

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Bostäder för flexibilitet	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Homes for flexibility	
Universitet/högskola/företag RISE Research Institutes of Sweden	Avdelning/institution Energi och Resurser
Adress Box 857, 501 15 Borås	
Namn på projektledare Tommy Walfridson	
Namn på ev övriga projektdeltagare Tommy Walfridson, Morgan Willis, Hanna Björner Brauer, Maria Håkansson, Gustaf Bengtsson, Peter Lidbom	
Nyckelord: 5-7 st värmepump, laststyrning, flexibilitet, hushåll, kapacitetsbrist	

1 Förord

Projektet är finansierat av Energimyndigheten genom programmet Termo – värme och kyla för framtidens energisystem.

RISE Research Institutes of Sweden har varit projektledare och största utförare av projektet. I projektet har en grupp företag varit delaktiga. NIBE och Mitsubishi Electric har båda hjälpt till med att välja ut hushåll som vi testat i, något som varit ovärderligt i projektet. Dessutom har de bidragit med kompetens om hur vi kunnat styra värmepumparna, men även med fysiska ändringar i några produkter för att möjliggöra vårt arbete.

Tekniska Verken i Linköping har varit till stor hjälp att få oss att förstå elnätsdynamik och hur hög kapacitet elnätet har, men även var flaskhalsar finns och kommer finnas i framtiden.

Embriq har hjälpt projektet att programmera mot de API som värmepumparna använder så att styrning av värmepumparna har varit möjlig att utföra.

De företag som varit med i projektet är:

1	NIBE	Värmepumpstillverkare
2	Mitsubishi Electric	Värmepumpstillverkare
3	Tekniska Verken i Linköping	Elproducent/nätägare
4	Embriq	IT-leverantör/konsult
5	SKVP	Branschorganisation
6	TMF	Branschorganisation

2 Innehållsförteckning

1	Förord.....	2
2	Innehållsförteckning	3
3	Sammanfattning.....	4
4	Summary	6
5	Introduktion.....	9
5.1	Mål och omfattning.....	9
6	Bakgrund.....	9
7	Utförande	11
7.1	Rekrytering av testobjekt	11
7.2	Mätning & styrning, Instrumentering	11
7.2.1	Olika mätomgångar.....	13
7.3	Styrstrategier.....	13
7.3.1	Styrperiod 1	14
7.3.2	Styrperiod 2	14
7.4	Intervjuer	14
7.4.1	Steg 1. Inledande intervjuer innan första styrperioden.	14
7.4.2	Steg 2. Incheckningar under första styrperioden	15
7.4.3	Steg 3. Uppföljningsintervjuer efter styrningens avslut.....	15
7.4.4	Om intervjudatan	15
7.4.5	Tematisk analys	16
8	Resultat	16
8.1	Förutsättningar för projektets tester.....	16
8.2	Mätning och styrning vinter 2021/2022.....	19
8.2.1	Tester vecka 5 2022	19
8.2.2	Tester vecka 7 2022	23
8.2.3	Tester vecka 11 2022	25
8.3	Mätning och styrning vintern 2022/2023	27
8.3.1	Tester vecka 4 2023	27
8.3.2	Tester vecka 10 2023	29
8.4	Tester på frånluftsvärmepump.....	31
8.5	Kombinerad effekt av testerna.....	32
8.6	Sammanfattning av tester	33
8.7	Intervjustudier.....	34
8.7.1	Deltagarnas upplevelse av styrningen.....	34
8.7.2	Styrning av värmepump som tjänst.....	35
8.7.3	Incitament	36
8.8	Värmelaststyrning i sitt sammanhang.....	36
8.8.1	Bakgrund	36
8.8.2	Stödjande av nationella elsystemet	37
8.8.3	Stödjande av lokalt elsystem	46
8.8.4	Uppskattning av nytta till nätägare	52
8.8.5	Affärsupplägg	52
9	Diskussion.....	52
10	Slutsats	54
11	Publikationslista	57
12	Referenser	58

3 Sammanfattning

Projektets utförde och utvärderade reglering av värmepumpar i nio villor i södra Sverige, där ägarna var informerade, men inte om när styrningen utfördes. Sex av värmepumparna från två olika tillverkare (A och B) rekryterades med hjälp av tillverkarnas nätverk.

Eftersom testerna utfördes i samband med och efter Rysslands fullskaliga invasion av Ukraina och den energikris som det innebar, påverkades hushållens ekonomi kraftigt av elpriserna. Under hösten 2022 var läget i Sveriges elsystem så ansträngt att Energimyndigheten uppmanade Sveriges befolkning att frivilligt ransonera el. Vi ser att hushållen i projektet sänkte temperaturen i februari 2023 med 0,6°C, jämfört med februari 2022, vilket visar att uppmaningen sannolikt fungerade.

Stora variationer sågs i de olika hushållens inomhustemperaturer, så stora att det i vissa hushåll ibland var svårt att urskilja vad projektets styrning gjorde för påverkan. Detta gällde speciellt det hushåll vars värmepump var styrd efter spotpriset på nordiska elbörsen, där temperaturen och värmepumpens elförbrukning emellanåt varierade väldigt kraftigt, men även eldning i de fyra hushåll som hade kamin påverkade temperaturen väldigt mycket. Andra värmepumpar gav tydlig temperaturrespons på de regleringar vi gjorde och hade relativt stabila temperaturer.

Precis som de tester vi utfört tidigare [1] så klarade vi enkelt av att stänga av värmepumparna från tillverkare B, när vi skickade tillräckligt kraftig negativ reglersignal. Tillverkare A:s värmepumpar kunde vi inte reglera första vintern, pga saknad hårdvara och när vi reglerade andra vintern var resultatet varierande. Vi lyckades inte tydligt påverka värmepumparna varje gång

Att reglera upp värmepumparna från tillverkare B gick bra, även om vi inte lyckades med någon specifik ändring generellt. Detta berodde på att vi inte skickade individuella reglersignaler till de tre värmepumparna, utan förenklade med samma signal till alla. Reglersignalen gav alltså olika utslag på de olika värmepumparna.

Vi visade att vi kunde flytta eleffekt i fyra värmepumpar genom att stänga av dem alla samtidigt och under två timmar. Efter avstängningen visade den sammanvägda elförbrukningen i de fyra värmepumparna mer än dubbla elförbrukningen mot vad den skulle varit när vi stängde av. Denna efterföljande effektökning efter att styrningen har avslutats behöver hanteras om flexibilitet från värmepumpar ska fungera, annars är risken stor att problemet bara flyttas i tid.

De inledande tester som utfördes på en av testets frånluftvärmepumpar, en modernare frekvensstyrd värmepump, visade att potentialen att reglera denna typ av värmepump var låg och att elpatronen lätt tog över efter regleringen och därmed förstörde prestandan.

Projektet har försökt att kvantifiera flexibilitetspotentialen per värmepump, i ett lokalt elnät och på nationell nivå. Vi utgick ifrån att inga komfortaspekter skulle påverka hur mycket värmepumparna skulle kunna regleras ned eller upp, vilket sannolikt är optimistisk, även om intervjustudierna i projektet faktiskt visar att det skulle fungera. På individuell nivå är flexibilitetspotentialen spetsig, med högst potential strax innan den temperatur då värmepumpens kompressor tvingas att gå

dygnet runt. Detta inträffar vid några minusgrader till nära DVUT (förbi DVUT på överdimensionerade), beroende på dimensionering av värmepumpen. Vid än lägre temperaturer faller potentialen snabbt mot noll. Tillåts reglering även av elpatronen stiger potentialen vid ännu lägre temperaturer, i gränslandet anses potentialen vara låg, men det beror såklart på den ekonomiska nyttan de timmar kompressorn och elpatronen stoppas. Uppreglering av effekten hos värmepumpar visar den omvända profilen.

Vid årskiftet 2023/24 uppskattade RISE att det fanns 340.000 värmepumpar i vattenburna värmesystem i Sverige som gick att koppla upp över internet. Dessa värmepumpar uppskattas kunna ge en flexibilitetspotential på bra bit under 1 GW, men då de som först kom ut på marknaden är svårare att koppla upp, så är många sannolikt inte uppkopplade, varför den siffran troligt är för hög. Jämför vi med den elprisstyrningen som användes i en av testets värmepumpar, så ser vi att denna reglerhypotes är alldeles för tuff, tillverkare B reglerar inte alls så hårt som vi räknar med här. Därför vågar projektet inte sätta en flexibilitetssiffra på Sveriges värmepumpar. Klart är dock att den växer varje år och eftersom vi har lätt att acceptera och använda uppkopplad teknisk utrustning numer, så kommer många av de nyinstallerade värmepumparna sannolikt bli uppkopplade.

En studie gjordes av bostadsområdet Ekängen nordost om Linköping, där vi såg att relativt få villor faktiskt hade värmepump och många av dem troligen var värmepumpar som fungerar dåligt som flexibilitetsresurser; luftluft- och frånluftsvärmepumpar. I området som helhet var 60% av villorna fjärrvärmvärmda. De två detaljstuderade nätstationerna hade fyra respektive 16 bergvärmepumpar i ett bestånd av 66 respektive 89 villor, medan omkring en tredjedel hade frånluft- eller luftluftvärmepumpar.

Vi visade att bergvärmepumparna var alldeles för få för att kunna göra någon ordentlig flexibilitetsnytta vid laddning av elbilar, åtminstone när elbilar blir vanligare och vanligare. Att styra upp vid solelsproduktion var redan överspelat i den ena nätstationen, då det redan fanns 203 kW installerade effekt, där värmepumpseffekten var en bråkdel av det.

Från hushållens beskrivningar i intervjustudien var erfarenheten av experimentet med fjärrstyrda värmepumpar mestadels positivt. De flesta deltagarna märkte inte effekterna av styrningen i termer av förändrad inomhuskomfort i någon större utsträckning. När de väl märkte någon skillnad i inomhuskomfort hade de svårt att veta om det berodde på experimentet eller någon annan faktor så som väderomslag, aktiviteter i hemmet eller husets egenskaper. Detta resultat indikerar att det finns en viss tolerans för variation i inomhustemperatur i denna typ av hushåll, eftersom de ansågs vara normalt oavsett fjärrstyrningen.

När vi bad hushållen reflektera kring en framtida tjänst för fjärrstyrning, visade det sig att våra deltagare hade låga förväntningar på ekonomisk kompensation för att erbjuda sin flexibilitet genom värmepumpen. Deltagarnas eventuella motivation att erbjuda sådan flexibilitet handlade istället om att bidra till energisystemet och jämna ut elanvändningen, och samtidigt minska pristoppar på kollektiv nivå. Däremot hade deltagarna andra reservationer och frågetecken kring en framtida tjänst, framförallt gällande tjänstens pålitlighet, säkerhet och i vilken utsträckning

familjen kan påverka systemet eller styrningen så att den passar med deras behov och vardag.

Sammanfattningsvis var deltagarna i experimentet mestadels positiva till att erbjuda flexibilitet genom deras värmesystem, även med svaga ekonomiska incitament. Det är dock inte säkert att en tjänst med extern fjärrstyrning av värmepumpen är hushållens föredragna sätt att erbjuda sådan flexibilitet.

4 Summary

The project carried out and evaluated control of heat pumps in nine villas in southern Sweden, where the owners were informed, but not about when the control was carried out. Six of the heat pumps from two different manufacturers (A and B) were recruited using the manufacturers' networks.

Because the tests were conducted in conjunction with and after Russia's full-scale invasion of Ukraine and the energy war it entailed, household finances were heavily affected by electricity prices. During the fall of 2022, the situation in Sweden's electricity system was so strained that the Swedish Energy Agency called on Sweden's population to voluntarily ration electricity. We see that the households in the project reduced the indoor temperature in February 2023 by 0.6°C, compared to February 2022, which shows that the call worked.

Large variations were seen in the temperatures of the various households, so large that in some households it was sometimes difficult to discern what impact the project's control had. This especially applied to the household whose heat pump was controlled according to the spot price on the Nordic electricity exchange market, where the temperature and the heat pump sometimes varied greatly, but also heating in the four households that had a fireplace affected the temperature very much. Other heat pumps gave a clear temperature response to the adjustments we made and had relatively stable temperatures.

