4 °C
Uppvärmningskoncept	Bivalent	70% bivalent och 30% monovalent
Kontroller	Utomhustemperatur	Utomhustemperatur och inomhustemperatur
Värmepumpstyp	Bergvärme	33% luftvärme och 66% bergvärme

<sup>2</sup> Normalfördelning med väntevärde år 1965 och standardavvikelse 25 år

<sup>3</sup> Siffra hämtad från teknisk specifikation för värmepumpen

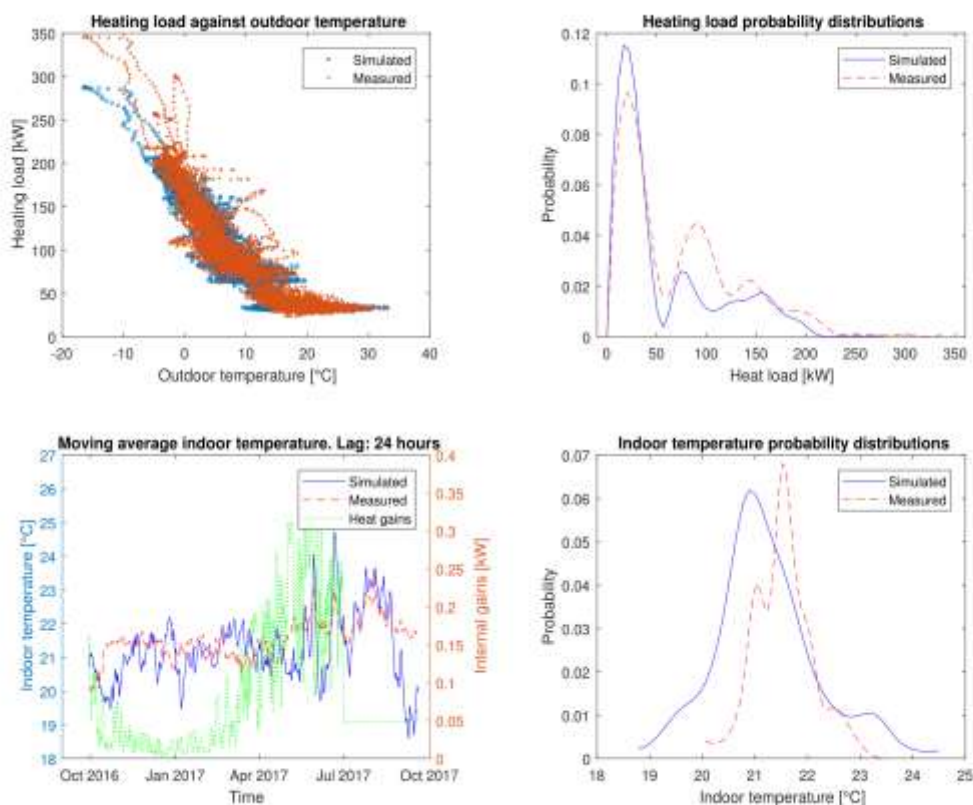
<sup>4</sup> Värmepumpsexpert på NIBE har specificerat denna siffra för bergvärmepumpar. Ett högt COP-värde kommer reducera den generella elförbrukningen för värmepumpen

## 8.5 Resultat

I den här sektionen presenteras resultaten från de två respektive simuleringsstudierna.

### 8.5.1 Validering av värmebehov och inomhustemperaturer i en fastighet

Givet indata och värden för parametrarna till modellen, så har värmebehov och inomhustemperatur simulerats för byggnaden under ett helt år. I Figur 3 visas dessa simuleringsresultat mot med de uppmätta data.



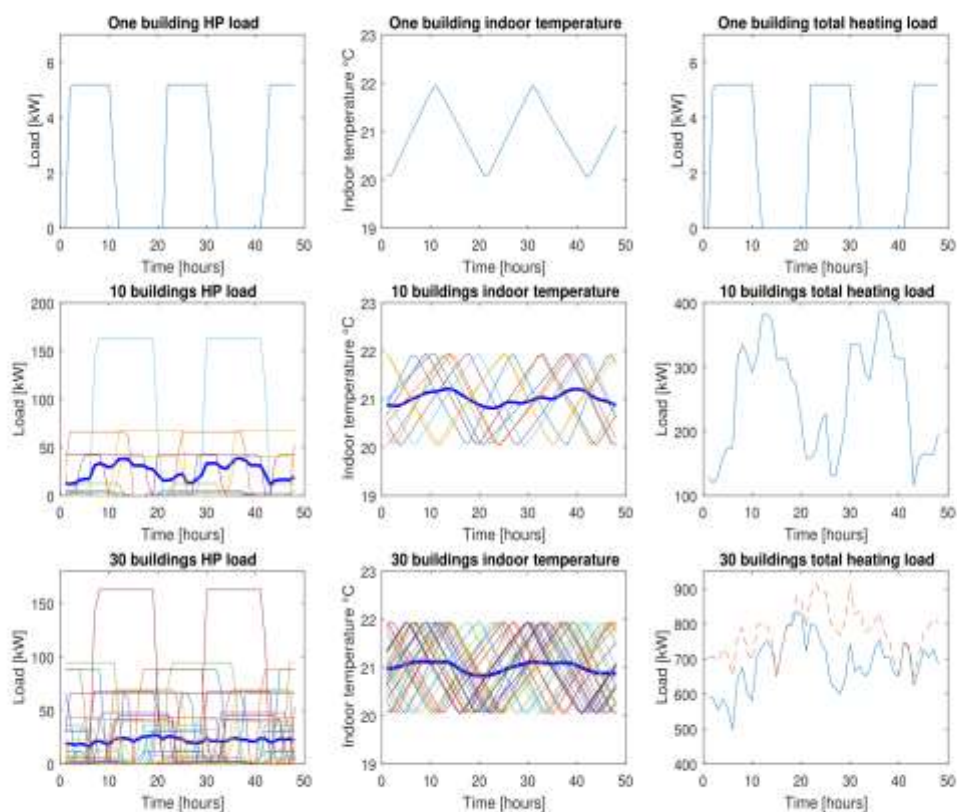
**Figur 3. Jämförelser mellan simulerad och uppmätt data för värmebehov och inomhustemperaturer**

Grafen högst upp till vänster visar värmebehovet som en funktion av utomhustemperatur för simulerat och uppmätt data. Som synes följer den simulerade data trenden hos de uppmätta data. Som framgår av figuren underskattar modellen värmebehovet vid de lägsta temperaturerna. Det kan bero på att modellen inte tar hänsyn till att distributionssystemet har högre förluster när det är kallt, vilket då måste kompenseras med mer värmeeffekt från uppvärmningssystemet. Distributionssystemet är inte modellerat p.g.a. förenklingskäl. Dessutom är installerad fjärrvärmekapacitet okänd och är istället approximerat baserat på TDUT och uppvärmd area. Approximationen kan ha en osäkerhet. I grafen högst upp till höger ser vi fördelningskurvor för den simulerade och uppmätta

värmeanvändningen. Fördelningskurvorna har liknande utseende. Dock så har den uppmätta kurvan en högre frekvens av medellastvärden (på nivån av 100 kW). Tidsserier för simulerad och uppmätt inomhustemperaturer syns i grafen längst ner till vänster. Den simulerade data följer trenden i den uppmätta hyffsat väl. Men i juni överskattar modellen inomhustemperaturen kraftigt i relation till den uppmätta serien. Det kan bero på att folk vädrar i sina lägenheter när det är varmt, vilken man inte tar hänsyn till i modellen. Notera att den gröna kurvan (internvärme) i den här grafen är konstant efter juli månad. Enheten för internvärme är kW/m<sup>2</sup>. Det beror på att solstrålningsdata inte här funnits tillgängligt för den tidsperiod, och man har istället tagit medelsolstrålningen för den tidigare tidsperioden. Fördelningskurvorna för inomhustemperaturerna visar att den simulerade data har större spridning än den uppmätta. Det här kan bero på en rad anledningar. En anledning kan vara att styralgoritmen i simuleringsmodellen inte explicit tar hänsyn till aktuell inomhustemperatur i styrningen. Det är högst sannolikt att den verkliga styrenheten reglerar uppvärmningen delvis baserat på hur styrdonen är inställda på radiatorerna i lägenheterna. Den ansatta referenstemperaturen kan därtill vara högre i verkligheten. Slutligen om man anpassar en linjär modell mellan simulerad och uppmätt data så får man en variationskoefficient ( $R^2$ ) på 93,3% för värme, och 38,0% för inomhustemperatur.

#### *8.5.2 Demonstration av värmeanvändning från en aggregering av byggnader*

Med parameterinput från Tabell 1 och utomhustemperaturdata från Stockholm så kan följande värmebehov och inomhustemperaturer simuleras med modellen för olika antal byggnader: (i) en byggnad (övre raden av plottar), (ii) tio byggnader (mittenraden av plottar), och (iv) 30 byggnader (nedre raden av plottar). Variabler som visas är: individuell värmepumpsbelast (vänsterkolumnen), inomhustemperatur (mittenkolumnen), och aggregerad total värmelast (högerkolumnen). De här graferna visas för att demonstrera vilka typer av simuleringar och resultat som kan tas fram med modellen.



**Figur 4. Översta raden: 1 byggnad, mittenraden: 10 byggnader: nedersta raden: 30 byggnader. Kolumnen till vänster: individuell värmepumpsbelast. Mittenkolumnen: individuell inomhustemperatur. Kolumnen till höger: aggregerad värmelast.**

Notera att medelutomhustemperaturen är 0 °C under de här två simuleringsdagarna. Som synes i den vänstra kolumnen av plottar så skiljer sig värmepumpens körcykler och förbrukad elektrisk effekt mellan byggnaderna. Värmepumparna är av typen start/stopp vilket betyder att de kör på full kapacitet när ett värmebehov finns. Det aktuella värmebehovet influeras av den rådande utomhustemperaturen och hur värmesystemet har körts de senaste timmarna. Storleken på värmepumpen bestäms av boyta och egenskaper i klimatskalet. Modellen kan representera olika byggnadstyper som grafen visar. Styrenheten i värmesystemet utgår från mätningar av inomhustemperaturen, därför samvarierar dessa två storheter mer eller mindre exakt. Styrintervall är  $\pm 1$  °C, och kommer att växla mellan dessa två intervallvärden. Vidare så är initialtemperaturen satt slumpvis i byggnaden, därför har varje byggnad en egen timing när de når tak respektive golvvärdet i tid. För aggregerad värmelast ser vi hur profilen generellt smetas ut när antalet byggnader i aggregering ökar. En jämnare last är mer förutsägbar och därför enklare att hantera i flexibilitetstillämpningar.

## 9 Dynamiska koalitioner och agentbaserad systemmodellering (AP2)

För att kunna förverkliga möjligheten till efterfrågefleksibilitet i fastighetssektorn krävs att de lokala styrsystemen kan planera för det egna framtida energibehovet med hänsyn till prissignaler baserat på tillgång och efterfrågan på el längre fram i tiden. Men för att utveckla sådana intelligenta styrsystem och för att utforma motsvarande marknad så är det önskvärt med verktyg för att först utvärdera olika alternativ i en simulerad miljö. Medan arbetspaket 1 tar fram ett verktyg för att simulera fastighetsbeståndets så tillhandahåller arbetspaket 2 stöd för intelligenta styrsystem med marknadskoppling. Genom att kombinera de två delarna är det möjligt att till exempel jämföra hur ett större fastighetsbestånd skulle bete sig med respektive utan intelligent styrning.

I arbetspaket 2 har vi tittat på intelligenta styrsystem implementerade med Model Predictive Control<sup>5</sup> (MPC). Det är en kontrollteknik där en modell (av hur elförbrukning påverkar komforten) kombineras med en kostnadsfunktion (elförbrukning kontra komfort) för att sedan beräkna en lämplig styrsignal genom att lösa optimeringsproblemet att ge komfort till lägsta kostnad. Varje sådant styrsystem hör i sin tur till en agent<sup>6</sup> som genom ekonomiska förhandlingar med andra agenter balanserar det egna behovet av el mot tillgång och efterfrågan. Hur de ekonomiska incitamenten utformas styr i sin tur hur agenterna samverkar. För att välja hur de bör utformas så är det nödvändigt att kunna simulera det resulterande systemet, vilket vi här möjliggör.

För att lösa optimeringsproblemet har vi utgått från Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM) (Boyd et.al. 2010), en metod för att lösa så kallade konvexa optimeringsproblem. Metoden är väl lämpad för att modellera distribuerade system (Makhdoumi och Ozdaglar, 2014) och där bland energisystem (Kraning et.al. 2012, Kraning et.al., 2013, Halvgaard, 2014). Metoden medger dessutom en ekonomisk tolkning (Walras, 1896) med en tâtonnement-process (Arrow and Debreu, 1954, Uzawa, 1960 (1 och 2)) som balanserar utbud och efterfrågan. Metoden har specialiserats på olika sätt för att underlätta det mjukvarumässiga utvecklingsarbetet. Där använder vi oss av en symmetrisk variant (Bingsheng, 2015) som ett led i att begränsa mjukvarans komplexitet och där med öka dess lämplighet för systemmodellering.

Arbetet med att utveckla mjukvara som är lämplig att tjäna som ett verktyg för modellering av energisystem har visat på stora arkitektoniska utmaningar bortom de rent beräkningsmässiga utmaningarna. När projektet startade var förväntningen att utformningen av algoritmen skulle vara den stora utmaningen och arbetet med att ta fram ett fungerande modelleringsverktyg en sidofråga, det visade sig vara tvärt om. Erfarenheterna från arbetets gång har införlivats i den senaste versionen av mjukvaran som nu medger att olika aspekter så som en agents värmebehov samt

---

<sup>5</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Model\\_predictive\\_control](https://en.wikipedia.org/wiki/Model_predictive_control)

<sup>6</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Software\\_agent](https://en.wikipedia.org/wiki/Software_agent)

dess möjlighet att med en värmepump konvertera el till värme beskrivs oberoende av varandra. Detta trots att motsvarande data administreras centralt.

Nedan följer först en beskrivning av ADMM och den variant som vi nyttjat, sedan en beskrivning av den resulterande arkitekturen och avslutningsvis resultat.

### 9.1 Matematisk metod för att sönderdela optimeringsproblem

Att lösa optimeringsproblem är ofta en synnerligen beräkningskrävande process så för att kunna adressera storskaliga energisystem så är det nödvändigt att begränsa problemformuleringen till de problem som är praktiskt möjliga att lösa, dvs. de som medger beräkningsmässigt effektiva algoritmer. De så kallade konvexa optimeringsproblemen utgör en sådan familj med goda matematiska och beräkningsmässiga egenskaper som under, för energisystem, acceptabla antaganden (om linjära modeller och konvexa målfunktioner) också är stor nog att rymma de frågeställningar vi intresserar oss för inom projektet. Speciellt rymmer familjen utmaningen att planera elkonsument för att undvika kostsamma effekttoppar.

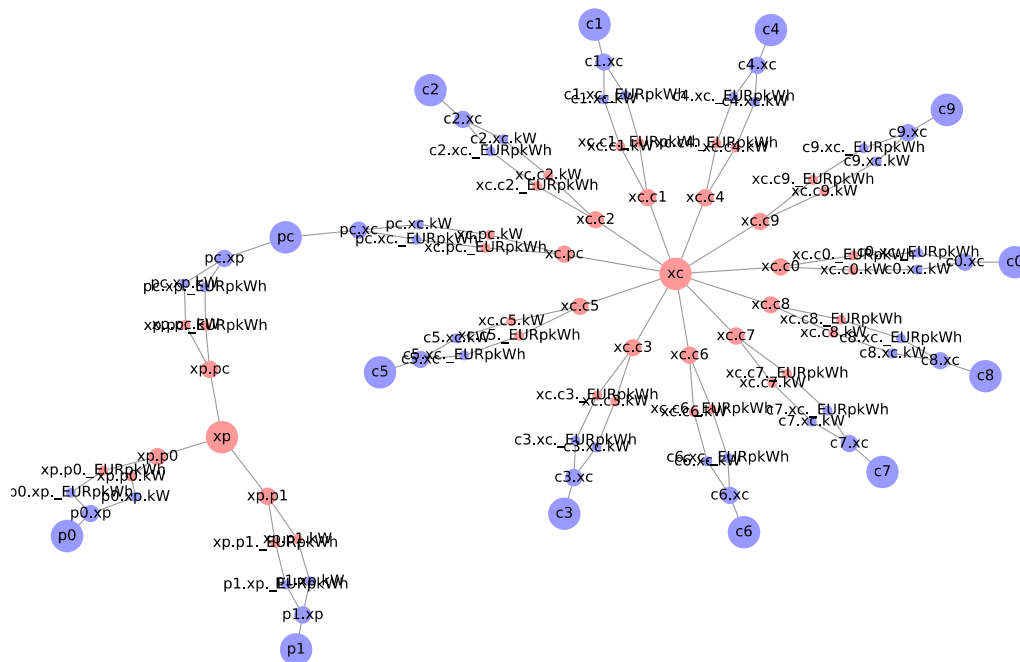
Det finns en omfattande matematisk teori kring konvexa optimeringsproblem men vi har, som redan nämnts, valt att utgå från ADMM. Metoden kan löst beskrivas som ett sätt att först tudela ett konvext optimeringsproblem för att sedan beräkna en lösning till det ursprungliga optimeringsproblemet genom att alternera mellan att beräkna lösningar för de två enklare optimeringsproblemen. De senare är i sin tur förbundna dels genom sina respektive lösningsförslag och dels genom en matematisk kvantitet (Lagrange-multiplikatorn) som också kan förstås som ett så kallat skuggpris<sup>7</sup>. De två enklare optimeringsproblemen kan därefter under de gynnsamma förutsättningar som råder i de fall vi intresserar oss för sönderdelas ytterligare. Den resulterande strukturen kan med fördel beskrivas med en tudelat nätverk av agenter där varje del består av ett antal agenter som utbyter lösningsförslag och skuggpriser med sina motparter i motsatt del.

Figur 5 nedan visar ett sådant nätverk för en mindre ort i södra Sverige. Nätverket består av tio större byggnader (c0-c9) förbundna i ett stjärnformat nätverk som försörjs av det lokala kraftbolaget (pc) som i sin tur nyttjar två produktionsanläggningar (p0, p1). Metoden alternerar mellan att beräkna lösningar för de blå respektive de röda noderna som i sin tur kommunicerar lösningsförslag och skuggpriser till sina motparter utmed nätverkets dubbla kanter. Utöver dessa kvantiteter så tillkommer bland annat en lokal utomhustemperatur per byggnad samt ett modeller för hur värmepumpens värmefaktor (COP), värmebehov och termisk flexibilitet beror på motsvarande utomhustemperatur.

---

<sup>7</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Shadow\\_price](https://en.wikipedia.org/wiki/Shadow_price)





**Figur 5.** Ett nätverk för en mindre ort i södra Sverige. De tio konsumenterna (c0-c9) försörjs av det lokala kraftbolaget (pc) som i sin tur nyttjar två produktionsanläggningar (p0, p1). Etiketterna antyder vad för slags kvantiteter som kommuniceras utmed de olika kanterna.

I exemplet ovan så har vi valt att dela det ursprungliga problemet i två mellan fysiska installationer (blåa noder) och knytpunkter (röda noder) i enlighet med Optimal Exchange (Boyd et.al. 2010, s. 58) men implementationen medger också att problem tudelas på annat sätt, till exempel mellan producenter och konsumenter. Implementationen generaliserar Sharing (Boyd et.al. 2010, s. 56) till godtyckliga nätverk på samma sätt som (Kraning 2012) generaliserar Optimal Exchange från stjärnformade till godtyckliga nätverk.

En utmaning som uppenbarade sig först senare är den ringa mängden publicerade teoretiska modeller för värmepumpar och den därtill hörande utmaningen att modellera värmepumpar på ett sätt som ryms inom ramverket för konvex optimering. Utmaningen har flera bottenar, dels uppsjön av olika sorters värmepumpar med olika sorters tekniska lösningar, del avsaknaden av teoretiska modeller för värmepumpar och dels det att värmepumpar är av naturen ickelinjära men att motsvarande modell måste linjäriseras för att ryms inom ramverket för konvex optimering. RISE bistod med en tillämpbar modell men området skulle vinna på en kombinerad experimentell och teoretisk studie.

## 9.2 Mjukvaruarkitektur för agentbaserad optimering

Implementationen nyttjar CVXPY<sup>8</sup>, ett i Python<sup>9</sup> inbäddat modelleringsspråk för konvexa optimeringsproblem som medger att problemen uttrycks på ett mer matematiskt sätt snarare än i den begränsade standardform som krävs av de

<sup>8</sup> <https://www.cvxpy.org>

<sup>9</sup> <https://www.python.org>

speciella program som används för att genomföra de tyngre beräkningarna. Modelleringspråket är inspirerat av MATLAB-paketet CVX och bygger på idén om disciplinerad konvex programmering<sup>10</sup>. Modelleringspråket bygger på öppen källkod och har under projektets löptid gått från version 0.4 till version 1.0. Utvecklingen av modelleringspråket har gett nya funktioner men också tvingat till oss omarbetning under projektets gång.

Under förutsättning att man har ett på förhand bestämt antal signaler/tidsberoende värden över på förhand angivna tidsrymder, till exempel historisk energikonsumtion för de föregående 24 timmarna, antagen energikonsumtion och skuggpris över nästkommande 24 timmar, historiskt väderdata för de föregående 24 timmarna, väderprognos för de nästkommande 24 timmarna och en modell för inomhusklimat som en funktion av energikonsumtion och väderförhållanden, så är det förhållandevis enkelt att med CVXPY implementera ADMM för att optimera energikonsumtionen över de nästkommande 24 timmarna. Men med en heterogen skara byggnader så blir situationen snabbt svåröverskådlig och därmed svårhanterlig.

Vi har här angripit utmaningen genom att märka upp variabler och parametrar med var de hör hemma bland de underliggande tidsserierna för att sedan i efterhand extrahera dessa attribut från de objekt som representerar optimeringsproblemen i fråga. Detta möjliggör att optimeringsproblemen formuleras lokalt men att I/O administreras centralt, vilket bygger bort behovet av att för hand koordinera I/O mellan olika delar av modellen. Resultatet är ett avsevärt mer lätthanterligt system.

Utöver ovannämnda lösning så omfattar systemet ett antal Python-klasser varav de två mest signifikanta är Agent och Market. Den första implementerar de lokala delarna av ADMM Sharing medan den andra koordinerar beräkningsprocessen genom att vidarebefordra meddelanden mellan agenterna och ombesörjer terminering. De två klasserna bokför också motsvarande residualer så att dessa kan inspekteras i efterhand för att bättre förstå beräkningsprocessen, till exempel för att förbättra valet av felgränser och steglängd.

Avslutningsvis så kan Market producera DOT-filer för visualisering med Graphviz<sup>11</sup> eller motsvarande mjukvara. Funktionen implementerades ursprungligen som ett stöd för felsökning men kan också tjäna som stöd för kommunikation och samtal kring modellerna. Möda har också lagts på att tillhandahålla meningsfulla felmeddelanden.

### 9.3 Resultat

Vi har implementerat ett verktyg för agentbaserad systemmodellering där den ekonomiska tolkningen av den underliggande metoden för optimering framgår. Verktyget består av ett ramverk för ADMM MPC i Python, data tillhandahållet av RISE och två Jupyter Notebooks för databehandling respektive demonstration. Exemplet har utformats för att med en överkomlig arbetsinsats kunna anpassas till andra situationer än de som valts för att demonstrera ramverket. Genom att

---

<sup>10</sup> [https://web.stanford.edu/~boyd/papers/pdf/disc\\_cvx\\_prog.pdf](https://web.stanford.edu/~boyd/papers/pdf/disc_cvx_prog.pdf)

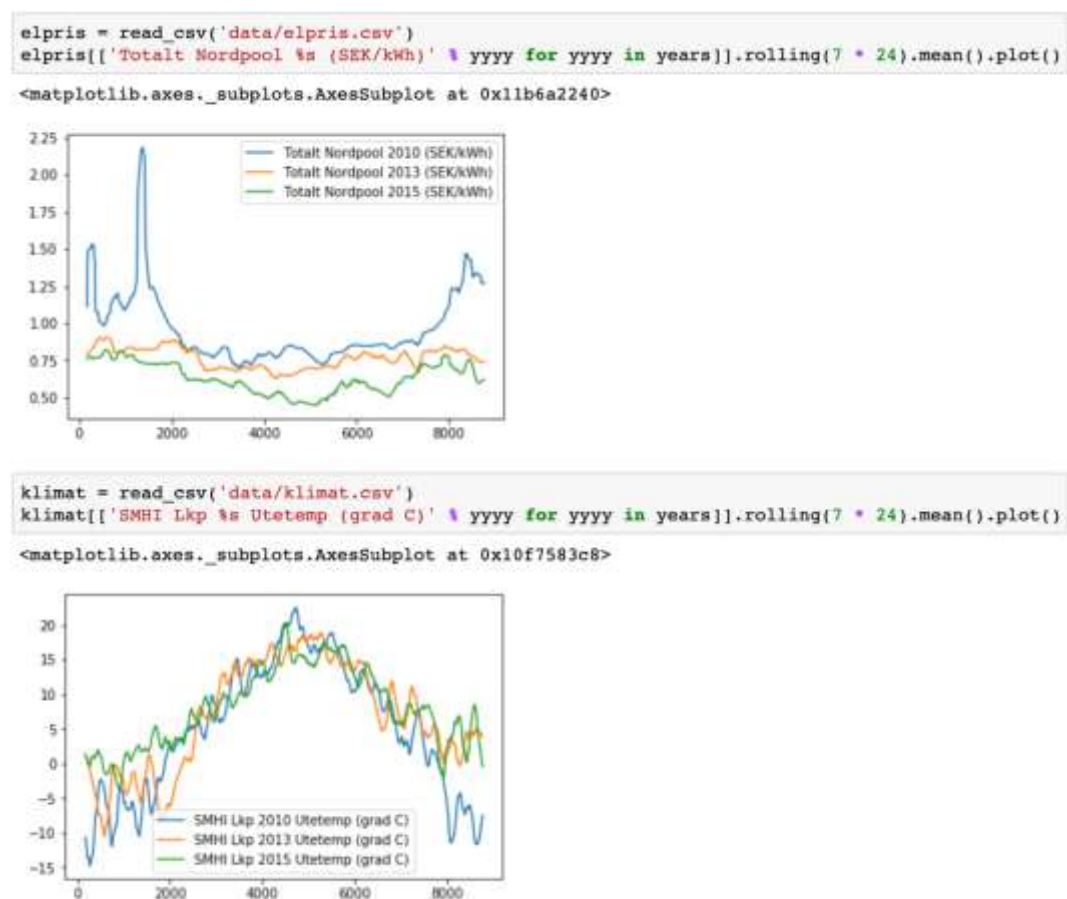
<sup>11</sup> <http://www.graphviz.org>

kombinera verktyget med i Python och MATLAB inbyggt stöd för CSV-filer så är det möjligt att samköra verktyget med modellen framtagna i arbetspaket 1 och därmed utvärdera hur intelligent kontroll samverkar med en realistisk simulering av ett byggnadsbestånd.

Det återstår att dokumentera källkoden och de två anteckningsböckerna. Detta kommer att ske utanför projektet och i samband med detta så kan också koden komma att omarbetas för bättre läsbarhet. Därefter kommer lösningen göras allmän tillgänglig som öppen källkod.