Just like the tests we performed earlier [1], we easily managed to switch off the heat pumps from manufacturer B, when we sent a sufficiently strong negative control signal. We could not regulate manufacturer A's heat pumps the first winter, due to missing hardware, and when we regulated the second winter, the results were variable. We failed to clearly influence the heat pumps every time.

Regulating the heat pumps from manufacturer B went well, although we did not succeed with any specific change in general. This was because we did not send individual control signals to the three heat pumps, but simplified with the same for all.

We showed that we could shift electrical power in four heat pumps by turning them all off at the same time and for two hours. After the shutdown, the combined electricity consumption of the four heat pumps showed more than double the electricity consumption compared to what it would have been when we shut down. That lag needs to be managed if flexibility from heat pumps is to work, otherwise there is a great risk that the problem will only be moved in time.

The initial tests carried out on one of the exhaust air heat pumps in the test, a more modern frequency controlled heat pump, showed that the potential to regulate this type of heat pump was low and that the auxiliary heater easily took over after the regulation and thus destroyed the performance.

The project has attempted to quantify the flexibility potential per heat pump, in a local electricity grid and at national level. We assumed that no comfort aspects would affect how much the heat pumps could be regulated down or up, which is probably optimistic, even though the interview studies in the project actually show that it would work. At the individual level, the flexibility potential is sharp, with the highest potential just before the temperature at which the heat pump's compressor is forced to run around the clock. This occurs at a few degrees below zero to close to DVUT (past DVUT on oversized ones), depending on the sizing of the heat pump. At even lower temperatures, the potential drops rapidly to zero. Regulation of the auxiliary heater is also allowed, the potential rises at even lower temperatures, in the border country the potential is considered low, but of course it depends on the economic benefit during the hours the compressor and the electric cartridge are stopped. Up-regulation of the effect of heat pumps shows the reverse profile.

At the turn of the year 2023/24, RISE estimated that there were 340,000 heat pumps in hydronic heating systems in Sweden that could be connected via the internet. These heat pumps are estimated to be able to provide a flexibility potential of well under 1 GW, but as those that first came on the market are more difficult to connect, many are likely not connected, which is why that figure is probably too high. If we compare it with the electricity price control that was used in one of the test's heat pump, we see that this regulation hypothesis is far too tough, manufacturer B does not regulate at all as hard as we expect here. Therefore, the project does not dare to put a flexibility figure on Sweden's heat pumps. It is clear, however, that it grows every year and since we can easily accept and use connected gadgets now, many of the newly installed heat pumps will likely be connected.

A study was made of the residential area Ekängen northeast of Linköping, where we saw that relatively few villas there actually had heat pumps and many of them were probably heat pumps that function poorly as flexibility resources; air-air and exhaust air heat pumps. In the area as a whole, 60% of the villas were heated by district heating. The two network stations studied in detail had four and 16 ground source heat pumps respectively in a population of 66 and 89 households respectively, while around a third had exhaust air or air source heat pumps.

We showed that ground source heat pumps were far too few to make any real flexibility gains in EV charging, at least as EVs become more and more common. Steering up solar production was already overplayed in the one grid station, when there was already 203 kW of installed power, where the heat pump power was a fraction of that.

In discussions with Tekniska Verken in Linköping, we saw no real business plan for flexibility from heat pumps in local electricity grids, the financial benefit was too low.

From the households' descriptions in the interview study, the experience of the experiment with remote-controlled heat pumps was mostly positive. Most of the participants did not notice the effects of the control in terms of changed indoor comfort to any great extent. Once they noticed a difference in indoor comfort, they had a hard time knowing whether it was due to the experiment or some other factor such as weather changes, activities in the home, and the characteristics of the house. This result indicates that there is a certain tolerance for variation in indoor temperature in this type of household, as they were considered normal regardless of the remote control.

When we asked households to reflect on a future service for remote control, it turned out that our participants had low expectations of financial compensation for offering their flexibility through the heat pump. The participants' possible motivation to offer such flexibility was instead about contributing to the energy system and equalizing electricity use, and at the same time reducing price spikes on a collective level. On the other hand, the participants had other reservations and question marks about a future service, especially regarding the service's reliability, security and to what extent the family can influence the system or management so that it fits their needs and everyday life.

In conclusion, participants in the experiment were mostly positive about offering flexibility through their heating system, even with weak financial incentives. However, it is not certain that a service with external remote control of the heat pump is the households' preferred way of offering such flexibility.

5 Introduktion

5.1 Mål och omfattning

Huvudsyftet med projektet är att utvärdera möjligheten att utnyttja värmelaststyrning i eluppvärmda bostäder (villor, radhus och mindre flerfamiljshus) för att möta det ökande behovet att hantera den aktiva effekten i de lokala lågspänningsnäten.

Projektets effektmål är att relevanta aktörer blir medvetna om vilken lösning för värmelaststyrning i bostäder med eluppvärmning (villor, radhus och mindre flerfamiljshus) som är mest kostnadseffektiv för att kunna hantera problem med aktiv effekt i det lokala lågspänningsnätet och som fungerar på redan installerade utrustning för produktion av värme och varmvatten.

Projektet har följande projektmål:

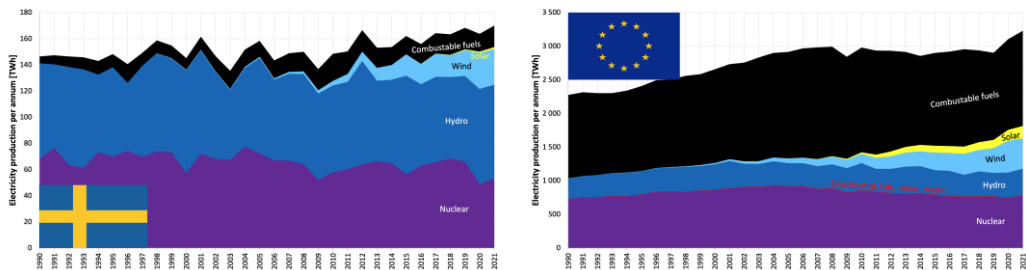
- 1) Genomföra och utvärdera styrning av värmelaster i eluppvärmda bostäder (villor, radhus och mindre flerfamiljshus). Förprogrammerad styrning ska jämföras med realtidsstyrning med syfte att kvantifiera flexibilitetspotentialen (både i storlek och i tid) samt komplexitetsgrad vid implementering. (AP1)
- 2) Undersöka incitament (ekonomiska eller andra) och acceptans för boende och bostadsägare att tillhandahålla efterfrågeflexibilitet samt identifiera sociala nyckelfaktorer för en lyckad spridning och uppskalning av tekniklösningarna till andra hushåll. (AP2)
- 3) Göra en kvantitativ uppskattning av samlagringseffekten för ett antal bostäder inom ett gemensamt lågspänningsområde samt hur väl variationerna i bostädernas tillgängliga flexibilitet korrelerar mot behoven i nätet. (AP3)
- 4) Uppskatta nyttan för nätägare samt kostnaderna för värmelaststyrning. (AP3)
- 5) Undersöka, jämföra och utvärdera möjliga affärsupplägg för flexibilitet på befintliga realtidsmarknader. Undersöka nya affärsupplägg mellan slutkund och lokal nätägare för lösningen med smart timer och hur de skulle behöva byggas upp. Affärsupplägg för realtidsstyrning jämförs med upplägg för smart timer. (AP3)

6 Bakgrund

Det finns en väldigt tydlig trend av ökad elproduktion från förnybara intermittenta källor både i Sverige och på global nivå, se Figur 1 och Figur 2 nedan. Ju mer el som genereras från väderberoende energikällor desto större kommer elproduktionens variationer vara och i ett elsystem med stor andel varierbara energikällor ökar behovet av flexibilitet för att balansera elproduktionen.

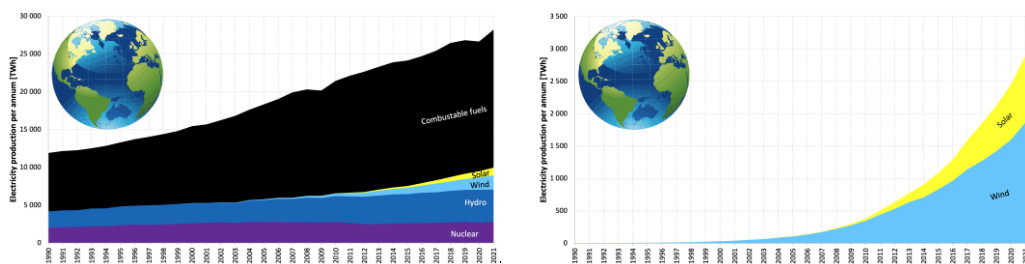
Sverige har ett politiskt mål på 100 % fossilfri el till 2040 [3] [4], samtidigt som elektrifiering av samhället ökar och kommer öka kraftigt. Flera färdplaner från ”Fossilfritt Sverige” föreslår ökad elektrifiering som ett sätt att minska klimatpåverkan från respektive industri [5].

Sveriges elsystem kommer möta en ökande efterfrågan i framtiden och en betydande del av den efterfrågan möts redan och kommer att mötas av intermittenta källor, även om regeringen nu satsar stort på att få på plats ny kärnkraft innan 2035 [4]. Även IEA World Energy Outlook 2023 förutspår ett ökat behov av flexibilitet i framtiden [6].



Figur 1. Elproduktion i Sverige (vänster) och EU 28 (höger). För bättre läsbarhet ingår Storbritannien år 2020-21 trots Brexit. Data kommer från Eurostat [7] och Energimyndigheten [8], vissa data för Storbritannien är extrapolerade år 2020-21.

Trenden för förnybar elproduktion i världen är likartad se Figur 2 nedan.



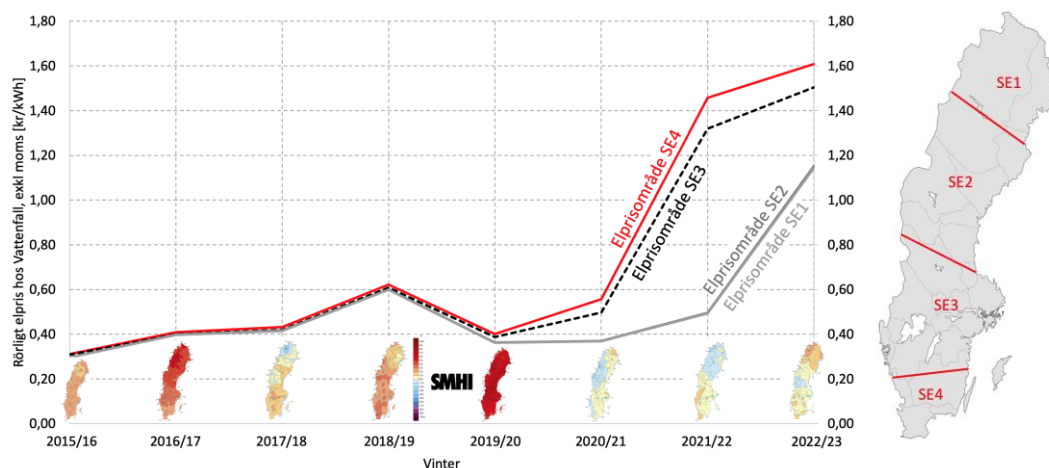
Figur 2. Elproduktion i världen (vänster) och inzoomning på vind och sol för att se den stora tillväxttakten (höger) [9].

Utöver mer och mer förnybar elproduktion, elektrifierar vi samhället snabbt nu [17], med laddbara bilar som väldigt tydliga exempel, men även elbaserad värme och processer i industrin kommer påverka elsystemet starkt i framtiden, där vätgasproduktion till stålproduktion är ett tydligt och snart exempel.