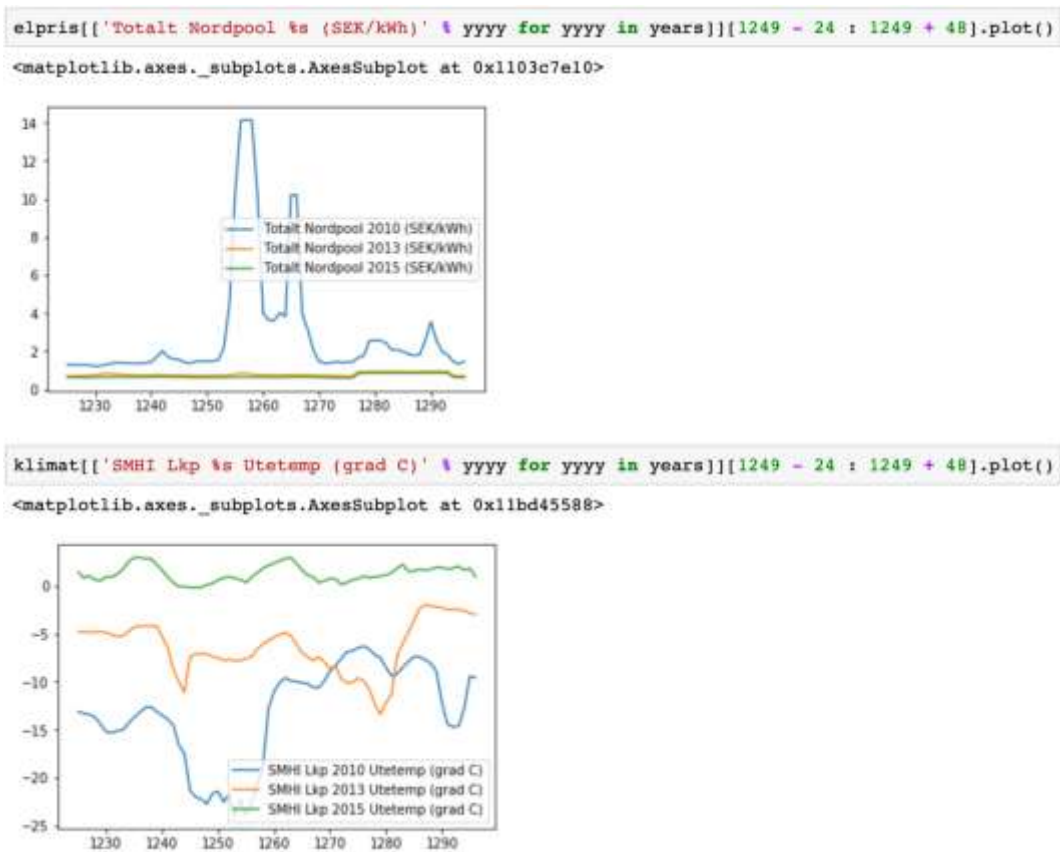
### 9.3.1 Översiktlig beskrivning av data

RISE har bland annat bistått med timvärden avseende elpriser och temperaturer för åren 2010, 2013 och 2015; ett kallt år med höga elpriser, ett normalt år och ett år med förhållandevis låga elpriser. Tiden anges i årstimmar.



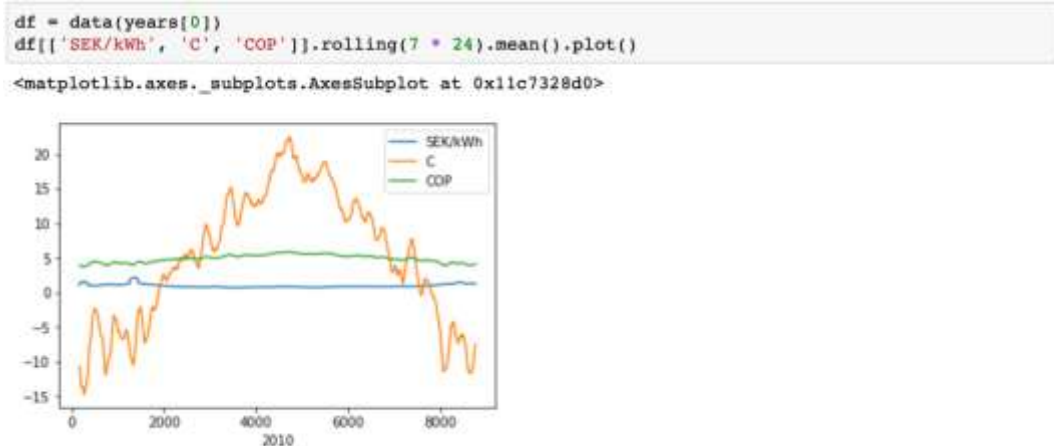
**Figur 6. Utdrag från anteckningsbok: medelvärden för elpris och utomhustemperatur beräknade över 7 \* 24 timmars tidsfönster. Specifika timmar kan avvika signifikant från dessa veckolånga medelvärden men lämpar sig inte för grafisk presentation i sin helhet.**

Demonstrationen fokuserar i sin tur på ett antal dygn runt den 22 februari som år 2010 sammanföll med låga temperaturer och höga elpriser men som för de två andra åren sammanföll med mer allmänna förhållanden.



**Figur 7.** Utdrag från anteckningsbok: Elpriser och utomhustemperaturer för ett antal dygn kring den 22 februari.

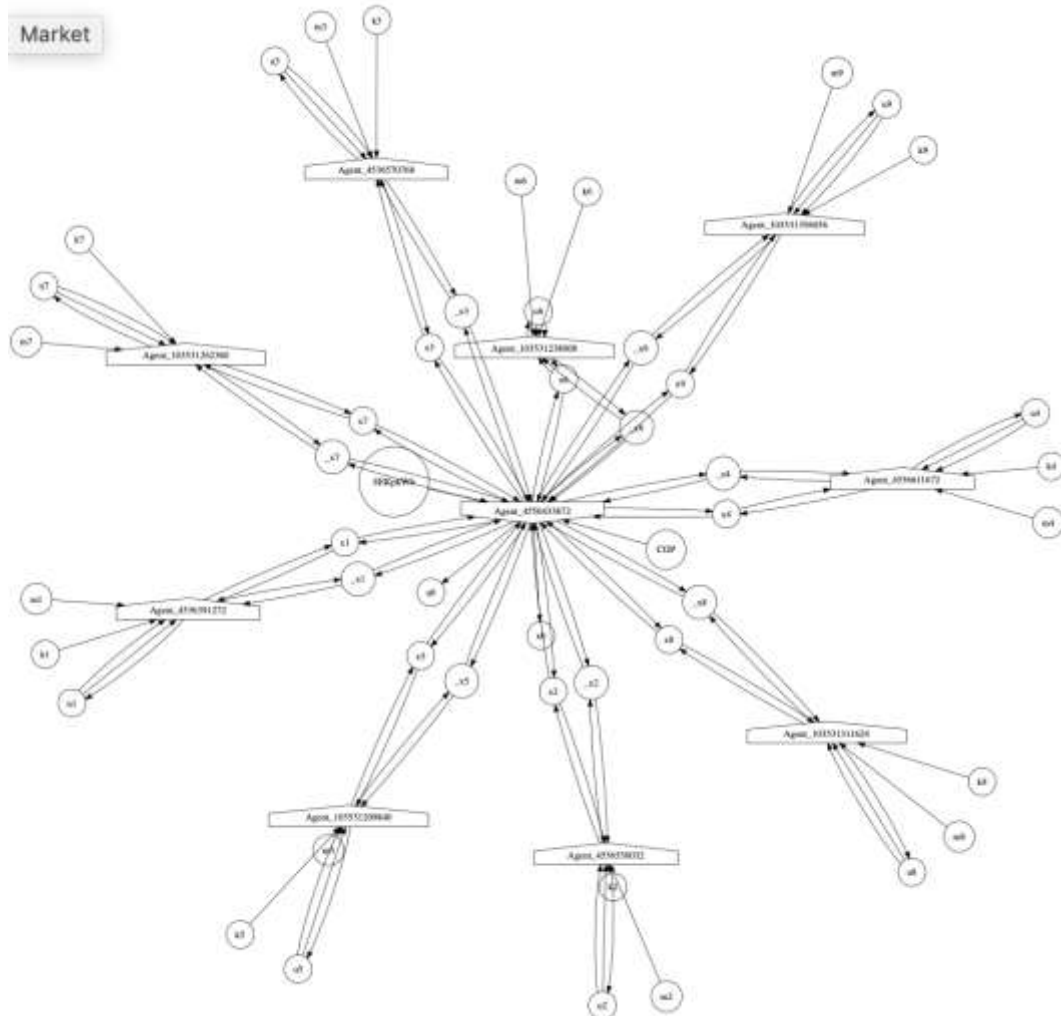
Temperaturerna har i sin tur kombinerats med en affin modell för en värmepump för att syntetisera ett tidsberoende COP-värde.



**Figur 8.** Utdrag från anteckningsbok: syntetiskt COP-värde för 2010. Situationen för de två andra åren är jämförbara.

### 9.3.2 Översiktlig beskrivning av demonstration

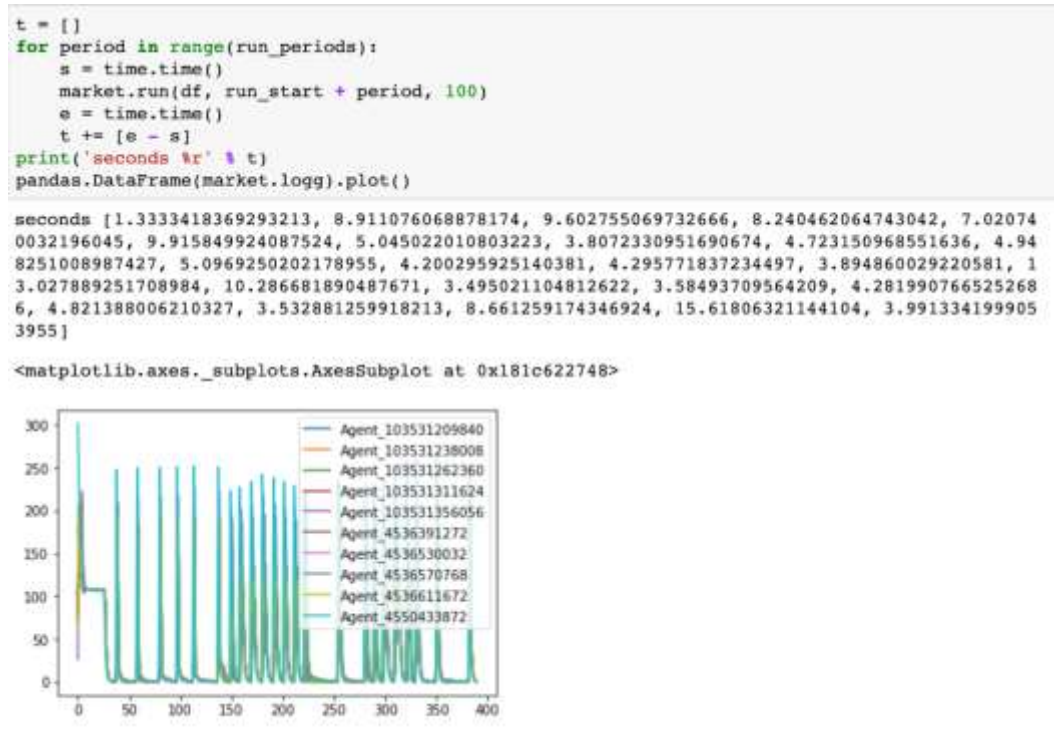
Demonstrationen avhandlar ett enkelt scenario om nio större byggnader med olika karaktäristik besörjda av en gemensam värmepump. Demonstrationen kan lätt utvidgas med ytterligare byggnader, värmepumpar och andra värmekällor så som fjärrvärme men scenariot blir snabbt svårt att överskåda för den oinvidge. Den av ramverket producerade bilden nedan illustrerar situationen.



**Figur 9. Automatiskt producerad grafisk presentation av den konfiguration om tio agenter av som nyttjats för demonstrationen. Agenterna representerar nio byggnader (husformade noder) försörjda av en gemensam värmepump (inverterad husforman nod, centrum). Cirkelarna representerar variabler (pil från) och parametrar (pil till) för vilka ramverket ombesörjer I/O;  $m$  och  $k$  betecknar komponenter i motsvarande energisignatur,  $x$  och  $_x$  betecknar kWh och motsvarande skuggpris, och  $u$  betecknar de resulterande styrsignalerna.**

Demonstrationen fokuserar på ett antal dygn runt den 22 februari under de tre åren i fråga och består i genomförandet av MPC med en 24 timmars tidshorisont som i sin tur upprepas 24 gånger och därmed simulerar styrning över ett dygn. De på varandra följande körningarna framgår tydligt i utdraget nedan som avbildar motsvarande residualer. De senare har normaliserats till multipler av vald

feltolerans och de individuella körningarna avslutas så snart den normaliserade residualen understiger 1.

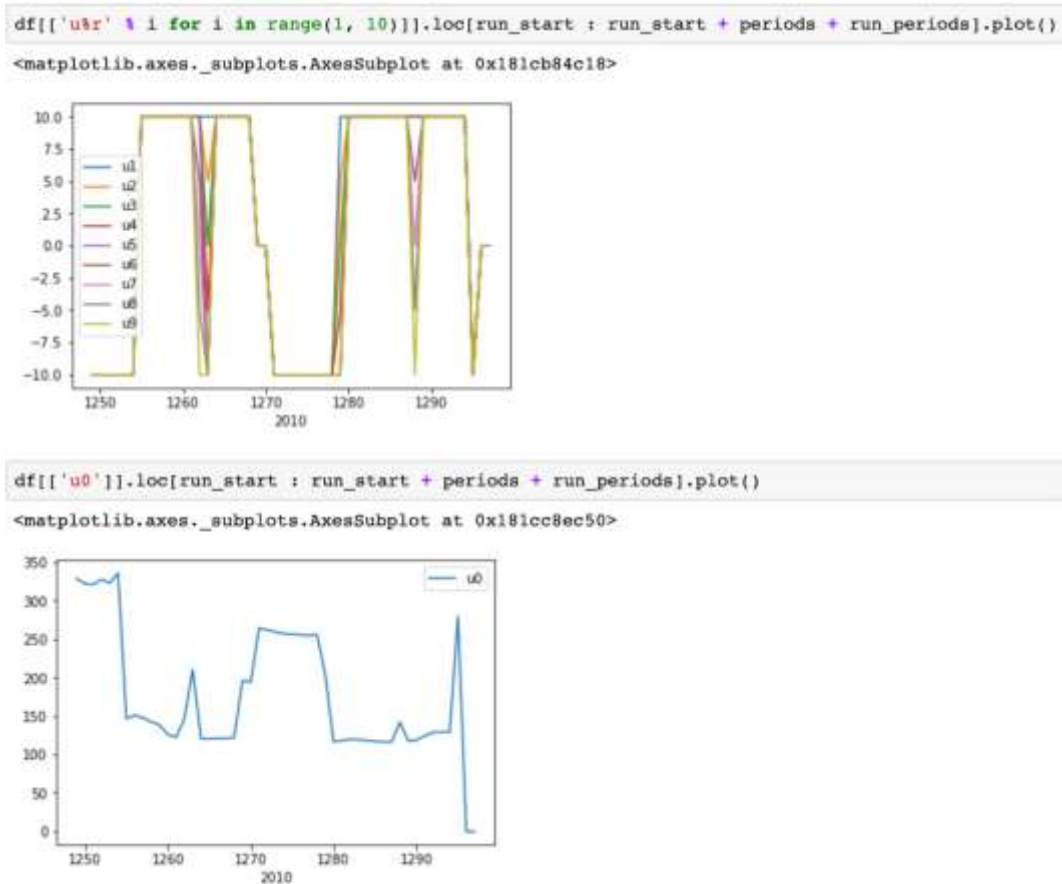


**Figur 10. Normaliserade residualer för upprepad MPC. De individuella körningarna avslutas så snart de normaliserade residualen understiger 1.**

Notera det större antalet iterationer som krävs för att lösa det inledande optimeringsproblemet. Fenomenet kommer sig av att den första körningen nödvändigtvis genomförs mot mer eller mindre orealistiska utgångsvärden medan de därpå följande körningarna kan utgå från tidigare beräknade värden.

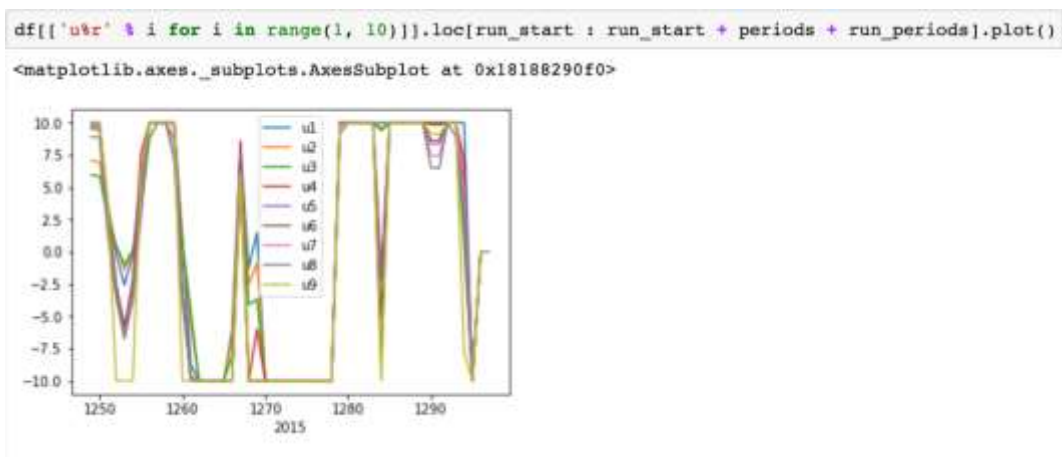
De upprepade körningarna resulterar i sin tur i en fördelning av tillgänglig termisk flexibilitet som i sin tur resulterar i en motsvarande styrsignal. För de agenter som representerar byggnader så har styrsignalen här valts som en anpassning av den utomhustemperatur i grader C som i sin tur reglerar en motsvarande framledningstemperatur. Ansatsen tillämpas av NODA. Notera att medan det inte framgår från denna översiktliga presentation så är det ovidkommande för det aktuella scenariot huruvida byggnader försörjs av en gemensam värmepump eller utav individuella värmepumpar; optimeringsproblemen är matematiskt sett desamma.

De resulterande styrsignalerna återfinns nedan. Den andra grafen visar elförbrukningen för den gemensamma värmepumpen i kWh. Som redan nämnt är det här frågan om större byggnader. För en enfamiljsvilla så räcker det ofta med en värmepump med en värmeeffekt från kompressorn på 10–12 kW.



**Figur 11. Genom upprepad MPC beräknade styrsignaler. Den övre grafen visar temperaturanpassningar för de nio byggnaderna medan den nedre grafen visar elförbrukning i kWh för den gemensamma värmepumpen.**

Avslutningsvis är det värt att kontrastera resultatet ovan med motsvarande men avsevärt mildare tidsperiod för 2015 där de lägre elpriserna resulterar i större spridning bland styrsignalerna.



**Figur 12. De lägre och jämnare elpriserna för 2015 resulterar i större spridning bland styrsignalerna.**

## 10 Fallstudier av förbrukarflexibilitet och värmepumpar (AP3)

Två examensarbeten har utförts inom projektet på 30 högskolepoäng vardera, båda vid Uppsala Universitet. I det första har potentialen, i form av frigjord eleffekt, för förbrukningsflexibilitet från värmepumpar i flerfamiljshus undersökts genom ett examensarbete av Sabina Oehme (Oehme, 2018). Baserat på resultaten från det första examensarbetet har marknadspotentialen för förbrukningsflexibilitet från värmepumpar i flerfamiljshus utvärderats i ett andra arbete utfört av Rebecca Grill (Grill, 2018). Handledare för de båda examensarbetena kopplad till projektgruppen har varit Anders Lindgren och Mats Hagberg på Vattenfall. I Sabina Oehmes arbete har dessutom Claes Sandels från RISE varit behjälplig i modellutvecklingen.

Nedan följer en kortare sammanfattning av de två examensarbetena. Examensarbetenas återfinns i sin helhet i bilaga 2 och 3.

### 10.1 Demand flexibility potential from heat pumps in multi-family residential buildings

Syftet med examensarbetet av Oehme (Oehme, 2018) har varit att utvärdera potentialen för förbrukningsflexibilitet som uppkommer av att stänga av ett stort antal värmepumpar i flerbostadshus samtidigt.

Med flexibilitet i energisystemet syftar man på förmågan att anpassa produktion eller konsumtion av el från elnätet. Flexibilitetsanpassningar som sker på konsumentensida av elsystemet kallas förbrukningsflexibilitet eller demand response. Värmepumpar i bostäder har identifierats som en möjlig förbrukningsflexibel last då det är möjligt att stänga av eller på värmepumpar under en viss tid utan att inomhustemperaturen förändras märkbart tack vare byggnadernas tröghet. Bostads- och servicesektor står idag för cirka 40% av Sveriges energibehov och 51% av den energin används till uppvärmning. Detta innebär att det finns en stor potentiell förbrukningsflexibilitet i att stänga av ett antal värmepumpar under tidsperioder när elnäten är under hög belastning.

För att utvärdera potentialen för förbrukningsflexibilitet genom att stänga av ett stort antal värmepumpar i flerbostadshus samtidigt har en modell i programmeringsspråket Matlab utvecklats och använts för att beräkna förbrukningsflexibiliteten. Simuleringar för att generera lastprofiler för ett aggregerat nummer av värmepumpar i ett nätområde med 174 flerbostadshus med värmepumpar och ett elområde (14 län ingår i elområdet) med 10 146 flerbostadshus med värmepumpar har genomförts. Arbetet har utförts i samarbete med Vattenfall AB.

Värmepumpens förbrukningsflexibilitet har betraktats som en lastförändring mellan hur värmepumpar drivs i vanliga fall och när de har mottagit en off-signal och stängts av vid en viss tidpunkt i simuleringen. Analysen av förbrukningsflexibiliteten från värmepumpar är en komplex process där sju olika parametrar tas i beaktning. Analysen har utförts med varierande utomhustemperatur, från  $-20^{\circ}\text{C}$  till  $+15^{\circ}\text{C}$ . Simuleringarna visar att den termiska trögheten i byggnaderna gör möjligt flytta lasten i tiden mellan 4 och 10 timmar



beroende på utomhustemperaturen. Resultaten visar att ett nätområde, med 174 flerbostadshus med värmepumpar, kan frigöra 10 MW under en timme på det här sättet. Ett elområde, som inkluderar 10 146 flerbostadshus med värmepumpar, kan frigöra 169 MW under en timme. Simuleringarna visar även att det finns en risk för att det kan skapas större effekttoppar när värmepumparna startar igen efter att de har mottagit en off-signal och varit avstängda. Det är därmed viktigt att ha detta i åtanke vid användandet av värmepumpar som en förbrukningsflexibel last. Vidare studier skulle kunna undersöka möjligheten att minimera effekttopparna som orsakats av en synkronisering av värmepumparna vid en off-signal.

## **10.2 Market potential for using demand response from heat pumps in multi-family buildings**

Examensarbetet av Grill (Grill, 2018) har utvärderat nyttan för nätbolag och balansansvariga att använda förbrukningsflexibilitet från värmepumpar i flerbostadshus samt undersökt hur det påverkar slutkonsumenterna. Examensarbetet har utförts i samarbete med Vattenfall AB där nyttan för ett specifikt nätbolag och elprisområde har analyserats genom både intervjuer, analys av data samt kvantitativa simuleringar.

Resultaten visar att den främsta nyttan för nätbolagen är möjligheten att sänka potentiella straffavgifter, minska sitt effektabonnemang till överliggande nät samt att få plats till att ansluta fler konsumenter till nätet utan att behöva bygga ut elnätet i lika stor grad.

I examensarbetet utvärderades potentialen i ett lokalt nät som innehöll 174 flerfamiljshus med installerad värmepump, tillsammans kunde dessa minska sitt högsta effektbehov med 2,9 MW. Nätbolaget kunde därigenom i genomsnitt spara 483 000 SEK per år genom att använda förbrukningsflexibiliteten till att minska straffavgifterna och effektabonnemang, vilket motsvarar 2800 SEK per flerbostadshus och år. Styrningen av värmepumparna gör att effekttopparna minskar för konsumenterna, medan deras energikonsumtion både kan minska och öka beroende på utomhustemperaturen när förbrukningsflexibiliteten utförs. Det rekommenderas därför att konsumenterna har ett elprisavtal där de betalar för effekt istället för energi och har ett rörligt timpris för att de ska få en minskad elkostnad av att bidra med sin förbrukningsflexibilitet.

Det finns flera marknader där de balansansvariga kan använda förbrukningsflexibilitet till att stabilisera energibalansen i elnäten. De marknaderna som identifierades som optimala för den här resursen var mFRR-marknaden och effektreservmarknaden. Genom att bidra till systemets energibalans får den balansansvariga ekonomisk ersättning av Svenska Kraftnät. Den här resursen resulterade i en genomsnittlig intäkt eller kostnadsreduktion på 2,7 milj. SEK under en säsong i ett elprisområde på mFRR-marknaden, där en säsong representerar perioden 16 november till 15 mars. Den potentiella intäkten från effektreservmarknaden identifierades till 1,1 milj. SEK i administrativ ersättning under samma säsong. Studien visar även att behovet av att minska konsumtionen inte behöver sammanfalla för nätbolaget och den som är balansansvarig i regionen. Om nätbolaget bestämmer sig för att minska konsumtionen när det är hög

belastning i elnätet kan det i vissa fall resultera i ökade kostnader för den balansansvariga.

För att använda förbrukningsflexibilitet från värmepumpar är det viktigt att utvärdera de olika aktörernas roll och ansvarsområden. Samma resurs kan inte användas för olika syften samtidigt och det är därför viktigt att det finns en tydlig kommunikation mellan nätbolag och ansvarsområden. En vidareutveckling av studien är även att utvärdera potentiella praktiska implementeringsmöjligheter och kostnader för att analysera om det är praktiskt möjligt och lönsamt.

## 11 Hinder och drivkrafter för efterfrågeflexibilitet (AP4)

Målet med AP4 har varit att öka kunskapen om de olika aktörernas förutsättningar att implementera olika flexibilitetslösningar, vilket vi har gjort genom två huvudaktiviteter: en mindre *litteratursammanställning* för att ge en överblick över tidigare identifierade hinder och drivkrafter (se kapitel 6.1-6.5), samt en *intervjustudie med fastighetsägare respektive balansansvariga* för att undersöka hinder och drivkrafter för laststyrning av flerbostadshus med värmepump. Då vi i projektet har tagit utgångspunkten i kraftbolagens, fastighetsägares och värmepumptillverkares perspektiv, så omfattas inte privatkunder (t.ex. hyresgäster hos deltagande fastighetsbolag) i aktiviteterna i arbetspaketet.