I rapporten Storskalig laststyrning av värmepumpar i elnätet har RISE [1] undersökt möjligheter och begränsningar med att styra värmepumpar efter variationer i elsystemets produktion. Där såg vi att det finns hinder på elmarknaden som försvårar att ta emot stora mängder flexibilitet från värmepumpar, då krav för tex uppmätning ännu inte framtagits, samt att kommunikationsprotokoll saknas. Dessutom tillät inte Svenska Kraftnät, när undersökningen gjordes, mer än 10 % av levererad flexibilitet från aggregerade resurser.

Under detta projektet påbörjade Ryssland sitt andra och fullskaliga försök att invadera Ukraina. Elpriset påverkades redan innan invasionen och påverkan

förstärktes av nedlagd kärnkraft 2019 och 2020. Att elprisområdena började divergera redan vintern 2020/21 är ett tydligt tecken på det senare. Regering beslutade under januari 2022 om stöd till Sveriges elkunder för vintern 2021/22, något som även återkom vintern 2022/23. Hösten 2022 gick Energimyndigheten ut med kampanjen ”Varje kilowattimme (kWh) räknas” och manade till minskad elförbrukning, alltså i praktiken en frivillig ransonering av el. Den höga prisnivån på el, se Figur 3 nedan, påverkade sannolikt hur familjerna i projektet värmdes sina hus båda dessa vintrar. Alla villor i projektet finns i elprisområde SE3 och SE4.



Figur 3 Prisutveckling för det rörliga elpriset i elprisområde SE3 och SE4 hos Vattenfall (exkl moms). Vintern 2021/22, när projektets tester påbörjades, exploderade elpriserna. Elpriserna har här beräknat som det aritmetiska medelvärdet för månaderna november t.o.m. mars för varje vinter. Temperaturkartorna i botten representerar medeltemperaturens avvikelse varje vinter jämfört med normalperioden 1991–2020. Data från Vattenfall [18] och kartor från SMHI [19]. Till höger syns en grov indelning av de fyra elprisområdena i Sverige.

7 Utförande

7.1 Rekrytering av testobjekt

Rekryteringen av testobjekt skedde i samverkan med tillverkare A och B, där de via sin kundbas nådde ut till lämpliga deltagare som intresserats av projektets mål. Urvalet gjordes på typ av värmepump och bostad. En första rekrytering resulterade i testobjekten BFF01 – BFF06. Testobjekten BFF07 och uppåt rekryterades av projektdeltagare från RISE för att utöka antalet. För beskrivning av testobjekt se Bilaga A

7.2 Mätning & styrning, Instrumentering

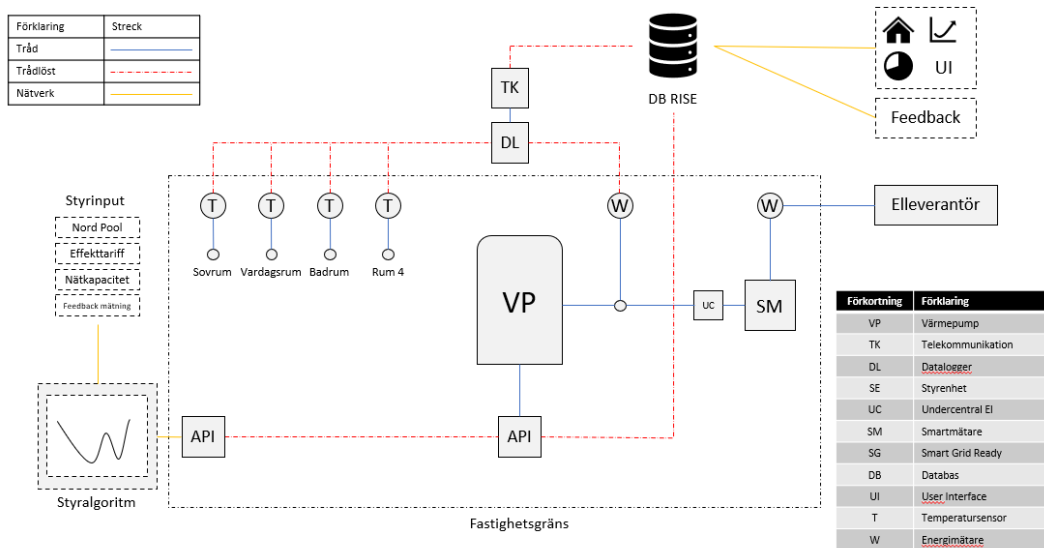
Projektet valde att utveckla ett enkelt men robust telemetriskt mätsystem baserat på kommersiellt tillgängliga trådlösa sensorer för insamling av mätvärden. Valet att använda trådlös teknik, med risk att förlora kontakt, baserades på att minimera intrång eller orsaka skada hos testobjekt. I varje medverkande villa installerades sensorer av typ lufttemperatur och luftfuktighet i tre rum som bedömdes vara mest

känsliga för temperaturförändringar, och ett fjärde rum som boende själva fick välja utifrån krav på termisk komfort. Temperatur- och luftfuktighetsensor registrerade värden vid förändring med en upplösning på 0,1°C och 0,1 %. En elmätare installerades mellan värmepump och testobjektets huvudmätare (smartmätare) för att isolera värmepumpens elanvändning på tre faser. Elmätaren mätte elanvändning per kanal och fas med en samplingshastighet på 3 sekunder. Utöver installerade sensorer fick projektet tillgång till villans totala elanvändning från testobjektets elhandlare under testperiod 1.

Samtliga sensorer kommunicerade trådlöst med en datalogger, som registrerade och sparade värden lokalt. Dataloggern bestod av en Raspberry Pi (mikrodator) med mjukvara installerad för att ta emot mätvärden från sensorerna. Ett mätsystem utvecklat av RISE installerades på mikrodatorerna för att lagra och köa insamlade mätvärden per sensor och kanal, innan de med hjälp av telekommunikation överfördes vidare till server hos RISE där de lagrades under projektet gång. Via servern kunde projektdeltagarna få tillgång till mätdata från respektive testobjekt i realtid. Detta möjliggjorde testövervakning och realtidsanalys, samt en möjlighet för återkoppling till styrsystemet i det fall att gränsvärden för termisk komfort överträdes.

Mätvärden på värmepumpens prestanda och driftsförhållanden samlades in via värmepumpens API, där parametrar efterfrågades var 15 minut. Exempel på parametrar som efterfrågades var status på kompressordrift och elpatron, gradminuter, framledningstemperatur och returtemperatur. Antalet parametrar projektet fick tillgång till varierade under projektet gång beroende på hur värmepumpstillverkarens API var konstruerat. Utomhustemperatur samlades in från värmepumpens temperaturgivare via API.

RISE utvecklade en applikation för styrning av testobjekt tillsammans med projektparten Embriq, för att centralisera och säkerställa en riskminimerad kontakt med värmepump och sköta styrning automatiserat från server. Styrapplikationen utformades för att nå värmepumpar via tillverkarens egna API och skicka överskrivande värden på parametrar som värmepumpens interna styrning följer. En första version av applikationen skrev värden till värmepumpens inställning för börvärde på beräknad inomhustemperatur, Ett temperaturlösläge justerade om värmepumpen skulle över- eller underleverera värme under en tidsperiod. I en andra version av applikation adderades möjligheten att stänga av värmepumpens kompressor och elpatron för tillverkare B. I fallet för tillverkare A adderades möjligheten att justera värmepumpens gradminuter och på så sätt möjligheten att slå på eller av kompressorn.



Figur 4 Schema mät- och styrutrustning

7.2.1 Olika mätomgångar

En först omgång mätningar i testobjekt BFF01 – BFF07 genomfördes under vinterhalvåret 2021/2022 med start i december och avslut i april, BFF01 – BFF03 gick dock inte styra pga saknad hårdvara.

En andra omgång mätningar i testobjekt BFF01 – BFF10 genomfördes under vinterhalvåret 2022/2023 med start i januari och avslut i mars. BFF02 avböjde från att delta i projektets under andra mätomgång men lät mätutrustning sitta installerad.

7.3 Styrstrategier

Projektets styrstrategi utvecklades tillsammans med värmepumpstillverkarna utifrån de parametrar som låg öppna för att externt styra värmepumpen via API. Utvecklingen skedde iterativt genom att prova och utvärdera effekterna av styrning på en värmepump i RISE Forskningsvilla innan de användes för styrning av testobjekten. Värmepumpen var av fabrikat tillverkare A. Därefter optimerades styrning för att hitta en styrteknik anpassad till projektets storlek, tillgänglig teknik och återkoppling från mätdata.

Styrstrategier utformades för tre önskade fall:

1. *Minskad effekttopp i bostaden:* Planera in och förlägg uppvärmning till tider som minskar effekttoppar genom så kallad lastförskjutning. Begränsa arbete eller säkerställ enbart kompressordrift under dygnets pristoppar. Blockera tillskott via patron under samma perioder. Undersök hur elpatron kan blockeras på distans. Upprullning med fördröjning för att inte skada nätet genom överslag eller nya större effekttoppar.
2. *Minskad energiförbrukning för bostaden:* Sänkt inomhustemperatur och minskad varmvattenproduktion inom ramarna för vad som anses

komfortabelt bland deltagande bostad. Inrapportering från deltagare om komforten kompromissas. Övervakning via mätning av rumstemperaturer.

3. *Nätbolagens fall*: Flexibilitetsbeställning, sänkning av den aggregerade effektförbrukning i distributionsnätet genom att beställa en planerad drift av värmepumpar som tidigarelägger uppvärmning och stänger av värmepumpen när effekttopparna (aggregerade i nätet) inträffar.

7.3.1 Styrperiod 1

Styrstrategin byggde på möjligheten att förskjuta värmepumpens börvärde på beräknad inomhustemperatur och simulerade en förändring av utomhustemperatur. En förskjutning av börvärdet på inomhustemperatur resulterade i att värmepumpens internstyrning antingen ökade eller minskade arbetet. Strategin anpassades under projektets början för att identifiera bostädernas värmetröghet och periodens längd då värmepumpen kunde leverera ett värmeunderskott innan termisk komfort påverkats. En annan del av strategin innebar provning för att identifiera värmepumpens reaktion på ett värmeunderskott och hur effektförbrukning såg ut i direkt anslutning till en återhämtningsperiod, då värmepumpen arbetade ikapp underskotten, detta för att överslängar i effektförbrukning tidigt noterats. Styrsignalen anpassades till en form som minimerade risk för överslag och en integrerad mängd energi som var hanterbar för villans utrymme för värmeunderskott.

7.3.2 Styrperiod 2

Likt styrstrategin under styrperiod 1 så byggde den strategin under styrperiod 2 på en förskjutning av börvärdet för inomhustemperatur, samt perioder då värmepumpen slog av eller fick sitt värde för gradminuter överskrivet för att tvinga in värmepumpen i ett tillstånd där kompressor och elpatron inte arbetar.

7.4 Intervjuer

En användarstudie i tre steg genomfördes för att förstå hushållens perspektiv på en möjlig styrningstjänst samt för att undersöka hushållens upplevelse av styrningen. Stegen beskrivs nedan.

7.4.1 Steg 1. Inledande intervjuer innan första styrperioden.

Innan styrningen av värmepumpar påbörjades genomförde vi 12 inledande intervjuer med de deltagande hushållen som bestod av personer utomstående från projektet (BFF01-BFF07). Det övergripande syftet med de inledande intervjuerna var att undersöka hushållens vardagsliv och elanvändning, deras upplevelse av sitt inomhusklimat innan styrningen, samt deras förståelse av elsystemets framtida utmaningar.

Intervjuerna varade ca 45-90 minuter, och genomfördes via Microsoft Teams eller via telefon, vilket gjorde det lättare för flera personer att delta eftersom hushållen var geografiskt utspridda i landet. Alla vuxna i hushållen bjöds in att delta, och i alla hushåll utom två deltog två vuxna från varje hushåll. Alla intervjuer spelades in och transkriberades utom en, där inspelningen inte fungerade och där datainsamlingen istället utgick från forskarens anteckningar.

I intervjuerna fick deltagarna först berätta om en typisk vardag och vilka aktiviteter som utförs i hemmet. Därefter fick de besvara på frågor kring inomhusklimat och upplevelsen av värmen. I nästa steg fick de förhålla sig till och reflektera högt kring olika hypotetiska situationer där elen stängs av, blir dyr eller begränsas. Dessa frågor syftade till att utforska hushållens förhållningssätt till att förändra elförbrukningen hemma. Den sista delen av intervjun handlade dels om tillitsfrågor kopplade till en eventuell tjänst för styrning av värmepumpen, och dels om frågor kopplat till hushållens tankar om klimat- och miljöfrågor. Dessa frågor syftade till att förstå vad som motiverar hushållen liksom möjliga drivkrafter och barriärer för att använda en potentiell styrningstjänst.

7.4.2 Steg 2. Incheckningar under första styrperioden

Under den första styrperioden (vårvintern 2022), kontaktade vi deltagarna via sms ungefär varannan vecka med syfte att stämma av hur de upplevde styrningen och huruvida de hade märkt av en skillnad i temperatur under den gångna veckan. Detta hängde ihop med att olika styrstrategier utforskades och testades under perioden, där vi ville vara uppmärksamma på vilka eventuella konsekvenser dessa gav för deltagarna. Vi valde att skicka sms till alla hushåll (BFF01-BFF07), trots att alla faktiskt inte styrdes under den första vinterperioden. Anledningen var att vi ville få indikationer på om styrningen var tydligt märkbar jämfört med den variation i inomhuskomfort som kan bero på andra parametrar så som väderomslag, säsong, vädring, eldande i kamin eller andra aktiviteter.

7.4.3 Steg 3. Uppföljningsintervjuer efter styrningens avslut

Efter den andra styrperioden (vårvintern 2023) genomförde vi en andra intervjurunda med deltagarna. Syftet denna gång var att följa upp deras upplevelse av styrningen, förstå hur styrningen påverkade deras inomhuskomfort och deras aktiviteter, samt hur de ser på en möjlig styrningstjänst för värmepumpar och vilka incitament de ha för att nyttja en sådan tjänst. Intervjuerna genomfördes återigen via Microsoft Teams eller via telefon, de spelades in och transkriberades. Intervjuerna varade mellan 20-35 minuter.

7.4.4 Om intervjudatan

Det bör noteras att två av respondenterna hade kopplingar till företag B, och därför hade kunskaper och intresse för värmepumpar och värmesystem som inte alla värmepumpsägare har. Detta kan påverka deras inställning till flexibilitet och inomhuskomfort, då de kan vara både mer kunniga och mer intresserade än andra hushåll. Det här projektet hade dock fokus på *upplevelsen av fjärrstyrning* av värmepumpar, vilket inte är en tjänst som företagen erbjuder i dagsläget och som inte heller är beroende av just deras produkter. Därför bedömer vi inte detta som problematiskt, i synnerhet då respondenterna reflekterade både öppet och kritiskt kring flexibilitet kopplat till deras egna vardagsliv och behov. Därtill är teknikutintresse och teknikkunskap något som många med exempelvis ingenjörsbakgrund för med sig till olika typer av tekniker (inte nödvändigtvis enbart det som de ägnar sig åt i yrket), och intresse för effektiva och flexibla värmesystem är därför inte unikt för de som är yrkesverksamma i branschen.

7.4.5 Tematisk analys

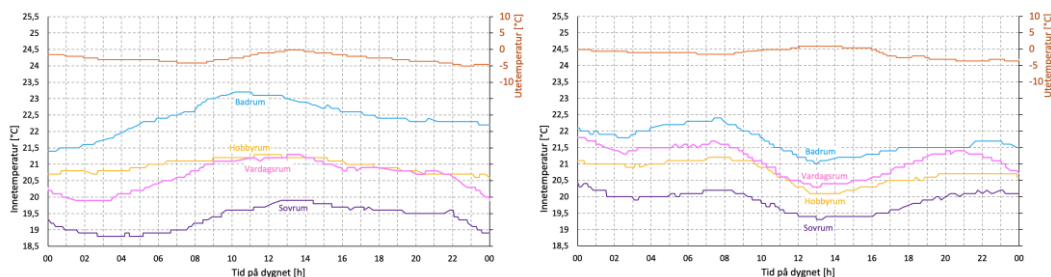
Intervjumaterialet analyserades med hjälp av tematisk analys, en kvalitativ analysmetod som går ut på att koda intervjuvaren utifrån gemensamma övergripande teman och underteman [20]. Materialet kodades med hjälp av programmet Nvivo.

8 Resultat

8.1 Förutsättningar för projektets tester

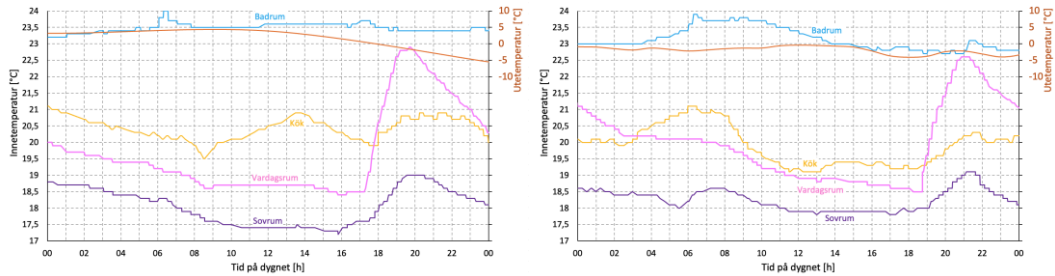
Ett av projektets mål var att genomföra och utvärdera styrning av värmelaster från värmepumpar i villor, radhus och mindre flerfamiljshus, vilket gjordes under vintrarna 2021/22 och 2022/23. Ett antal tester utfördes, men i denna rapport finns bara ett mindre urval av dem med. Sex värmepumpar från två olika tillverkare (A och B), alla installerade i villor, rekryterades med hjälp av tillverkarnas nätverk. Därutöver genomfördes vissa tester på en äldre on/off-styrd bergvärmepump och två frånluftsvärmepumpar, men resultat från dem är inte inkluderade i utvärderingen.

De inledande mätningarna visade att det var tydligt att variationerna i inomhustemperaturerna var stora i de flesta av de deltagande villorna, redan innan testerna utfördes. I Figur 5 och Figur 6 nedan visas den 31 januari 2022 utan att vi utförde någon test till vänster i båda figurerna. Till höger i samma figurer visas den 2 februari 2022, när vi gjorde tester. Temperaturvariationerna mellan de två dagarna är ungefär lika stora.



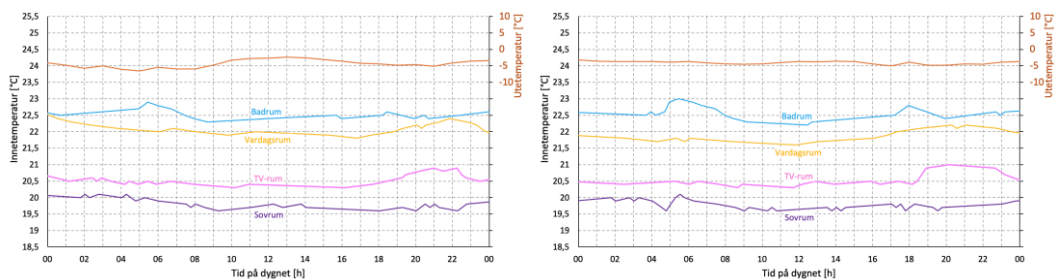
Figur 5 Exempel på temperaturvariation utan att tester utfördes (vänster, BFF05, 2022-01-31) och med tester utförda (höger, BFF05, 2022-02-02).

I Figur 6 nedan syns en tydlig temperaturvariation som med stor sannolikhet beror på att hushållet eldar i kaminen på kvällen. Detta syns som en tydligt ökad temperatur i vardagsrummet (rosa), men påverkar även temperaturen i de andra rummen.



Figur 6 Exempel på temperaturvariation utan att tester utfördes (vänster, BFF06, 2022-01-31) och med tester utförda (höger, BFF06, 2022-02-02). Notera att familjen eldar i sin kamin båda kvällarna, med kraftigt ökad temperatur som följd.

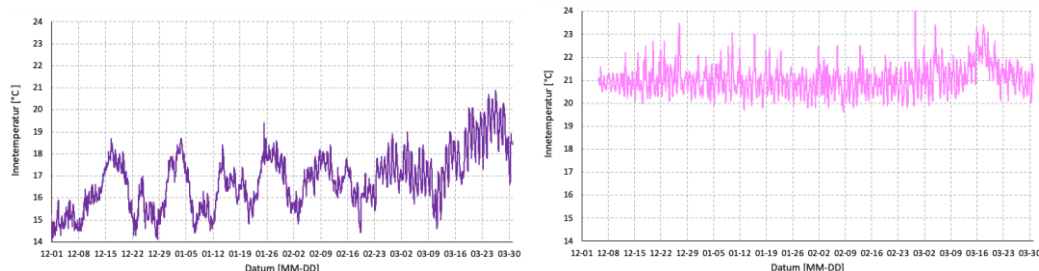
Som kontrast visas villa BFF01, där temperaturerna är stabila och varierar väldigt lite över dygnet, se Figur 7 nedan.



Figur 7 Exempel på låga temperaturvariationer i BFF01, där inga tester utfördes de två datumen (samma som i Figur 5 och Figur 6 ovan), 2022-01-31 vänster och 2022-02-02 höger. Utetemperatur från SMHIs närliggande station.

En sannolik förklaring till varför flera av de hus projektet mätt upp har så stor variation i inomhustemperatur är att de är av äldre standard som påverkas tydligt av temperaturförändringar utomhus och ändrade vindförhållande. Med självdragsventilation, som de flesta har, ökar även drivkraften vid kallare väder, dvs förlusterna genom ventilationen ökar. Som ägare av äldre hus kan det därför finnas en vana att hantera varierande temperatur, där till exempel en kamin kan användas som komplement för att snabbt hjälpa till att höja temperaturen i huset (se Figur 6 ovan).

Jämför vi temperaturen som två av hushållen höll i sina vardagsrum under vintern 2021/22 så är det väldigt stora skillnader. BFF02 höll över 19°C i sitt vardagsrum när vårsolen började värma huset ordentligt fram i mitten av mars, annars var det alltså kallare än så hela vintern, medan vardagsrummet i BFF05 hade *högre* temperatur än 19,5°C under hela vintern, se Figur 8 nedan. Medeltemperaturerna över perioden 1 december 2021 till 31 mars 2022 var låga 16,9°C i vardagsrummet i BFF02, medan den var 21,1°C i BFF05.

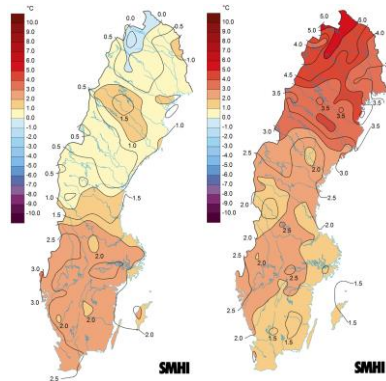


Figur 8 Temperatur i övre hall i BFF02 (vänster) och vardagsrum i BFF05 (höger) under december 2021 till mars 2022. De höga elpriserna påverkade en del husägare väldigt mycket och man höll, som i BFF02, låga temperaturer inomhus. Andra, som BFF05, valde att ha normala inomhustemperaturer.

Ett försök till jämförelse mellan åren gjordes, men p.g.a. saknade data har bara temperaturer för februari 2022 kunnat jämföras med februari 2023. Som syns i Tabell 1 nedan har nästan alla husägare sänkt temperaturen inomhus under hösten 2022. Som nämnts i Bakgrund på sidan 9 var elförsörjningen så ansträngd pga gasbrist i EU att Energimyndigheten gick ut med kampanjen ”Varje kilowattimme (kWh) räknas” under hösten 2022, i syfte att uppmuntra hushåll att minska sin elförbrukning. Dessutom var elpriserna var periodvis mycket höga och det var ett stort fokus i media på det ansträngda energiläget i Sverige och Europa. Den sänkta temperaturen inomhus bör ses i den kontexten, dvs att energikrisen mycket väl kan ha påverkat hur hushållen valde att värma sina hus. BFF02 har dock höjt temperaturen, men från väldigt låg nivå. Medeltemperaturen för februari är liknande år 2022 och 2023 i södra Sverige där testerna utfördes, se Figur 9 nedan.