### 11.1 Hinder identifierade i kvalitativa studier

Det finns få studier om efterfrågeflexibilitet baserat på kvalitativa data från intressenter. Ett undantag är Sweco som på uppdrag av Energimarknadsinspektion genomförde en studie 2016 som syftade till att kartlägga potentialen för efterfrågeflexibilitet i Sverige. Studien innefattade enkäter och enstaka djupintervjuer med representanter från elintensiv industri, övrig industri, fastigheter, och serviceverksamhet (Sweco, 2016). Två stora teman var hur väl aktörerna känner till begreppet och vilken möjlighet de anser sig ha att satsa på efterfrågeflexibilitet. Rapportens slutsatser är att få känner till begreppet och att få aktörer förutom stora industrier anser sig ha möjlighet att satsa. Detta bidrar till att efterfrågeflexibilitet ses som en alltför osäker investering med tanke på de besparingar man kan göra. Ett stort upplevt hinder var också att det skulle störa verksamheten, t.ex. boendekomforten eller produktionsprocessen. Även automatiserade stödsystem sågs som osäkra, då man helt enkelt inte kan känna sig säker på om nyttan överstiger kostnaderna. Enligt rapporten så är det ekonomiska värdet av att flytta sin elanvändning från hög- till låglasttimmar låg i Sverige på grund av den stora andelen vattenkraft i landet. Sweco rekommenderar dock att titta närmare på aggregatorer för mindre elförbrukare, samt nättariffer och avtal som gör det enklare att utnyttja flexibilitet. Baserat på studien, listar Sweco följande hinder mot en ökad utveckling av efterfrågeflexibilitet:

- ”Efterfrågeflexibilitet är svårt att förena med verksamheten”: t.ex. produktionen anses vara känslig för störningar
- ”För låga ersättningar”
- ”Osäkerhet om framtiden”

- ”Komplexitet I”: Efterfrågefleksibilitet anses vara komplext och kräver både automatiserade system samt ny kompetens
- ”Komplexitet II”: Även för de större aktörer som skulle kunna utnyttja efterfrågefleksibilitet idag, är deltagande på marknaden komplext och svårnavigerat
- ”Motstridiga incitament”: t.ex. nättariffer som inte uppmuntrar till efterfrågefleksibilitet

Ett exempel på hur efterfrågefleksibilitet kan upplevas som ett hypotetiskt hinder för verksamheten är osäkerhet kring komfort i bostäder. Att ge en detaljerad bild av *termisk komfort* går utanför sammanställningen av litteratur, då det finns mycket forskning på teknisk komfort inom såväl tekniska som samhällsvetenskapliga och design-orienterade områden. Renström (2016) ger dock en översikt som visar på hur man har gått från att förstå termisk komfort utifrån en rad miljö-, byggnads- och personrelaterade parametrar där man kan beräkna en komfortpunkt eller ett temperaturspann inom vilken majoriteten skulle uppleva termisk komfort (e.g., Fanger, 1970), till en mer adaptiv syn på termisk komfort (se t.ex. de Dear et al, 2013 som ger en historisk översikt). Enligt den adaptiva synen är komfort inte en produkt som levereras av ett uppvärmningssystem, utan ett subjektivt mål som människor har och tillgodoser med diverse medel, givet att de kan påverka sin situation, vilket en byggnad då ska kunna tillåta (e.g., Shove et al, 2008). Andra medel som människor använder för att påverka sin inomhuskomfort är filter, kläder, varma drycker, till att öppna fönster för att ventileras, etc. (Clear et al, 2014). Sammanfattningsvis kan sägas att man bör undersöka på vilka sätt en efterfrågelösning fortfarande kan tillåta de boende att möta sina behov av termisk komfort, så att inte eventuella energieffektiviseringar går förlorade av att de boende försöker uppnå komfort på alternativa, mindre bra sätt.

Vad gäller allmänna barriärer som hindrar slutanvändares aktiva deltagande i lösningar för smarta elnät (inte specifikt efterfrågefleksibilitet), kan vi återkomma till Boork et al's (2014) studie som lyfter fram hinder som låga ekonomiska vinster på att investera i smarta energilösningar eller lägga om sitt energi-relaterade beteende; tekniska problem i installation/användning som drastiskt kan minska motivation och engagemang; orealistiska förväntningar; samt att involvera användare utan att ge dem möjlighet att påverka sin situation.

## 11.2 Intervjustudie

I intervjustudien fokuserade vi specifikt på två huvudaktörer – *fastighetsägare* och *balansansvariga* – som båda skulle beröras av och vilja se nytta av en framtida efterfrågefleksibilitetslösning med hjälp av värmepumpar. Totalt intervjuades 12 personer i studien varav 6 representerade fastighetsägare (se Tabell 2) och 6 representerade balansansvariga (se Tabell 3). Intervjuerna var kvalitativa (Kvale och Brinkmann, 2009) och semi-strukturerade, vilket innebär att vi tog stöd av en intervjuguide med teman men för det mesta lät deltagarna styra samtalet om deras tankar, åsikter och erfarenheter kring efterfrågefleksibilitet och relaterade frågor som t.ex. resurser, investeringar, beslutsfattande, och aktivt vs. passivt förhållande till

energifrågor. Insikterna från en sådan studie ska ses som ”nedslag” i deltagarnas verksamheter och tankar, snarare än resultat som går att generalisera till andra. Istället kan man se resultatet som ett sätt att belysa nya frågor och områden som är viktiga att förstå. Intervjuerna genomfördes på telefon då deltagarna var geografiskt utspridda i Sverige, inklusive ett grannland<sup>12</sup>. De varade mellan 35–120 minuter och spelades in för att underlätta efterföljande analys. Utöver intervjufrågorna så använde vi oss av ett s.k. ”backcasting” scenario, vilket beskrivs nedan.

### 11.2.1 Backcasting scenario

Enligt litteraturen kan det vara svårt för aktörer att reflektera kring efterfrågefleksibilitet beroende på hur mycket kunskap de har sedan tidigare. Att begreppet är relativt nytt och att tekniken/tjänster inte finns på plats idag kan också göra det svårt att svara på frågor. Vi valde därför att använda ett ”backcasting” scenario (Holmberg och Robert, 2000) som ett verktyg för att underlätta för intervjudeltagarna att reflektera över hinder och drivkrafter. Enligt Wikipedia innebär backcasting *”att fastställa en beskrivning av en väldigt bestämd och specifik framtida situation. Genom att imaginärt arbeta sig bakåt i tiden, steg för steg, från framtiden till samtiden, försöker man finna den mekanism genom vilken den specifika framtida situationen kan nås från samtiden”*<sup>13</sup>. Tanken med att använda ett backcasting scenario som del av varje intervju var att ge intervjupersonen något som förhoppningsvis är lättare att förhålla sin egen situation till. I det här fallet handlade det om att reflektera över vad som skulle behövas från dagens utgångspunkt för att uppnå ett scenario i framtiden. Eftersom litteratursammanställningen redan pekade på ett antal kända hinder och drivkrafter, ville vi om möjligt genom scenariot uppmuntra deltagarna till att reflektera utöver eller bortom dessa.

Vi utvecklade två backcasting scenarios (se nedan), ett för fastighetsägarna och ett för balansansvariga, som beskrev en framtid där efterfrågefleksibilitet med hjälp av värmepumpar redan utnyttjas och innebär nytta för respektive aktörer. Båda scenarios beskrev en liknande framtid, men utifrån respektive aktörers perspektiv. Vi skickade respektive text per mejl några dagar innan varje inbokad intervju, så att intervjudeltagaren hade fått chansen att läsa igenom scenariot innan intervjun. Majoriteten av deltagarna hade tittat på scenariot innan intervjun.

#### Backcasting scenario för fastighetsägare:

*”Det är november 2025 och hösten är definitivt här med kallare väder. I morse när jag åkte till jobbet var det riktigt kyligt ute! De senaste dygnen har det blåst mycket och numera brukar det innebära att uppvärmningen i huset styrs om några timmar då det finns billig el genom vindkraft. I ett år har vi ingått i ett avtal tillsammans med många andra fastigheter i området där värmepumparna i fastigheterna är uppkopplade och fjärrstyrs av ett företag som på så sätt erbjuder en billigare uppvärmning. När jag går in och kollar på datorn ser jag att värmepumpen har körts under natten och att den nu är avstängd under morgonen för att spara el och istället använda lagrad värme. Det står att den är planerad att starta igång om 45 minuter. Det är oftast på mornarna och kvällarna som värmepumpen i fastigheten är avstängd en timma eller två för att minska belastningen på elnätet. Men eftersom värmen numera lagras bra i det här huset så märker varken hyresgästerna eller vi som jobbar här någon skillnad i inomhustemperatur. Vi behöver inte heller agera på något*

<sup>12</sup> Deltagarna och deras information är anonymiserad

<sup>13</sup> <https://sv.wikipedia.org/wiki/Tankeexperiment>

sätt utan allt sköts automatiskt via fjärrstyrningen, vilket är ett smidigt sätt att utnyttja efterfrågefleksibilitet utan att vi själva behöver lägga tid på det. Det enda som märks är att uppvärmningen har blivit lite billigare.”

#### Backcasting scenario för balansansvariga:

”Det är december 2025 och vintern är definitivt här med kallare väder. I morse när jag åkte till jobbet var det riktigt blåsigt och kyligt ute! De senaste dygnet har det blåst en hel del och det är bra, för då finns det mycket el från vindkraftverken. Tidigare blev det ofta mer obalans i systemet när vi plötsligt fick mycket tillfällig energi och då kunde det vara intensivt att styra upp snabbt under en period. Både vår balanskostnad och marknadens balanspriser var då högre än nu. Numera finns många fler aktörer och slutkunder som bidrar med efterfrågefleksibilitet som vi ser till att marknaden får ta del av. Bland annat har vi avtal med företag som aggregerar efterfrågefleksibilitet hos slutkunder som vi är balansansvariga för. Företagen erbjuder nya tjänster till flerbostadshus med värmepumpar i området, som innebär att de får billigare uppvärmning mot att de låter sin fastighet fjärrstyras då det behövs flexibilitet för att skapa bättre balans i elsystemet. Flera hundra fastigheter i området har nu gått samman till pooler som fjärrstyras. Efterfrågefleksibilitet har blivit en faktor till att ta med i beräkning på marknaden och vårt jobb som balansansvariga har blivit lättare och mer effektivt eftersom efterfrågefleksibiliteten ger oss och marknaden mer spelrum att styra upp tillfälliga obalanser i systemet.”

#### **11.2.2 Rekrytering och deltagare**

För att fånga upp olika tankar, begränsningar och nulägen hos fastighetsägare och balansansvariga, så rekryterade vi deltagare ur olika kategorier där vi utgick från SCB respektive Edielportalens definitioner. Baserat på SCB's kategorier av ägare till flerbostadshus (privata fastighetsägare, svenska aktiebolag, allmännyttiga bostadsföretag, bostadsrättsföreningar) så valde vi att inkludera representanter från alla kategorier utom privata fastighetsägare (dvs mindre fastighetsägare) som vi antog har mer begränsade resurser och därmed sämre möjligheter att delta i efterfrågefleksibilitetslösningar i en upptrappningsfas (se Tabell 2). Vi hade också som mål att få med åtminstone någon fastighetsägare som redan idag har värmepump installerad i ett flerbostadshus. Utifrån Edielportalens översikt över balansansvariga i Sverige/Norden, så beslöt vi oss för att inkludera representanter från ”eljättar”, elleverantörer + balansansvariga, samt handel (se Tabell 3). Vi valde att hoppa över kategorin industrier, då deras roll som balansansvariga inte var målet för vår studie.

**Tabell 2. Deltagare, fastighetsägare**

Nr	Deltagarens roll	Ägandeform	Antal flerbostadshus/lägenheter	Geografiskt område	Uppvärmning
1	”Energi-kontroller”	Privat fastighetsbolag	2400 lägenheter (främst flerbostadshus) + nyproduktion	Större stad och mindre närliggande orter	Fjärrvärme (stad) och värmepump (i fåtal hus i mindre samhällen utanför fjärrvärmenätet)
2	Energi- och miljöchef	Privat fastighetsbolag	14 000 lägenheter (främst flerbostadshus) + nyproduktion	Större stad	Merparten fjärrvärme
3	Ordförande i BRF, boende	BRF	70 radhuslägenheter	Mindre ort	Bergvärme + solhybrid (el + värme)
4	Ordförande i BRF, boende	BRF	24 lägenheter	Större stad	Bergvärme + elpatron som uppbackning
5	Teknisk chef	Kommunalt fastighetsbolag	9000 lägenheter (1000 radhuslägenheter, 8000 i flerbostadshus) + nyproduktion 850 lägenheter	Mindre stad och närliggande samhällen	Stad: fjärrvärme Samhällen: gas + fjärrvärme, gas + el, lokal fjärrvärme, värmepump, gas
6	Energi/VVS-ingenjör	Kommunalt fastighetsbolag	430 lägenheter (typ radhus) + 60 nya lägenheter i flerbostadshus	Ö-kommun	Radhus: elpannor Flerbostadshus: Bergvärme

**Tabell 3. Deltagare, balansansvariga**

Nr	Deltagarens roll	Kategori balansansvarig	Verksamhet	Område
1	FoU chef	Stort energibolag	el, värme, kyla, återvinning och avfallshantering, energitjänster	Sverige + globalt
2	Affärsutvecklare	Stort energibolag	Elnät, Elhandel, Fjärrvärme, Gas, vind, Energitjänster	Sverige + globalt
3	Chef, fysisk handel	Handel/energitjänster	Balansansvar åt t.ex. producenter, industrier	Sverige + Norden
4	Försäljningschef	Handel/energitjänster	Elleverantör + portföljförvaltning o energitjänster	Norden
5	Portföljförvaltare	Lokalt energibolag	Elnät, Elhandel, Fjärrvärme, Gas, Kyla, Energitjänster	Sverige
6	VD	Lokalt energibolag	Inköp och försäljning av lokalt producerad el	Sverige

### 11.2.3 Analys

Varje intervju summerades i en skriftlig sammanfattning och vissa citat transkriberades. När alla intervjuerna var genomförda analyserades materialet ”bottom-up” genom ett s.k. ”affinity diagram”, där vi först skrev upp alla insikter av relevans för studien på post-it lappar och sedan grupperade dessa i teman. Till exempel pratade både fastighetsägare och balansansvariga om vikten av *kontroll* för att kunna genomföra sin verksamhet på ett tillfredsställande sätt, vilket identifieras som ett tema med relevans för båda aktörer med potentiella konsekvenser för relationen mellan dem.

## 11.3 Resultat

Nedan presenteras resultatet från intervjuerna, där vi först belyser fastighetsägarnas perspektiv och sen balansansvariga aktörers perspektiv. Till sist diskuterar vi vad de två perspektiven har gemensamt och hur de skiljer sig åt, samt vad detta innebär för hinder och drivkrafter för efterflexibilitet med hjälp av koalitioner av värmepumpar i flerbostadshus.

### 11.3.1 Fastighetsägare om efterfrågefleksibilitet

De representanter för fastighetsägarna som vi intervjuade beskrev en verksamhet där man jobbar aktivt och ambitiöst med energifrågor och har lång erfarenhet inom området. Undantaget var bostadsrättsföreningarna 3 och 4, där eventuellt energiarbete hänger på personligt engagemang hos de boende och i styrelsen. I BRF 4 har man varken kunskap, intresse eller tid att sätta sig in i energifrågor medan i BRF 3 bedrivs ett ambitiöst energiarbete av en eldsjäl med personligt intresse för energi och hållbarhet. Hos de deltagande fastighetsbolagen finns anställda som jobbar enbart med energi alternativt tillsammans med närliggande områden som

t.ex. avfall. Deltagarna verkar överlag positiva till framtida lösningar som kan bidra till minskad energiförbrukning och sänkta boendekostnader, inklusive efterfrågefleksibilitet. Energi och hållbarhet framhölls som viktiga frågor med hög relevans för både fastighetsbolaget och samhället i stort. Däremot är verksamheten på många sätt komplex, vilket komplicerar satsningar på nya lösningar som t.ex. efterfrågefleksibilitet. Nedan beskriver vi de faktorer, eller hinder, som framkom i den här studien som kan påverka satsningar på efterfrågefleksibilitet.