Tabell 1 Temperaturer i februari 2022 jämfört med februari 2023 i sju av de nio villorna.

BFF	01	02	03	04	05	06	07
Rum	Vrd.rum	Hall	Vrd.rum	Vrd.rum	Vrd.rum	Vrd.rum	Vrd.rum
Febr. 2022	22,0°C	16,8°C	21,3°C	21,6°C	20,9°C	21,1°C	21,4°C
Febr. 2023	21,5°C	17,9°C	20,3°C	20,4°C	20,8°C	20,6°C	20,1°C
Skillnad	-0,6°C	+1,1°C	-1,0°C	-1,2°C	-0,1°C	-0,5°C	-1,4°C



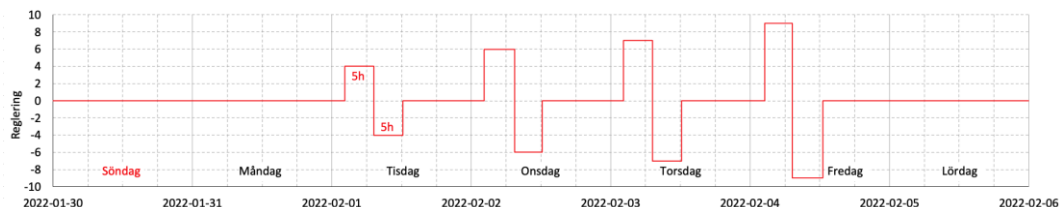
Figur 9 Medeltemperatur för februari 2022 (vänster) och 2023 (höger)

8.2 Mätning och styrning vinter 2021/2022

8.2.1 Tester vecka 5 2022

Enbart BFF04 till BFF06 (tillverkare B) deltog i testerna under vintern 2021/22 då de andra värmepumparna antingen inte var fullt uppkopplade än, eller saknade nödvändig hårdvara för styrning.

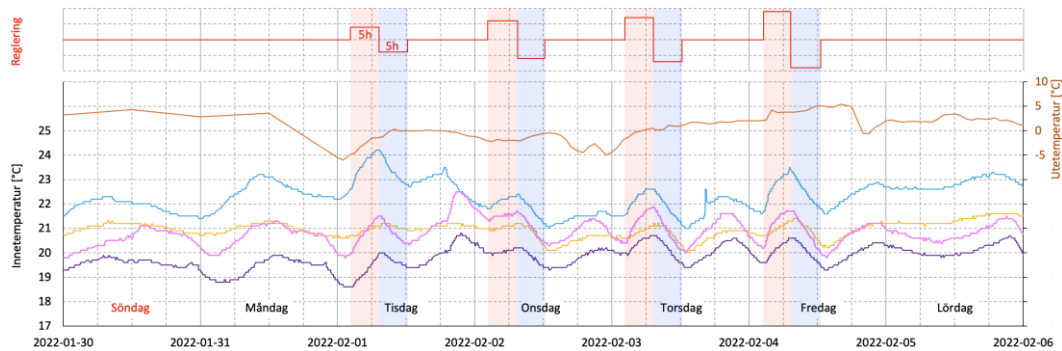
Testerna vecka 5 utfördes utan någon information till husägarna och pågick från tisdagen den 1 februari till fredagen den 4 februari 2022. Regleringen skickades som fyrkantsvågor på 5 + 5 timmar till respektive styrsystem, där amplituden ökades varje dag, se Figur 10 nedan. En positiv styrsignal innebar att värmekurvan höjdes, så att värmepumpen tvingades att jobba mer, medan en negativ signal gjorde det omvända, dvs sänkte värmekurvan så att värmepumpen jobbade mindre.



Figur 10 Reglersignal skickad till (tillverkare B) värmepumparna vecka 5 2022.

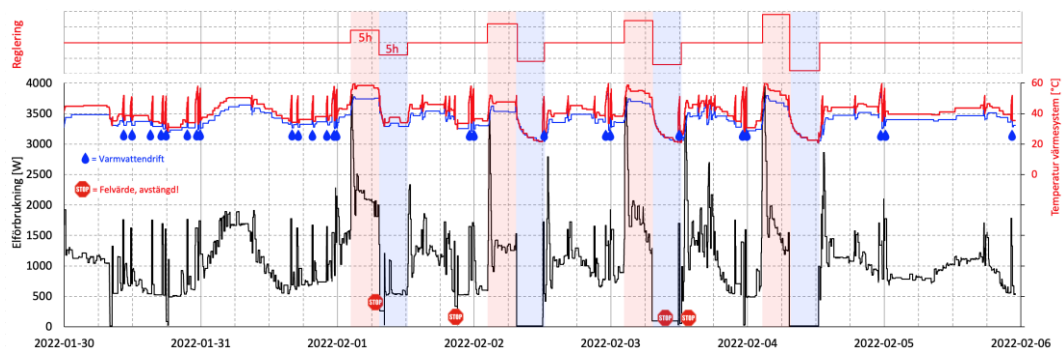
Varje testdag börjades med en positiv signal ca klockan 02 som sedan var i gång i fem timmar. Därefter, ca kl 07, skickades en negativ signal som också var i gång i fem timmar, till ca kl 12. Tanken var att värmepumparna skulle få lika mycket positiv signal som negativ signal så att temperaturen över tid inte skulle stiga eller falla.

I Figur 11 nedan syns resultatet från BFF05. Som nämnts innan är variationen i temperatur stor även utan vår reglering, så det är ingen tydlig förändring när vi reglerar värmepumparna. Dock syns det tydligt, om man tittar noggrant, att varje gång vi försöker få värmepumpen att dra mer el så ökar temperaturen i rummen i villan. Alla tillfällen då vi försöker få värmepumpen att förbruka mer el är markerat med genomskinliga röda färgfält, medan blå genomskinliga fält visar tillfällen då vi försöker bromsa värmepumpen elförbrukning. På samma sätt faller temperaturen i villans rum varje gång vi bromsar värmepumpen.



Figur 11 Temperatur i BFF05s fyra olika uppmätta rum vecka 5 2022. *Brun-orange kurva* visar utetemperaturen (höger skala). *Reglersignal i rött* överst för tydlighet, samma som Figur 10 ovan

Tittar vi på elförbrukningen i stället, se Figur 12 nedan, så ser vi att vi stoppat värmepumpen varje gång vi skickat negativ reglersignal. Första gången, med den lägre negativa signalen, stoppas bara värmepumpen under knappt en timme, startas sedan upp på lägsta varvtal och går sedan med det under resterande tiden. De tre andra tillfällena är värmepumpen avstängd under hela tiden den negativa signalen är aktiverad.



Figur 12 Värmepumpens elförbrukning i BFF05 vecka 5 2022. *Värmesystemets framlednings- och returtemperatur* i rött och blått (höger skala). När värmepumpen gör varmvatten visas med en blå droppe. *Reglersignal i rött* överst för tydlighet, samma som Figur 10 ovan. Notera att elförbrukningskurvan visa fel vid flera tillfällen, stoppskyften markerar de tillfällen då värmepumpen i praktiken är avstängd trots att elförbrukningen visar ett värde över noll.

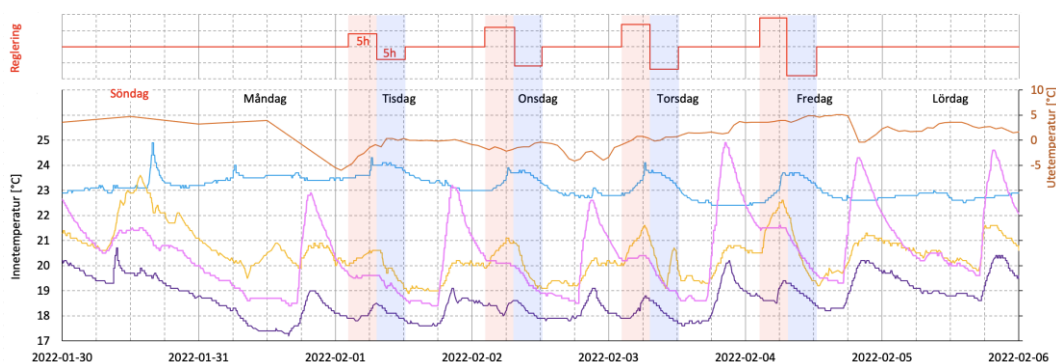
När vi skickar positiv reglersignal ökar värmepumpens varvtal och därmed elförbrukningen kraftigt varje gång. Detta får till följd att den levererade temperaturen från värmepumpen vid flera tillfällen är nära gränsen för vad värmepumpen klarar av att leverera. Detta betyder väldigt låg värmefaktor ($COP_{\text{Värme}}$), antagligen väl under 3 och kommer innebära högre elförbrukning för samma värmemängd.

Värmepumparna BFF04 till BFF06 är alla moderna frekvensstyrda bergvärmepumpar av tillverkare B och kan alla styras med elprisstyrning. Vi kan inte utesluta att det är det som gör att värmepump BFF05 varierar inomhustemperaturen så mycket, men vi har inte några data som visar om elprisstyrning används eller inte.

I Figur 12 ovan syns även när varmvatten produceras (blåa droppar överst), något som tydligt ökar elförbrukningen i värmepumpen. Både den 2:a och den 3:e februari gör värmepumpen varmvatten under slutet av negativa signalen, vilket betyder att värmepumpen trots att vi vill att den är avstängd drar nästa 2 kW el. Varmvattendriften påverkas inte alls av det sättet vi reglerar på, det är enbart värmedriften vi påverkar, så för att stoppa den krävs en annan reglerstrategi.

Tittar vi i stället på BFF06 i Figur 13 nedan ser vi ännu kraftigare variationer och det är enkelt att dra slutsatsen att familjen gillar att elda eller känner sig ekonomiskt tvungna att göra det. I princip varje kväll eldas det i familjens kamin, vilket tydligt syns på temperaturen i vardagsrummet (rosa). Det är också tydligt att värmesystemet inte är i balans. Temperaturen faller länge efter varje gång de eldat och balanstemperaturen verkar vara väl under 20°C. Utan eldning skulle det alltså vara svalt i huset, antagligen bara 18-19°C (sovrummet i lila ännu lägre). Det enda rummet som verkar hålla temperaturen är badrummet (ljusblått) som har golvvärme.

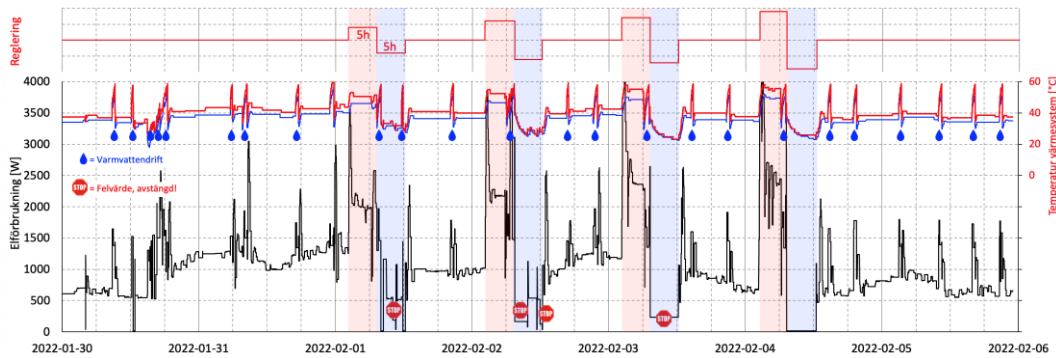
Eftersom eldningen påverkar temperaturen i villan så mycket så är det svårare att se påverkan av vår reglering, men varje gång vi skickar en positiv signal (rött fält) så bromsas temperaturfallet i vardagsrummet (rosa) och temperaturen stiger något i köket (gult), sovrummet (lila) och badrummet (ljusblått).



Figur 13 Temperatur i BFF06s fyra olika uppmätta rum. Brun-orange kurva visar utetemperaturen (höger skala). Reglersignal i rött överst för tydlighet, samma som Figur 10 ovan.

När vi skickar negativ signal (blått fält) faller temperaturen överallt igen. Om vi tittar på elförbrukningen ser vi att den stiger markant varje gång vi skickar positiv signal (rött fält). Det är också tydligt att grundelförbrukningen, dvs när vi inte reglerar, varierar mindre än i BFF05. Om det beror på villan och dess värmebehov eller att de inte använder elprisstyrning kan vi inte säkert fastslå, men sannolikt används inte elprisstyrningen här, åtminstone inte den visade veckan.

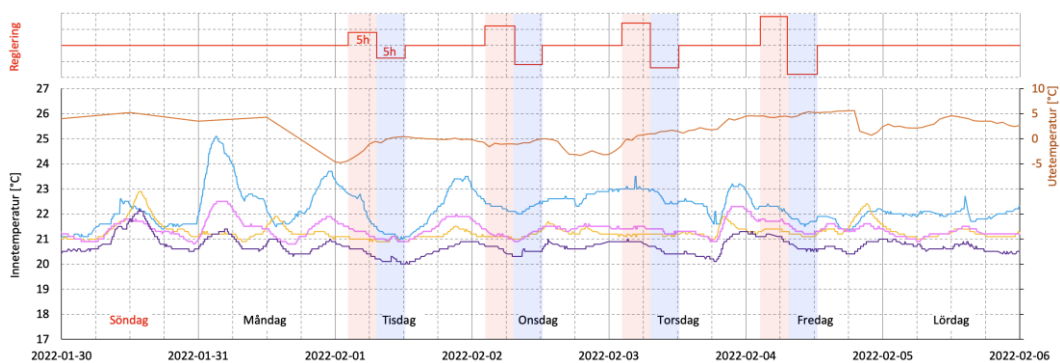
På samma sätt som i BFF05 så drar värmepumpen väldigt mycket mer el när vi skickar positiv signal, se i Figur 14 nedan. Det betyder igen att värmepumpen vid flera tillfällen är nära sin temperaturgräns, vilket leder till att den har väldigt låg värmefaktor ($COP_{\text{värme}}$) och att elförbrukning därmed blir högre för samma värmemängd.



Figur 14 Värmepumpens elförbrukning i BFF06. Värmesystemets *framlednings-* och *returtemperatur* i rött och blått (höger skala). När värmepumpen gör varmvatten visas med en blå droppe. *Reglersignal i rött* överst för tydlighet, samma som Figur 10 ovan. Notera att elförbrukningskurvan visa fel vid fyra tillfällen när den alltså borde visat noll.

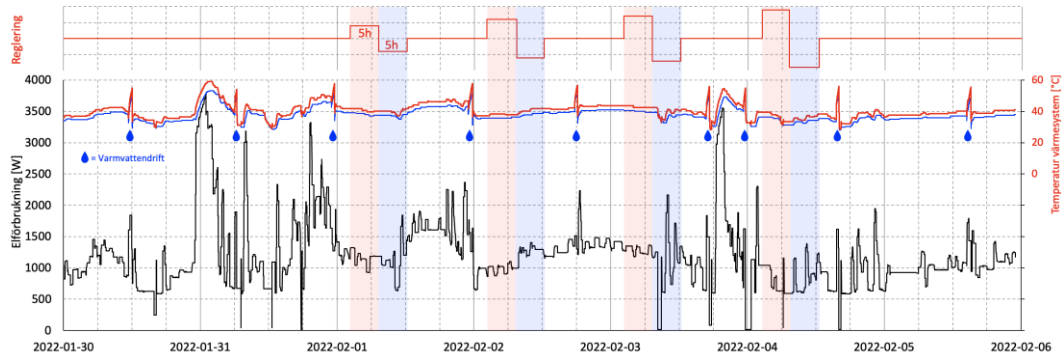
På samma sätt som i BFF05 stängs värmepumpen av när vi skickar negativ signal (blått fält), där avstängningen är kort när vi inte skickar så stor signal. De två sista gångerna är dock värmepumpen avstängd hela det tiden vi skickar signalen, dvs fem timmar varje gång.

Både BFF06 och BFF05 ovan lyckades vi att styra tydligt, något som inte alls gick med BFF04. Temperaturerna varierar bitvis kraftigt även här, men är stabilare andra perioder. Där vi reglerar går det inte dra några slutsatser alls, se Figur 15 nedan.



Figur 15 Temperatur i BFF04s fyra olika uppmätta rum. *Brun-orange kurva* visar utetemperaturen (höger skala). *Reglersignal i rött* överst för tydlighet, samma som Figur 10 ovan

Anledningen till att vi inte kan dra några tydliga slutsatser syns i Figur 16 nedan, vi lyckas varken reglera upp värmepumpens elförbrukning när vi skickar positiv signal eller reglera ned när vi skickar negativ signal. Ägaren av värmepumpen har i intervjuer bekräftat att värmepumpen styrs av tillverkare Bs elprisstyrning och denna vecka visar toppförbrukningen runt midnatt den 31 januari tydlig att så är fallet. Den elförbrukningen sammanfaller nämligen med lågt elpris under den tidiga natten, se Figur 17 nedan. Genom att köra hårt de timmarna undviks en del elförbrukning när elpriset rusar under tidiga morgonen. Även på tidiga kvällen den 3 februari ökar värmeproduktionen mycket, pga elprisstyrningen, eftersom elpriset faller precis då.



Figur 16 Värmepumpens elförbrukning i BFF04. Värmesystemets framledning- och returtemperatur i rött och blått (höger skala). När värmepumpen gör varmvatten visas med en blå droppe. Reglersignal i rött överst för tydlighet, samma som Figur 10 ovan.

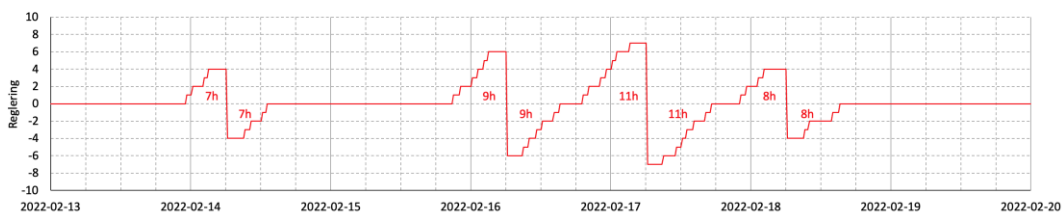


Figur 17 Spotpriser från värmepumpen (vinrött) och där det saknas spotpris från Nordpool (streckat svart). Saknade data betyder att värmepumpen av okänd anledning inte fått det från den uppkoppling mot nätet den har.

Detta visar tydligt på problemen att använda värmepumpar som flexibilitetsresurs. Vad ska prioriteras? Värmepumpsägarens komfort, dennes kostnader eller samhällets nytta av att styra värmepumpen? Sen tillkommer frågan vad som är grundnivån från vilket regleringen ska beräknas, vilket alltså är viktigt för att bokföra flexibiliteten mot t.ex. Svenska kraftnät. Mer information om detta, som kallas baseline, finns i RISE rapport *Storskalig laststyrning av värmepumpar i elnätet* [1] och i rapporten *Baselinemetoder för flexibilitetsprodukter* [13]

8.2.2 Tester vecka 7 2022

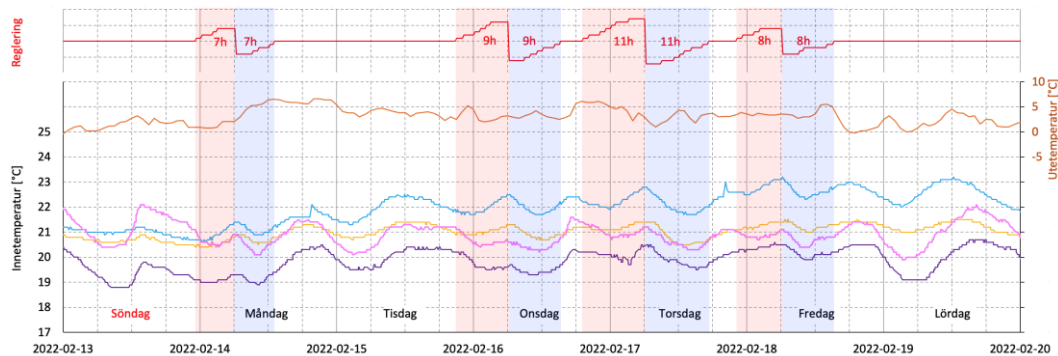
Två veckor senare testades sågtandsformad reglering under längre tid i stället, se Figur 18 nedan.



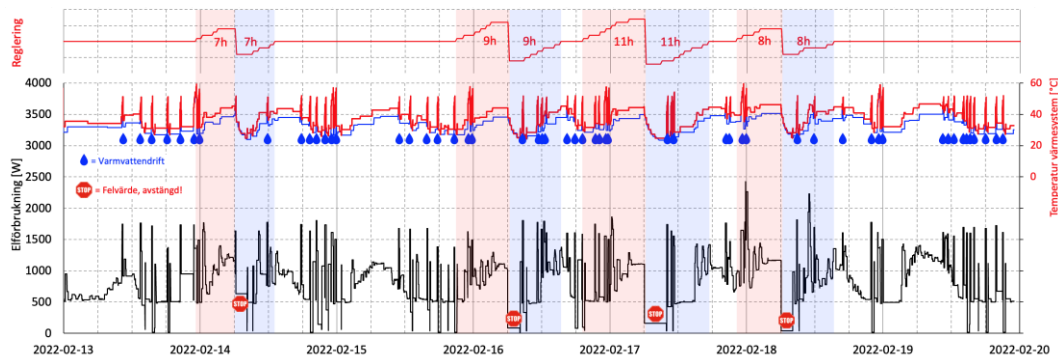
Figur 18 Reglersignal skickad till (tillverkare B) värmepumparna vecka 7 2022.

För BFF05 stiger temperaturen i villan när vi skickar positiv signal och faller när vi skickar negativ signal, men förloppen är väsentligt långsammare än vid de förra testerna, se Figur 19 nedan. I Figur 20 nedan syns att värmepumpens elförbrukning ökar betydligt långsammare och inte med en trappstegsfunktion som vecka 5 2022, se Figur 12 på sidan 20. Detta betyder också att temperaturen i värmesystemet inte

ökar lika mycket och inte är i närheten av maximal framledningstemperatur som den var i förra testet. Samtidigt är alltså ökningen av elförbrukningen inte alls lika stor vid denna veckas test.

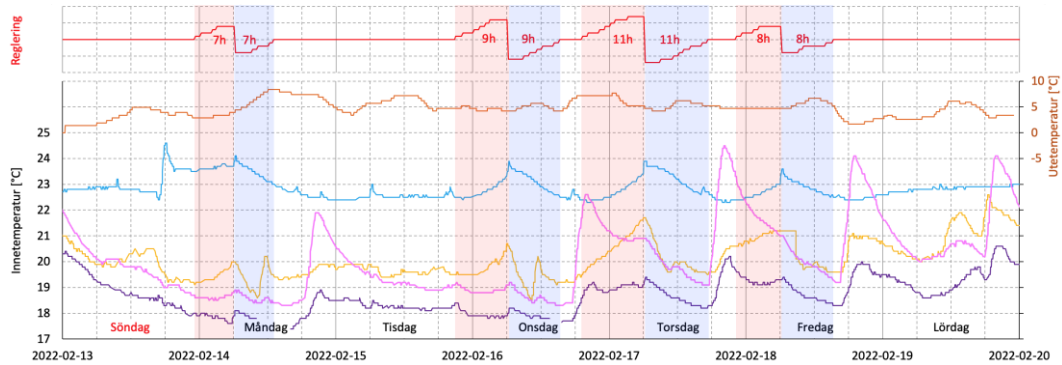


Figur 19 Temperatur i BFF05s fyra olika uppmätta rum vecka 7 2022. *Brun-orange kurva* visar utetemperaturen (höger skala). *Reglersignal i rött* överst för tydlighet, samma som Figur 18 ovan.