*Många faktorer styr valet av uppvärmning:* I studien ville vi få en djupare förståelse för vad som styr valet av uppvärmning i flerbostadshus och hur utvecklingen ser ut för värmepumpar bland de deltagande fastighetsägarna. Här pekade alla intervjuerna på att *varje fastighet är unik* och att det är många externa och interna faktorer som påverkar val av uppvärmning för varje fastighet. Det är olika förutsättningar i befintliga fastigheter kontra nya, bl.a. eftersom befintliga fastigheter påverkas av historiska beslut (t.ex. anslutning till fjärrvärmenät) medan man i nybyggnation kan *"kasta upp tärningen"* och se till alla tillgängliga lösningar. I de områden där fjärrvärmefaktorerna är låga anses *"fjärrvärme [vara] enkelt, pålitligt och billigt"*, vilket ger få incitament att byta till annan uppvärmning. I nybyggnation kan t.ex. geografiskt läge och andra stadsplaneringsprojekt påverka val av uppvärmning, t.ex. svårt att borra för bergvärme pga tunnelbygge. Även värderingar och åsikter inom bolaget påverkar, t.ex. att *"el inte ska användas till uppvärmning"*. Eftersom deltagarantalet är begränsat går det inte att peka på någon trend, men viktigt att lyfta fram är just flertalet påverkande faktorer som fastighetsägare inte alltid kan styra över, samt de unika behoven för varje fastighet.

*Helheten är viktig när man väljer lösningar:* Oavsett lösning så framhöll deltagarna att ekonomi och hållbarhet är viktigt, där en lösning måste hålla länge. Deras tidsperspektiv för investeringar vid t.ex. en renovering är 30-50 år, vilket innebär att det är viktigt att kunna veta i *förväg* vilka besparingar något kan ge för att veta hur de ska satsa. Detta gör att efterfrågefleksibilitet upplevs som för osäkert, om man inte kan räkna någorlunda säkert på besparingar. Några av deltagarna påpekade att de jobbar inom en *"lågriskbransch"* där deras jobb är att förvalta långsiktigt med hyresgästerna i fokus, snarare än att hoppa på nya obeprövade lösningar. Helheten är väldigt viktig för deltagarna, där de tryckte på att en bra lösning inte bara ger *ekonomiska besparingar* utan även *sparar miljö, ger nöjdare hyresgäster, håller länge, samt är praktisk och driftsäker*. Några av deltagarna lyfte fram effektuttaget/effektabonnemanget och hur man kan sänka det som mest intressant för dem. Även om miljönyttan är viktig för de här deltagarna, så var det tydligt att det inte är lätt att veta vad som är bäst för miljön. Detta kan göra att man väljer att vänta och se hur en ny lösning, t.ex. efterfrågefleksibilitet, utvecklas och hur den står sig ekonomiskt och miljömässigt mot andra alternativ.

*Hyresgästernas deltagande en stor utmaning:* De fastighetsägare vi intervjuade berättade att den största utmaningen för dem i deras energieffektiviseringsarbete är att få med sig hyresgästerna. De har svårt att ensamma ta beslut kring nya investeringar om det påverkar hyran negativt. Inte sällan finns ett stort engagemang i energifrågan hos experterna på fastighetsbolaget, men att detta inte nödvändigtvis



speglas hos hyresgästerna. Hyresgästerna beskrivs som en mycket heterogen grupp med olika behov och möjligheter att ta till sig information, vilket gör det utmanande att nå ut vid t.ex. införande av energiförbättrande åtgärder. Våra deltagare påpekade att det är svårt att motivera energiförbättrande åtgärder om de påverkar hyran negativt och att flera har en pågående ”frostig” dialog med Hyresgästföreningen som sällan kommer längre än att till att diskutera hyror. Detta kan försvåra för satsningar på t.ex. styrutrustning som möjliggör efterfrågefleksibilitet om det inte tydligt går att peka på sänkta boendekostnader som resultat.

Oberoende och kontroll viktigt: Scenariot som projektet utforskar innebär att uppvärmningen i ett flerbostadshus skulle styras automatiskt utifrån uppsatta kriterier, t.ex. av ett tredjepartsföretag. De två BRF:er som ingick i studien ansåg inte att (fjärr-)styrning är problematiskt och förtydligade att de redan i dag är beroende av att andra företag levererar tjänster t.ex. till dem som de själva inte har kunskap eller resurser att sköta. BRF 4 betalar redan t.ex. ett tredjepartsföretag för energitjänster som optimering och monitorering av uppvärmningssystemet. Enligt deltagaren från BRF 4, som är både boende och ordförande i föreningen, så är det tryggt att veta att det är ”många ögon” som håller koll på fastigheten ifall något skulle behöva åtgärdas. De fyra andra fastighetsägarna visade däremot större skepticism mot att låta en tredje part styra uppvärmningen. De lyfte flera frågor kring kontroll och oberoende. En viktig aspekt är t.ex. att ”inte bygga in oss” eller hamna i ”tekniska monopol”, där fastighetsägarna anser att det är viktigt att kunna behålla oberoendet vad gäller hård- och mjukvara (t.ex. märke på värmepump) för att en efterfrågefleksibilitetslösning ska vara ett möjligt alternativ på lång sikt. En relaterad fråga handlade om driftsäkerhet, där man är orolig för att ”tekniktäthet” i och med nya system både kräver mer tid till utbildning av personal, samt riskerar göra verksamheten mer sårbar. Det de reagerade mest kritiskt till var dock att delvis eller helt lämna över kontrollen över uppvärmningen eftersom detta skulle innebära att de inte har fullt ansvar gentemot sina hyresgäster. Hyresgästernas komfort är en central fråga för flera och de är osäkra på vad det skulle innebära för t.ex. klagomål och uppföljning på klagomål om de lämnar över uppvärmningen till någon annan som inte har det slutliga ansvaret.

Flexibilitet i dag och i framtiden: Några fastighetsägare anser sig redan jobba med former av efterfrågefleksibilitet i dag. Ett sätt som nämndes är att ha koll på vädret genom prognoser och data från fastigheterna och utifrån detta försöka planera förbrukningen smart så att övergångarna blir jämnare och mer proaktiva. Fastighetsägarna ansåg att det är bättre för tekniken, systemen och uppvärmningen att styra temperaturen långsamt, än att göra snabba ändringar. Vi frågade också om de kunde uppskatta hur mycket flexibilitet deras fastigheter skulle kunna bidra med i framtiden. De uppskattade att en viss flexibilitet med uppvärmningen är möjlig (2–4 h/dygn) men att detta främst handlar om timmar utanför topparna. Däremot förklarade en fastighetsägare att i och med ändrade vanor och samhällsnormer (t.ex. flexibla arbetstider, eller jobba hemifrån) så ser de att fler hyresgäster är hemma dygnet runt, vilket kräver en jämnare tillgång på varmvatten och värme än tidigare. För alla deltagare skulle efterfrågefleksibilitet enligt projektets definition kräva investeringar i form av t.ex. styrutrustning och ev. lagring, även för dem som har

värmepumpar i dag. Slutligen så menade de tillfrågade att efterfrågefleksibilitet inte bara borde handla om uppvärmning i ett flerbostadshus, utan också inkludera t.ex. hyresgästernas laddning av elbilar, dvs ta ett helhetsgrepp på fastighetsel, istället för att bara inkludera viss förbrukning.

### 11.3.2 Balansansvariga om efterfrågefleksibilitet

De representanter för balansansvariga som vi intervjuade hade olika roller på sina respektive företag – från övergripande ansvar över forskning- och utveckling inom bl.a. efterfrågefleksibilitet, till daglig fysisk handel inkl. balansansvar – men delande ändå åsikter om efterfrågefleksibilitet. Deltagarna ansåg att det finns en stor potential samhällsnytta med efterfrågefleksibilitetslösningar då de kan spela en viktig roll i en omställning mot ett mer hållbart energisystem och innebära att vi kan ta till vara på mer lokalproducerad och förnybar energi.

Efterfrågefleksibilitet idag och i framtiden: I den här gruppen deltagare så håller några på med att bygga upp flexibilitetsplattformar för diverse framtida tjänster, medan några ”bevakar frågan och vad den kan innebära” mer passivt. Endast deltagare 4 jobbar kommersiellt med efterfrågefleksibilitet mot en industrikund, vilket sker i ett grannland och ej i Sverige. Sammanfattningsvis så finns den tekniska infrastrukturen mer eller mindre på plats hos de deltagarna företagen, men inte kunderna. Deltagarna ser inte att det finns incitament för elkonsumenter att delta i efterfrågefleksibilitetslösningar i Sverige i dag. Istället tror de att efterfrågefleksibilitet måste bakas in i smarta helhetslösningar som erbjuder något mer, t.ex. smart laddning av elbilar. Deltagarna pratade dessutom om andra typer av avtal som de tror kommer komma i framtiden, t.ex. bilaterala avtal mellan två parter (t.ex. industri och vindkraftpark) som skulle gå utanför marknaden och skötas mer automatiskt, och ändrade förutsättningar i och med lagring som skulle minska användningen av elnätet och därmed minska behovet av balansansvar.

Fastighetsägare vs. andra aktörer med flexibilitet: Deltagarna uttryckte en osäkerhet kring nyttan av aggregerad flexibilitet från koalitioner av flerbostadshus, då de tänker sig det skulle bli en begränsad påverkan. Som vi rapporterar längre ner, så kunde deltagarna inte säga i dag vilken flexibilitet som kommer att behövas framöver – bl.a. på grund av komplexiteten kring långsiktiga väderprognoser – vilket gör att man inte vet om det räcker att flytta t.ex. uppvärmning från en timme till en annan. En deltagare uttryckte detta som ”den som har mest flexibilitet vinner!” Industrier ansågs ha större potential. En deltagare rapporterade att företaget letar efter outnyttjad flexibilitet där risken att störa verksamheten är mindre och där det tydligt går att dela på nyttorna. Som exempel nämndes t.ex. frysar i livsmedelsbutiker och truckar på industrier.

Förändrade villkor på marknaden behövs: Som nämnts ovan så anser deltagarna att de ekonomiska incitamenten saknas i Sverige i dag för elkonsumenter att delta i efterfrågefleksibilitetslösningar. Detta pekar på behovet att ta fram nya affärsmodeller och tjänster som är mer attraktiva. En lösning kan vara att kombinera efterfrågefleksibilitet med något mer (t.ex. elbilsladdning), men det skulle också kunna innebära andra prissättningar. Deltagare 4, som verkar i ett grannland,

föreslog t.ex. att kunder kan få ersättning för att ställa sin efterfrågefleksibilitet till förfogande, inte bara när den används, vilket ger en mer pålitlig ersättning. Till sist lyftes också ändrad miniminivå på budvolym som en faktor som skulle öppna upp för fler aktörer att delta.

Förstår man vädret förstår man behovet: En reell utmaning som de balansansvariga pekade på som påverkar efterfrågefleksibilitetslösningar är det faktum att det är svårt att i förväg veta hur mycket flexibilitet som kommer att behövas, när och hur länge. Vädersystemet är väldigt komplext vilket gör det svårt att säga vilken typ av flexibilitet som behövs i framtiden, vilket försvåras ytterligare i och med klimatförändringarna. De balansansvariga kunde inte svara på vilken typ av flexibilitet (t.ex. millisekunder, sekunder, minuter, timmar, dygn, säsonger) som skulle göra nytta för dem i deras arbete och menade att om man kan "förstå vädret" så kan man förstå behovet av flexibilitet. En utmaning som nämndes var vindprognoser, där olika leverantörer i dag levererar prognoser av varierande kvalitet.

Pålitliga realtidsdata är viktigt: Relaterat till behovet av att förstå vädret, är behovet av pålitliga realtidsdata för att kunna balansera systemet så bra som möjligt. Här är det data från flera olika aktörer som bidrar till osäkerhet. Utöver vindprognoser så pekade deltagarna på behovet av realtidsinformation om tillgänglighet på t.ex. vindkraftverk i en vindkraftpark. En annan faktor är att få nätbolagen att skicka korrekt data i rätt tid (t.ex., mätare som är fel), där balansaktörerna har "bra modeller som lär sig snabbt" men där problemet är inkorrekt data. Några balansansvariga berättade att de går över mer och mer till automatiserade system (med hjälp av realtidsdata) för att slippa 24/7 bemanning på balansansvaret, men att detta sätter krav både på datakvalitet och på regler för automatisk hantering.

### *11.3.3 Gemensamma perspektiv och potentiella konflikter*

Deltagarna i den här intervjustudien representerar två nyckelaktörsgrupper som skulle påverkas av och vilja se nytta med efterfrågefleksibilitetslösningar i framtiden. De bidrar med olika perspektiv och tankar kring efterfrågefleksibilitet utifrån sina verksamheter med respektive intressen, mål, etc. Men studien föreslår också att de har några saker gemensamt. Både fastighetsägare och balansansvariga inser att energisystemet förändras, men när det gäller t.ex. efterfrågefleksibilitet så har de svårt att sja om framtiden eller agera proaktivt. Detta kan innebära att man väljer att avvakta i frågan och se vad utvecklingen leder till, vilket leder till frågan vem som bör eller kan driva på utvecklingen av efterfrågefleksibilitet? Båda grupper anser att de ekonomiska incitamenten är kritiska men fortsatt oklara. Intressant och värt att undersöka vidare är att både fastighetsägare och balansansvariga anser sig behöva ha kontroll/tillgång till realtidsdata för att kunna göra sitt jobb på bästa sätt, vilket kan leda till potentiella konflikter i efterfrågefleksibilitetslösningar om man inte löser t.ex. roller, ansvar och avtal. Slutligen tror båda grupper på att "paketera" efterfrågefleksibilitet med andra energitjänster, för att erbjuda mer attraktiva helhetslösningar.