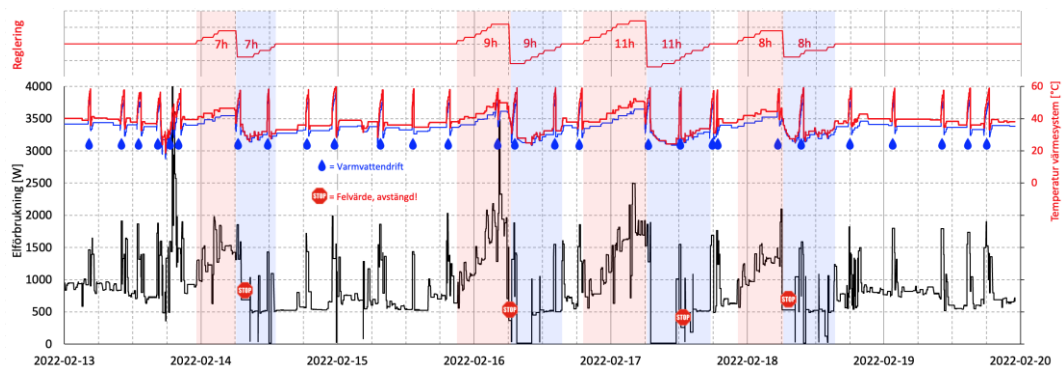


Figur 20 Värmepumpens elförbrukning i BFF05 vecka 7 2022. *Värmesystemets framlednings- och returtemperatur* i rött och blått (höger skala). När värmepumpen gör varmvatten visas med en blå droppe. *Reglersignal i rött* överst för tydlighet, samma som Figur 18 ovan. Notera att elförbrukningskurvan visar fel vid flera tillfällen.

BFF06 har fortfarande låga temperaturer inomhus när familjen inte eldat på ett tag, se förloppet efter de rosa topparna i Figur 21 nedan. Till skillnad från BFF05 ger vår reglering ordentlig ökad elförbrukning här, se Figur 22 nedan. Även här ökar elförbrukningen mer linjärt och de väldigt höga temperaturerna mot värmesystemet uteblir här också. Tittar man noga ser man att värmepumpen väljer att göra varmvatten alla gånger vi skickar negativ signal, förutom den sista då den precis gjort det innan. Att styra varmvatten är alltså absolut nödvändigt om vi vill vara säkra på att få den elförbrukningsrespons vi vill få. Vår styrstrategi i detta projekt tillät dock inte det.



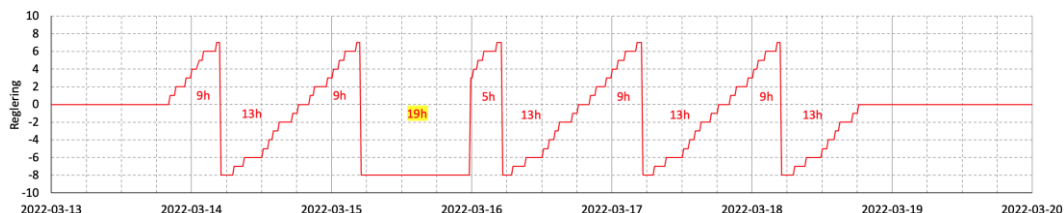
Figur 21 Temperatur i BFF06s fyra olika uppmätta rum vecka 7 2022. **Brun-orange kurva** visar utetemperaturen (höger skala). **Reglersignal i rött** överst för tydlighet, samma som Figur 18 ovan.



Figur 22 Värmepumpens elförbrukning i BFF06 vecka 7 2022. Värmesystemets **framlednings- och returtemperatur** i rött och blått (höger skala). När värmepumpen gör varmvatten visas med en blå droppe. **Reglersignal i rött** överst för tydlighet, samma som Figur 18 ovan. Notera att elförbrukningskurvan visar fel vid flera tillfällen.

8.2.3 Tester vecka 11 2022

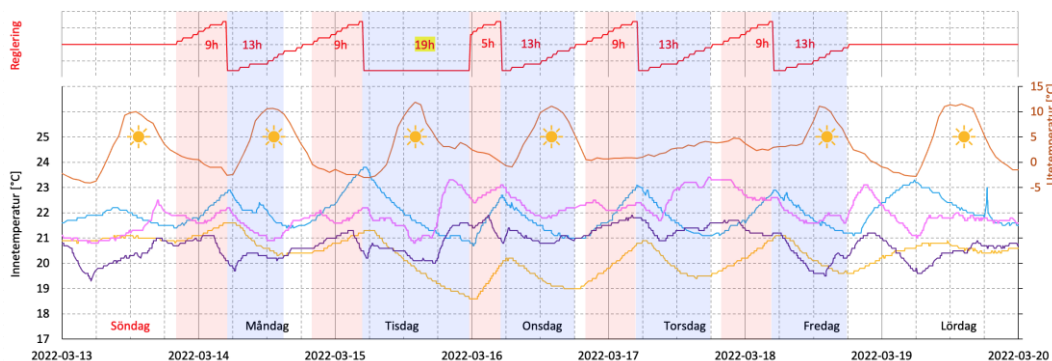
Senvinterveckan 13:e till 20:e mars 2022 står solen högre och utomhustemperaturen dagtid påverkas tydligt av det de dagar solen är framme. Det mest intressanta denna vecka är det misstag som gjordes den 15 mars, då regleringen av okänd anledning fastnade på -8 under hela 19 timmar (markerat gult).



Figur 23 Reglersignal skickad till (tillverkare B) värmepumparna vecka 11 2022.

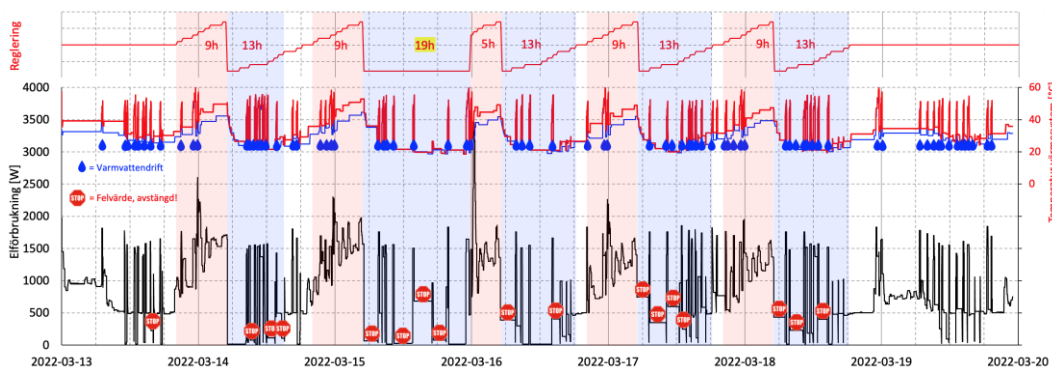
Regleringen påverkade väldigt tydligt temperaturerna i badrummet (blå) och vardagsrum 02 (gul), där temperaturerna ökade så fort vi körde positiv reglersignal och minskade vid negativ reglersignal. Under tisdagen den 15 mars när vi av misstag skickade negativ signal under 19 timmar, så sken solen vilket sannolikt

dämpade temperaturfallet något och därmed maskerade det en aning för familjen. Trots det föll temperaturerna under denna tidsperiod med drygt tre grader i badrummet och i vardagsrum 02, medan den inte föll alls lika mycket i vardagsrum 01 och sovrummet. Strax före 18 verkar familjen eldat i eldstaden, då stiger temperaturen i vardagsrum 01 och sovrummet fort.



Figur 24 Temperatur i BFF05s fyra olika uppmätta rum vecka 11 2022. Brun-orange kurva visar utetemperaturen (höger skala). Reglersignal i rött överst för tydlighet, samma som Figur 23 ovan.

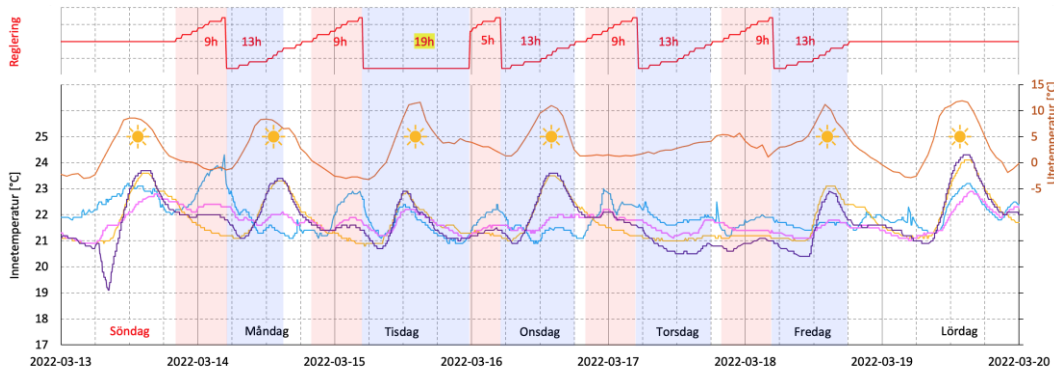
Regleringen syns väldigt tydligt i Figur 25 där elförbrukningen ökar sågtandsformat på precis likadant sätt som reglersignalen. Avstängningen, dvs när negativ reglersignal skickas, är abrupt varje gång, precis som tänkt. Sen stegas effekten upp efter ett tag, avbruten av högre effekt till varmvattnet många gånger. Under hela den 19 timmar långa avstängningen var kompressorn avstängd, förutom när värmepumpen gjorde varmvatten.



Figur 25 Värmepumpens elförbrukning i BFF05 vecka 11 2022. Värmesystemets framlednings- och returtemperatur i rött och blått (höger skala). När värmepumpen gör varmvatten visas med en blå droppe. Reglersignal i rött överst för tydlighet, samma som Figur 23 ovan. Notera att elförbrukningskurvan visar fel vid flera tillfällen.

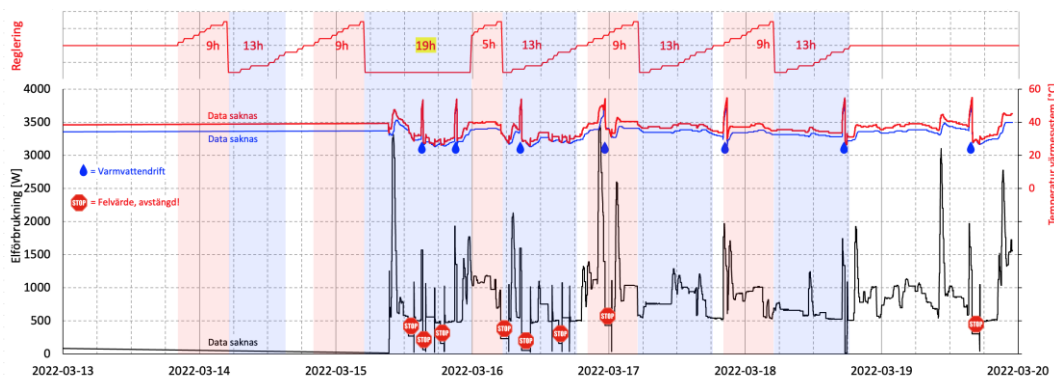
De andra två villorna saknar till viss del data, något som tyvärr inte är ovanligt vid fälttester. Det finns alltid risk att något går snett med uppkoppling eller hårdvara. För BFF04 saknas data för värmepumpen till förmiddagen den 15 mars, därför vet vi inte hur den gick innan vi orsakade den långa negativa regleringen av värmepumpen. Från temperaturerna, se Figur 26 nedan, ser vi att villan tydligt påverkas av solen denna soliga vårvecka. Trots att vi försökte sänka

effektförbrukningen (av misstag) den 15 mars så ökar temperaturen till 22-23°C i alla husets uppmätta rum denna dag. Om man ska göra fälttester under vintern utan störning av sol har man i praktiken bara några veckor i december och januari att ta till och möjligen i november om det är tillräckligt kallt, samt senare dagar när det är mulet. Solsken lägger en matta av övertemperatur inomhus annars, så att det är svårt att dra slutsatser, åtminstone vid den typ av tester vi gjort här.