Intervjustudien i det här projektet har fokuserat på hinder och drivkrafter kring efterfrågefleksibilitet med hjälp av koalitioner av värmepumpar i flerbostadshus, men bekräftar flera tidigare identifierade hinder och drivkrafter, t.ex. i Sweco's studie (2016). Dessa hinder och drivkrafter kan alltså anses aktuella också för koalitioner av värmepumpar i flerbostadshus. Utöver dessa så pekar den här studien på vikten av att bättre förstå behovet av kontroll och data hos både fastighetsägare och balansansvariga i sina respektive verksamheter och hur detta påverkar framtida efterfrågefleksibilitetslösningar.

## 12 Slutsatser och diskussion

I det avslutande kapitlet presenteras hur projektets måluppfyllnad och slutsatser baserade på projektets resultat. Vidare diskuteras ett antal frågor och utmaningar som projektet har identifierat som viktiga för framtida forskning och utveckling inom området. För att göra det översiktligt, presenteras slutsatserna med tillhörande diskussion i tre teman – *tekniska*, *marknadsmässiga*, respektive *organisatoriska och användarmässiga*.

### 12.1 Projekt mål och måluppfyllnad

Det övergripande målet med projektet var att öka kunskapen om, och därmed möjligheterna för, efterfrågefleksibilitet i bebyggelsen med värmepumpslösningar. Fokus är lösningar som garanterar komforten hos slutanvändare och som går att replikera i stor skala till låg kostnad. För att utvärdera och studera flexibiliteten krävs metoder som kan estimerar potentialer och simulera hur dessa kan användas på marknaden. Projektet avser därför ta fram verifierade metoder och modeller som kan utföra sådana analyser, samt applicera dessa i ett antal verkliga fallstudier. De specifika projektmålen finns listade i kapitel 5.1.

Inom projektet har en modell för simulering av lastprofiler i flerbostadshus tagits fram, modellen innefattar samtliga komponenter som listades som projektmål. En användbar dynamisk aggregationsmodell för storskaligt utnyttjande av större värmepumpar i flerbostadshus och energinät har också tagits fram. Modellens funktion har testats för en mindre koalition av värmepumpar i flerfamiljshus och energiproducenter, vilket visade att den fungerar.

Ett modellbibliotek baserat på öppen källkod har publicerats på Github. Biblioteket innehåller modeller för flerbostadshus som värms med värmepump, detta kompletterar de modeller för småhus och lokaler som finns där sedan tidigare. Målet är att modulen för simulering av marknadsmodeller kommer laddas upp i biblioteket under januari 2019.

Baserat på simuleringar har den tillgänglig flexibilitet kvantifierats del för ett nätområde och dels för ett elprisområde. Resultaten visar att ett nätområde, med 174 flerbostadshus med värmepumpar, kan frigöra 10 MW under en timme på det här sättet. Ett elområde, som inkluderar drygt 10 000 flerbostadshus med värmepumpar, kan frigöra ca 170 MW under en timme. Simuleringarna visar att

den termiska trögheten i byggnaderna gör det möjligt flytta lasten i tiden mellan 4 och 10 timmar beroende på utomhustemperaturen

Den ekonomiska potentialen för förbrukarflexibilitet har beräknats för flera möjliga elmarknader. Resultaten visar att störst ekonomisk potential för nätbolagen finns genom att använda förbrukningsflexibiliteten till att minska straffavgifterna och effektabonnemanget. För balansansvariga visade sig mFRR-marknaden och effektreservmarknaden ha störst ekonomisk potential.

Utvärderingen av potentialen för ett lokalt nät visade att de tillsammans kunde minska sitt högsta effektbehov med 2,9 MW. Nätbolaget kunde därigenom i genomsnitt spara ca 480 000 SEK per år genom att använda förbrukningsflexibiliteten till att minska straffavgifterna och effektabonnemanget, vilket motsvarar 2800 kr per flerbostadshus och år. Genom att bidra till systemets energibalans får den balansansvariga ekonomisk ersättning av Svenska Kraftnät. Den här resursen resulterade i en genomsnittlig intäkt eller kostnadsreduktion på 2,7 Mkr. under en säsong i ett elprisområde på mFRR-marknaden.

Drivkrafter och hinder för koalitioner med värmepumpar i flerbostadshus har identifierats genom en intervjustudie med fastighetsägare och balansansvariga. Intervjustudien indikerade att fastighetsägare inte tycker att de ekonomiska incitamenten att erbjuda efterfrågeflexibilitet med värmepumpar är tillräckligt starka i dag. Både fastighetsägare och balansansvariga anser vidare att lösningen måste paketeras som en helhetslösning för att det ska bli intressant att låta flerbostadshusets värmepump bidra till efterfrågeflexibilitet. Balansansvariga anser dessutom att den här typen av flexibilitet inte är tillräckligt intressant då den bedöms som för liten och därav av liten nytta.

## 12.2 Tekniska slutsatser

Det har tidigare saknats modeller för att beskriva ellastprofiler för flerbostadshus och värmepumpar i den vetenskapliga litteraturen. Inom projektet har därför ett bibliotek med beräkningsmodeller för den applikationen tagits fram. Modellerna har sedan använts för att simulera den tekniska potentialen för efterfrågeflexibilitet. Vidare har projektet tagit fram algoritmer för en dynamisk aggregationsmodell för storskaligt utnyttjande av värmepumpar i flerbostadshus. Verktöget bygger på att systemet modelleras i form av ett antal agenter, där varje agent motsvarar ett lokalt värmsystem, som genom ekonomiska ”förhandlingar” med andra agenter löser optimeringsproblemet att ge komfort till lägsta kostnad.

Projektet har genom simuleringar visat på tillgänglig kapacitet, uthållighet och repeterbarhet för efterfrågeflexibilitet i flerbostadshus som värms med värmepump. Potentialen har uppskattats för olika byggnadstyper och med olika värmepumpslösningar och styrningar. Ett intressant resultat är att man riskerar att skapa större effekttoppar när värmepumparna startar igen efter att de har mottagit en off-signal och varit avstängda. Avstängningen av värmepumpen leder till en köldskuld i huset som måste hanteras på ett intelligent sätt annars riskerar man en ny effekttopp. Köldskulden sätter också en begränsning för hur nära inpå i tiden

man åter kan använda sig av byggnaden och dess värmepump för efterfrågefleksibilitet. Simuleringarna har också visat att medan potentialen på efterfrågefleksibiliteten framförallt styrs av utomhustemperaturen för äldre byggnader så är det i nyare byggnader i stället värmegenerering från internlast som styr potentialen.

### *12.2.1 Frågor och utmaningar för framtiden*

Efterfrågefleksibilitet från värmepumpar kommer inte ske i ett vakuum, utan kommer med stor sannolikhet finnas i ett sammanhang med andra energiresurser såsom elbilar, solceller och värmelager. Dessa resurser behöver koordineras och styras tillsammans för att uppnå tekniskt och ekonomisk önskvärd prestanda. Ett relevant följdprojekt vore att analysera värmepumpsstyrning i en miljö med elbilsladdning och solceller, för att utvärdera hur dessa lösningar kan arbeta tillsammans för att uppnå synergieffekter och värden för olika aktörer på elmarknaden.

Modellen för simulering av lastprofiler i flerbostadshus har validerades med mätdata från en fastighet i Jönköping. Ytterligare validering av modell är nödvändig för mer generella slutsatser om dess giltighet och träffsäkerhet gällande analysstudier av efterfrågefleksibilitet. I projektet visade det sig att det fanns brist på användbara mätdata från flerbostadshus med värmepump. Här bör man rikta in sig på att göra mät- och uppföljningsstudier på sådana fastighetsobjekt för att kunna tillgängliggöra sådan data. Branschen behöver investera i mätinfrastruktur som möjliggör sådana utredningar och validering. Nu är det vanligast med ackumulerade månadsvärden gällande energianvändning för värmepump. En validering av lastmodellen kräver en tidsupplösning på åtminstone timman.

I projektet har den teoretiska potentialen med efterfrågefleksibilitet studerats. Att testa lösningarna i en verklig demonstration är relevant för att se hur den teoretiska potentialen jämför sig med den verkliga. En intressant fråga är att utreda hur tillförlitlig efterfrågefleksibilitet är i den verkliga världen när det finns störningar som man inte har tagit hänsyn till i modellen; såsom att folk vädrar när det är varmt, tar långa duschar, etc. Givet dessa oförutsägbara störningar finns flexibilitet när den behövs som mest, exempelvis under kalla vinterdagar. Det här är en viktig frågeställning för det framtida energisystemet.

En fråga som inte har hanterats i projektet är prognostisering av elpriser, last och aktörsbehov (såsom förväntade obalanser för balansansvariga och lasttoppar för nätägare). Det här är något som behövs för att lösningen ska kunna fungera i verkliga tillämpningar. Efterfrågefleksibilitet beräknas i relation till en förväntat basfall; alltså hur kundernas elförbrukning hade sett ut om de inte hade varit flexibla. Därför är träffsäkra prognoser ett bevis på hur mycket flexibilitet som har levererats en viss timma.

### **12.3 Marknadsmässiga slutsatser**

Baserat på simuleringar av efterfrågefleksibiliteten har marknadspotentialen och de ekonomiska förutsättningarna för balansansvariga och nätbolag beräknats. Resultaten visar att med dagens system och priser är besparingspotentialen kopplad till att utnyttja efterfrågefleksibilitet från flerbostadshus med värmepump relativt

blygsam. Man kan dock anta att besparingspotentialen kommer öka i framtiden då andelen förnyelsebar, väderberoende el i systemet förväntas leda till kraftigare svängningar i tillgången på el.

Med dagens elpriser visar analyser från projektet att störst ekonomisk potential finns för nätföretaget genom att minska straffavgifter och effektabonnemang. I det undersökta fallet är besparingspotentialen på ca 480 000 kr/år vilket motsvarar ca 2800 kr/fastighet och år. För balansansvariga finns en besparingspotential på 2,7 Mkr. per år att tjäna på att medverka på mFRR-marknad och reglermarknad, omräknat blir det ca 270 kr/fastighet och år. Denna vinst ska ställas mot kostnader för att hålla ett system för efterfrågefleksibilitet som skapar koalitioner med värmepumpar igång. Krävs dessutom installationer av utrustning för respektive värmepump som ingår i systemet ökar kostnaderna ytterligare. Resultaten bekräftar slutsatserna från tidigare studier att utifrån dagens priser och dagens stabilitet i elsystem så är den ekonomiska potentialen begränsad. Även om man, som i detta projekt, tittar specifikt på *koalitioner* av värmepumpar, vilket tidigare har ansetts ha större ekonomisk potential, så är de ekonomiska incitamenten fortfarande svaga. Här blir det intressant se hur priserna utvecklas framöver, i framtiden bedöms vinsterna med efterfrågefleksibilitet vara större, dvs om övergången till väderberoende elproduktion fortsätter.

### 12.3.1 Frågor och utmaningar för framtiden

Studien visade att det finns ett begränsat ekonomiskt incitament att erbjuda flexibilitet på elmarknaden idag. Hur man utformar marknaden och incitament som möjliggör efterfrågefleksibilitet är en prioriterad fråga framåt. Det finns samhällsnytta med lösningarna eftersom man kan nyttja energiresurser och infrastruktur mer optimalt. Dock kan inte samhällsnytta självt få dessa lösningar att spridas i energisystemen.

Det finns ett antal aktörsrisker kopplade till att upphandla efterfrågefleksibilitet från elkonsumenter som inte projektet har tagit hänsyn till i marknadspotentialstudierna. Dessa risker inkluderar teknikfel (kommunikation går ner etc.), låga energipriser, att flexibiliteten inte finns när den behövs av oförutsedda anledningar. Marknadspotentialstudien är teoretisk och tar hänsyn till en avgränsad mängd faktorer, vilket bör utökas med fler risker och frågeställningar för att kunna dra en mer allmän slutsats om dess marknadspotential för olika applikationer.

Hur man får ekonomi i lösningarna är också en relevant frågeställning. Kan man koppla ihop efterfrågefleksibilitet med andra tjänster som nyttjar gemensamma digitala plattformar, såsom optimering av elbilsladdning och maximera egenkonsumtion av solel. Fastighetsägaren vill inte öka effektabonnemanget till byggnaden eftersom det driver kostnader. Man vill därför helst kunna styra elbilsladdningen så att en utökad lasttopp undviks. En sådan tjänst som kan köras i samspel med styrning av värmepump är intressant att analysera. Att göra kartläggning med fastighetsägare om vilken tjänstekatalog som är relevant för flerbostadshuset och dess kunder är ett relevant nästa steg.

## 12.4 Organisatoriska och användarmässiga slutsatser

Resultaten från intervjustudien visade också att fastighetsägarna inte tycker att ekonomiska incitamenten för att använda sina värmepumpar till efterfrågefleksibilitet är starka nog idag. Både fastighetsägare och balansansvariga pratar om att lösningen måste paketeras som en helhetslösning för att det ska bli intressant att låta flerbostadshusets värmepump bidra till efterfrågefleksibilitet. Detta skulle kunna vara laddning av elbilar eller någon annan tjänst som ger ett mervärde.

Intervjustudien visar också att balansansvariga anser att den här typen av flexibilitet inte är tillräckligt intressant då den bedöms som för liten. Idag är det istället mer fokus på att hitta stora eldrivna processer inom industrin som kan användas för efterfrågefleksibilitet. Samtidigt visade Swecos studie från 2016 att just fastigheter med värmepumpar är den aktör, vid sidan av industrin, med störst potential att kunna ställa om sin elförbrukning. Som jämförelse kan nämnas att motoreffekten på en raffinör för produktion av mekanisk pappersmassa är i storleksordningen 10–20 MW (Kärner 2017, ABB Kunden 2011), dvs. ungefär lika mycket som de 10 MW som simuleringarna i projektet visade att man kunde frigöra för ett nätområde på 174 fastigheter med värmepump som stängs av. En viktig skillnad är dock att fastigheter med värmepump efterlämnar en ”köldskuld” som på kort tid måste ”återbetalas” när man använder fastighetens värmesystem för efterfrågefleksibilitet, motsvarande skuld finns inte på samma sätt inom industrin.

Det finns också en oro bland fastighetsägarna för vad som kan hända när någon annan går in och styr värmen till husen och man inte själv har full kontroll på värmeproduktionen. Vems är t.ex. är ansvaret om något inte fungerar och det blir för kallt i huset? Man upplever också att det är svårt att bedöma vad vinsterna blir som fastighetsägare, eftersom det är svårt att uppskatta hur stor flexibiliteten bli. Det visar på att fler projekt krävs som visar på potentialen och möjliga vinster för olika intressenter. Dels i form av simuleringar och beräkningsmodeller men även i form av pilotanläggningar och demonstrationsprojekt.

### 12.4.1 Frågor och utmaningar för framtiden

Projektet bekräftar tidigare insikter om att det finns viktiga samhälls- och systemnyttor med efterfrågefleksibilitet, men att nyttan för slutanvändaren (t.ex. fastighetsägare) fortfarande är oklar. Det är svårt att se vad slutanvändarna får ut av att erbjuda sin flexibilitet kopplat till de nya ”risker” som introduceras i form av t.ex. ökad teknikkomplexitet och potentiell inverkan på verksamhet och komfort.

En fråga som vi inte tittat närmare på i projektet men som är högst relevant i och med datainsamling och styrning från tredje part, är GDPR och slutanvändarens integritet. Hur kan man utforma mätsystem för att undvika risken med att koppla energidata till enskilda beteendemönster? Ett sätt att hantera sådan problematik är att använda aggregerade mätningar för hela fastigheten. Aggregerade mätningar innebär dock att styrningen blir mer grov, då den kör med hänsyn till exempelvis medelvärden av inomhustemperatur och inte aktuella temperaturer i enskilda



lägenheter, vilket innebär en hög risk att man fattar styrbeslut på felaktig information då temperaturen kan avvika kraftigt mellan lägenheter.

En utmaning som observerats inom projektet, som även den bekräftar tidigare forskning men därmed också pekar på behovet av fortsatt arbete, är att fastighetsägarna inte är helt positiva till att låta en tredjepartsaktör sköta styrningen av t.ex. uppvärmning. Det innebär att en centraliserad styrlösning kan vara svårt att implementera då fastighetsbolagen vill sköta detta själva eller känner osäkerhet kring att lämna över det ansvaret till någon annan aktör. Fastighetsägarnas största prioritet är att leverera komfort till deras kunder och inte efterfrågefleksibilitet till elmarknad och elnätet. Detta pekar på att man måste jobba vidare med att ta fram tydliga ansvarsfördelningar och avtal för att kunna hantera denna problematik. Även kravställning på kvalitet av styrning och dess inverkan på komfort måste fastställas. En relaterad fråga som kommit fram i våra intervjuer med fastighetsägare är hur driftsäkert systemet är eftersom man lägger till komplexitet med ytterligare systemlager (ökar ”tekniktätheten”) – hur påverkar detta tid och kostnader för tillgänglighet, service och underhåll för fastighetsbolaget? Vidare, vad är kostnaderna för värmepumpsägaren att styra värmepumpen på ett visst sätt, där man ökar frekvensen av start och stopp-cyklerna? Ytterligare en fråga som är relevant är vad händer om systemen hackas? Vem ansvarar för IT-säkerheten i de här typen av system? Hur hanteras fel i systemet, dvs hur säkerställer man att huset inte blir för kallt eller för varmt om delar havererar och vilka nya krav ställer detta på tillgänglig, utbildad personal? Det här är viktiga ansvarsfrågor som måste utredas och adresseras innan efterfrågefleksibilitetslösningar av den här typen kan implementeras i bred skala.

## 13 Publikationslista

### Vetenskapliga artiklar:

- Håkansson, Maria. (2018). Energy actors' views on demand response from heat pumps. Paper presented at the BEHAVE 2018, 5th European Conference on Behaviour and Energy Efficiency, Zurich, Switzerland.
- Sandels, Claes et. al. (2018). Modeling Aggregation of Multi-Family Building loads useful for Demand Response Analysis, submitted to Journal of Building Performance Simulation

### Examensarbeten:

- Grill Rebecka, Market potential for using demand response from heat pumps in multi-family buildings, Examensarbete, Uppsala Universitet, 2018
- Oehme Sabina, Demand flexibility potential from heat pumps in multi-family residential buildings, Examensarbete, Uppsala Universitet, 2018

### Övriga publikationer:

- Lindahl Markus, Ökad elnätflexibilitet genom gemensam styrning av värmepumpar, <https://www.ri.se/sv/vad-vi-gor/projekt/okad-elnatsflexibilitet-genom-gemensam-styrning-av-varmepumpar>, 2018-11-20
- Pressmeddeland, Smart styrning av värmepumpar i flerfamiljshus, MyNewsdesk, 2017-08-31

Pressmeddelandet resulterade bl.a. i publicering i:

- Kyla & Värme
  - Expertsvar
  - Slussen
  - Energi & Miljö
  - Energinyheter
  - Byggnyheter
  - VA Insights
  - Värmepumpar – Nyheter
  - Värmepumpar i Hägersten
  - Värmepumpar i Västerås, Eskilstuna, Katrineholm och Strängnäs
  - Diverse tweets via @HeatPumpingTech, @Energimarknaden, @lof\_monica, @Energiriket, @HelleHerk, @MindsetAB, @CarolineStenv, @PatrickIsacson, @RichardThygesen, @TommyWalfridson, @martinborgqvist
  - Diversers Facebook-inlägg av ECCA Nordic, Fastighetsklimat I Sverige AB
- Publicering av paketerade modeller på Github: länk: <https://github.com/HuCk85/multidwellingmodel>

### Presentationer

- Presentation av projektet på SamspeL programkonferens *Framtidens elsystem*, Stockholm, 2018-10-15
- Workshop för kunskapsutbyte mellan EU-projektet Flexible Heat and Power (FHP) och projektet Nätflexibla värmepumpar. FHP arbetar med liknande frågeställningar om värmepumpar och efterfrågefleksibilitet, Malmö, 2018-10-18

## 14 Referenser

- [1] Arrow, K. J. and Debreu, G. "Existence of an equilibrium for a competitive economy," *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, vol. 22, no. 3, pp. 265-290, 1954.
- [2] Bartusch, C., Alvehag, K. Further exploring the potential of residential demand response programs in electricity distribution. *Applied Energy* 125 (2014) 39-59.
- [3] Bartusch, C., Wallin, F., Odlare, M., Vassileva, I., Wester, L. Introducing a demand-based electricity distribution tariff in the residential sector: Demand response and customer perception. *Energy Policy* 39 (2011) 5008-5025.
- [4] Bingsheng He, Feng Ma, & Xiaoming Yuan (2015). On the step size of symmetric alternating directions method of multipliers. Preprint
- [5] Broberg, T., Brännlund, R., Kazukauskas, A., Persson, L., Vesterberg, M. (2014) En elmarknad i förändring – Är kundernas flexibilitet till salu eller ens verklig? Energimarknadsinspektionens rapport
- [6] Boork et al. (2014). Key success factors and barriers to end user engagement in smart grid projects. BEHAVE2014, Behavior and Energy Efficiency Conference.
- [7] Boyd, S., Parikh, N, Chu, E., Peleato, B., & Eckstein, J. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers. *Foundations and Trends in Machine Learning*, Vol. 3, No. 1 (2010) 1-122
- [8] Clear, A. K., Friday, A., Hazas, M., & Lord, C. (2014). Catch my drift? Achieving comfort more sustainably in conventionally heated buildings. Paper presented at the 2014 conference on Designing interactive systems, Vancouver, BC, Canada.
- [9] de Dear, et al. (2013). Progress in thermal comfort research over the last twenty years. *Indoor Air*, 23(6), 442-461.
- [10] Energimarknadsinspektionen. (2015). Tjänster för efterfrågefleksibilitet. Sammanställning av tekniska krav och övriga villkor för tillhandahålllet av tjänster i form av ändrad elförbrukning. PM2015:02.
- [11] Energimyndigheten, 2016. Energiläget i siffror 2016 (Excel), u.o.: Statens energimyndighet.
- [12] Energimarknadsinspektionen. (2016a) Efterfrågefleksibilitet: En outnyttjad resurs i kraftsystemet.
- [13] Energimarknadsinspektionen. (2016b) Åtgärder för ökad efterfrågefleksibilitet i det svenska elsystemet. Ei R2016:15
- [14] Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering*. New York: McGraw-Hill.
- [15] Fischer, D. (2017). *Integrating Heat Pumps into Smart Grids: A study on system design, controls and operation*. Doctoral Thesis, Department of Energy Technology, Royal Institute of Technology, KTH, Stockholm, Sweden 2017.
- [16] Fischer, D. och Madani, H. (2017) On heat pumps in smart grids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70 (2017) 342-357.

- [17] Fritz, P., Jörgensen, E. & Lindskoug, S., 2009. Att följa elpriset bättre - Prismodeller och styrteknik i fältförsök, Elforsk rapport 09:70. u.o.:Elforsk.
- [18] Grill Rebecka. (2018). *Market potential for using demand response from heat pumps in multi-family buildings*, Examensarbete, Uppsala Universitet.
- [19] Halvgaard, R. (2014). Model predictive control for smart energy systems. PHD-2014-327, ISSN 0909-3192, Technical University of Denmark.
- [20] Holmberg, J. och Robert, K.H. (2000). Backcasting – a framework for strategic planning. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. Vol. 7, 4, 2000.
- [21] IEA Heat Pump Center (HPC). (2017) Heat Pumps in Smart Grids. Final report. Report no. HPT-AN42-1
- [22] Kensby, J., 2015. Buildings as thermal energy storage – Pilot test and large-scale implementation for district heating systems, Göteborg: Chalmers University of Technology.
- [23] Kraning, M., Chu, E., Lavaei, J., & Boyd, S. Message passing for dynamic network energy management. *Foundations and Trends in Optimization*. Vol. 1, No. 2 (2014) 73–126.
- [24] Kraning, M. Cha, E., Lavaei, J., & Boyd, S. (2013). Dynamic network energy management via proximal message passing. *Foundations and Trends in Optimization*. Vol. 1, No. 2 (2013) 70–122.
- [25] Kvale, S. och Brinkmann, S. (2009) *Den kvalitativa forskningsintervjun*, Studentlitteratur, Lund, 2009.
- [26] Lindskoug, S., 2006. Demonstrationsprojekt Effektstyrning på användarsidan vid effektbristsituationer – fortsättningsprojekt, Elforsk rapport 06:83. u.o.:Elforsk.
- [27] Makhdoumi, A., & Ozdaglar, A. (2014). Broadcast-based distributed alternating direction method of multipliers.
- [28] Nylén, P. O. (2011). Möjligheter och hinder för laststyrning. Elforsk Report, 11, 70.
- [29] Oehme Sabina. (2018). *Demand flexibility potential from heat pumps in multi-family residential buildings*, Examensarbete, Uppsala Universitet.
- [30] Paterakis et al (2017). An Overview of Demand Response: Key-elements and international experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69 (2017) 871-891.
- [31] Regeringen, 2015. Uppdrag att utreda förutsättningarna för ökad efterfrågefleksibilitet i det svenska elkraftsystemet, Regeringsbeslut M2015/2387/Ee.. u.o.:Regeringen.
- [32] Renström, S. (2016). INVITING INTERACTION: explorations of the district heating interface for people. Licentiate thesis, Department of Product and Production Development, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2016.
- [33] Sandels, C., 2016. Modeling and Simulation of Electricity Consumption Profiles in the Northern European Building Stock. Stockholm: u.n.
- [34] Shove, E., Chappells, H., Lutzenhiser, L., & Hackett, B. (2008). Comfort in a lower carbon society. *Building Research & Information*, 36(4), 307-311.
- [35] Smart Energy Demand Coalition (SEDC). (2015). Mapping Demand Response in Europe Today – 2015.

- [36] SOU 2014:84, 2014. Planera för effekt! Slutbetänkande från Samordningsrådet för smarta elnät, SOU 2014:84., u.o.: u.n.
- [37] Steen, D. 2015. Effects of network tariffs on residential distribution systems and price-responsive customers under hourly electricity pricing. *IEEE Transactions on Smart Grids*.
- [38] Sweco. (2014). NEPP report. Analysera effekten av olika förändringar i regelverk, rollfördelningar och marknadsmodeller som kan bidra till att utnyttja möjligheterna till efterfrågefleksibilitet bättre. Rapport till Samordningsrådet för smarta elnät.
- [39] Sweco. (2016). Elkunders möjlighet till flexibel elanvändning: En underlagsrapport till Energimarknadsinspektionen.
- [40] Uzawa, H. (1960). "Market mechanisms and mathematical programming," *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, vol. 28, no. 4, pp. 872-881, 1960.
- [41] Uzawa, H. (1960). "Walras' tâtonnement in the theory of exchange," *The Review of Econometric Studies*, vol. 27, no. 3, pp. 182-194, 1960.
- [42] Walras, L. (1896). *Éléments d'économie politique pure, ou, Théorie de la richesse sociale*. F. Rouge, 1896.
- [43] Widén, J., 2010. A high-resolution stochastic model of domestic activity. *Applied Energy*, pp. 1880-1892.
- [44] Kärner, J. (2017). Energioptimering vid Kvarnsvedens pappersbruk, Examensarbete Umeå Universitet
- [45] ABB Kunden (2011). Ökad produktion med mindre energi, <http://www.abb.se/cawp/seitp202/192796606d1626b5c1257941003bd0dd.aspx>, (nedladdad 2018-12-19)

## 15 Bilagor

Bilaga 1: Administrativ bilaga

Bilaga 2: Grill Rebecka. (2018). *Market potential for using demand response from heat pumps in multi-family buildings*, Examensarbete, Uppsala Universitet

Bilaga 3: Oehme Sabina. (2018). *Demand flexibility potential from heat pumps in multi-family residential buildings*, Examensarbete, Uppsala Universitet

Bilaga 4: Sandels Claes, et al. (2018). *Modeling Aggregation of Multi-Family Building loads useful for Demand Response Analysis*, submitted to Journal of Building Performance Simulation