Figur 26 Temperatur i BFF04s fyra olika uppmätta rum vecka 11 2022. *Brun-orange kurva* visar utetemperaturen (höger skala). *Reglersignal i rött* överst för tydlighet, samma som Figur 23 ovan.

Som diskuterats tidigare styrs denna värmepump efter elpriset, varför vår reglering inte får speciellt stor effekt, även om det syns att effekten ofta ökar när vi skickar positiv signal, se Figur 27 nedan. Detta är dock en viktig slutsats, dvs att olika sätt att försöka styra värmepumpar kan komma att jobba med eller mot varandra. Det är inte alls självklart att en reglering alltid kommer ge det utfall som förväntas.



Figur 27 Värmepumpens elförbrukning i BFF04 vecka 11 2022. Värmesystemets *framlednings- och returtemperatur* i rött och blått (höger skala). När värmepumpen gör varmvatten visas med en blå droppe. *Reglersignal i rött* överst för tydlighet, samma som Figur 23 ovan. Notera att elförbrukningskurvan visar fel vid flera tillfällen.

8.3 Mätning och styrning vintern 2022/2023

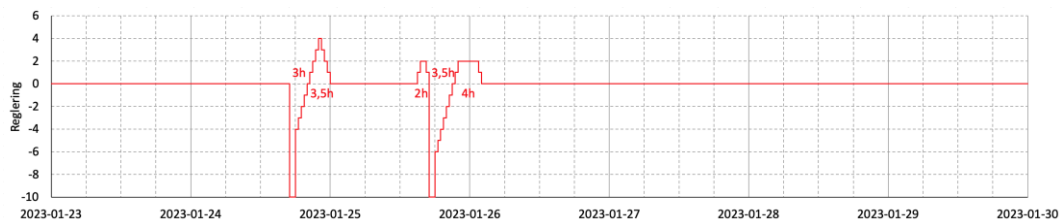
8.3.1 Tester vecka 4 2023

Från testloggen:

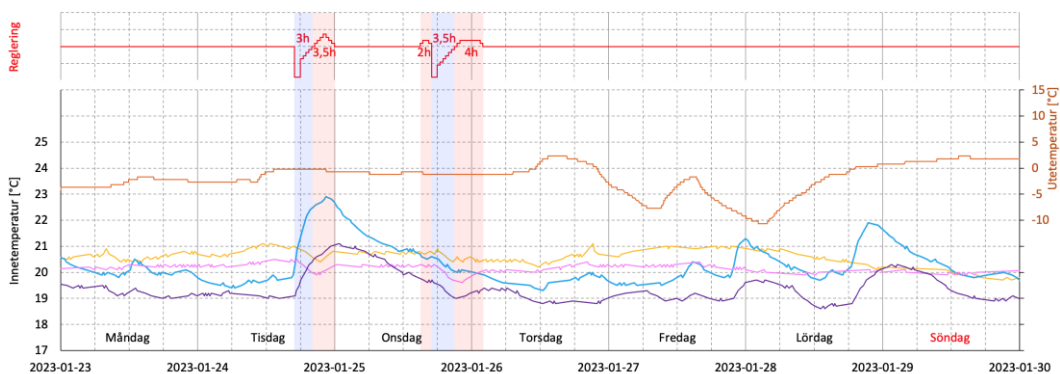
”Vi provar en hård avstängning kl 17. Kl 18 börjar vi rampa upp och kör sedan lite plus för att kompensera förlust.”

Att stänga av vet vi nu att vi kan göra med en brutal sänkning av reglersignalen, vilket vi tydligt ser fungerar i Figur 30 nedan. Värmepumpen BFF04 stängs av omedelbart när reglersignal -10 skickas, både den 24/1 och 25/1. Den 24/1 väljer familjen att elda i eldstaden och temperaturen rusar i två av rummen, se Figur 29 nedan. Tittar man väldigt noggrant ser man att eldningen startade några minuter innan värmepumpen stoppades, den är alltså initierad oberoende av vårt värmepumpsstopp. Vi ser att temperaturerna i de andra två rummen faller när värmepumpen stoppats, för att återhämta sig efter midnatt, efter vi ökat reglersignalen igen så värmepumpen jobbat hårdare ett tag.

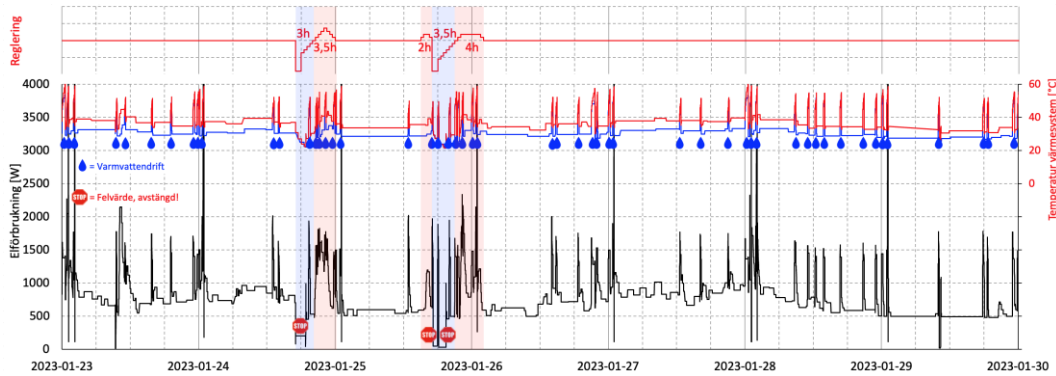
Den 25/1 eldas det inte och temperaturförloppen är tydligare. Tre av rummen visar att temperaturen faller när värmepumpen stängs av och i två av dem ökar temperaturen igen när vi ökat reglersignalen, i det sista stoppas bara temperaturfallet. Temperaturvariationerna är små i sammanhanget, omkring 0,5°C. Det sista rummet, vardagsrum 1, faller i temperatur genom hela sekvensen, då värmeöverskottet från eldningen dagen innan fortfarande håller på att jämnas ut. Elförbrukningen ökar varje gång varmvatten produceras, men om man bortser från de förbrukningsspikar så är elförbrukningen väldigt stabil.



Figur 28 Reglersignal skickad till (tillverkare B) värmepumparna vecka 4 2023.



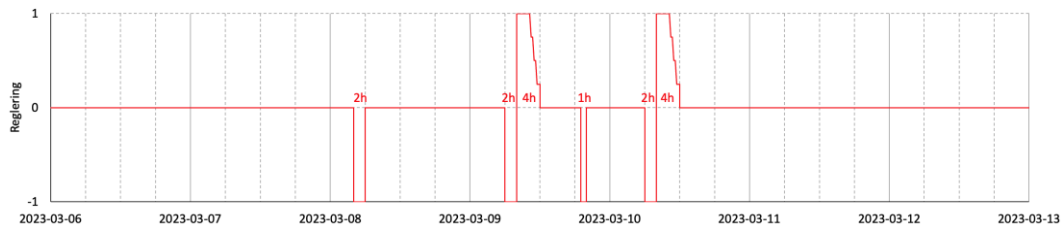
Figur 29 Temperatur i BFF05s fyra olika uppmätta rum vecka 4 2023. Brun-orange kurva visar utetemperaturen (höger skala). Reglersignal i rött överst för tydlighet, samma som Figur 28 ovan.



Figur 30 Värmepumpens elförbrukning i BFF05 vecka 4 2023. Värmesystemets framlednings- och returtemperatur i rött och blått (höger skala). När värmepumpen gör varmvatten visas med en blå droppe. Reglersignal i rött överst för tydlighet, samma som Figur 28 ovan. Notera att elförbrukningskurvan visar fel vid flera tillfällen.

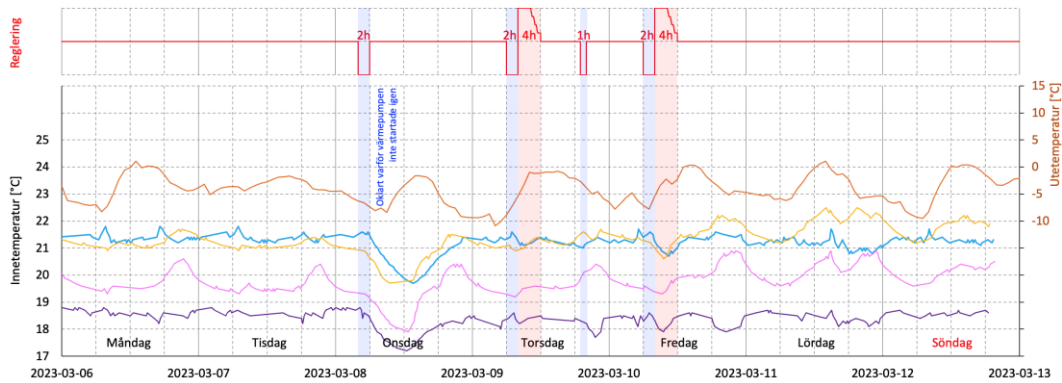
8.3.2 Tester vecka 10 2023

Det saknas säker information om hur regleringen verkligen gjordes vecka 10 2023, då tidsangivelserna verkar skiftade två timmar emot datat från värmepumparna, därför justerades tidsangivelserna att passa. Detta är alltså reglersignalen till tillverkare A (en bergvärmepump och två luftvattenvärmepumpar), se Figur 31 nedan. Negativ reglersignal betydde att värmepumparna fick kommandot att stänga av värmningen helt, positiv signal betydde att börvärdet för rumstemperaturen höjdes (maximalt med 4°C).



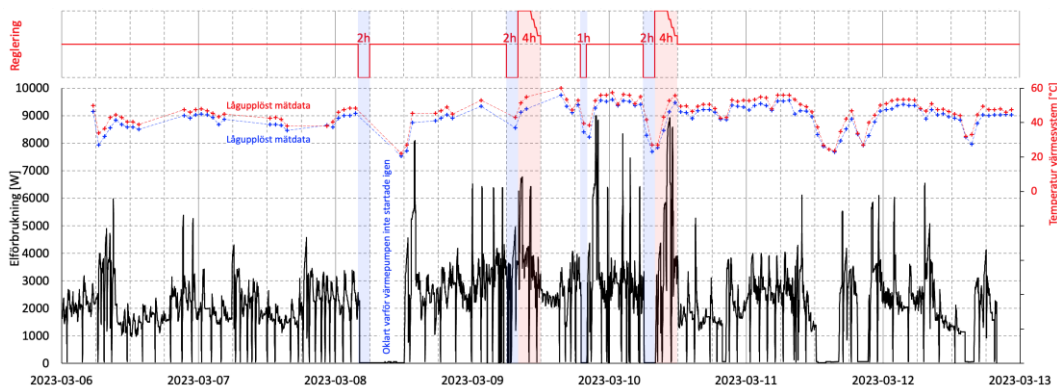
Figur 31 Reglersignal skickad till värmepumparna vecka 10 2023, datat är justerat två timmar så att det stämmer med mätningen hos värmepumparna.

Värmepump BFF01 är en luftvattenvärmepump placerad i en enplansvilla med källare. Den andra avstängningen, morgonen den 9 mars, fungerade av någon anledning inte, medan vid de andra tre stängdes värmepumpen av som tänkt. Efter första avstängningen fortsatte värmepumpen att vara avstängd i cirka sex timmar trots att vi slutat skicka reglersignal till den. Antingen fungerade inte vår kommunikation som den var tänkt, eller så fastnade värmepumpens styrning i ett felaktigt läge. Det finns inget som tyder på att värmepumpen borde fortsatt att vara avstängd, inomhustemperaturerna rasade nämligen 1 - 2 °C under tiden, se Figur 32 nedan.



Figur 32 Temperatur i BFF01s fyra olika uppmätta rum vecka 10 2023. *Brun-orange kurva* visar utetemperaturen (höger skala). *Reglersignal i rött* överst för tydlighet, samma som Figur 31 ovan.

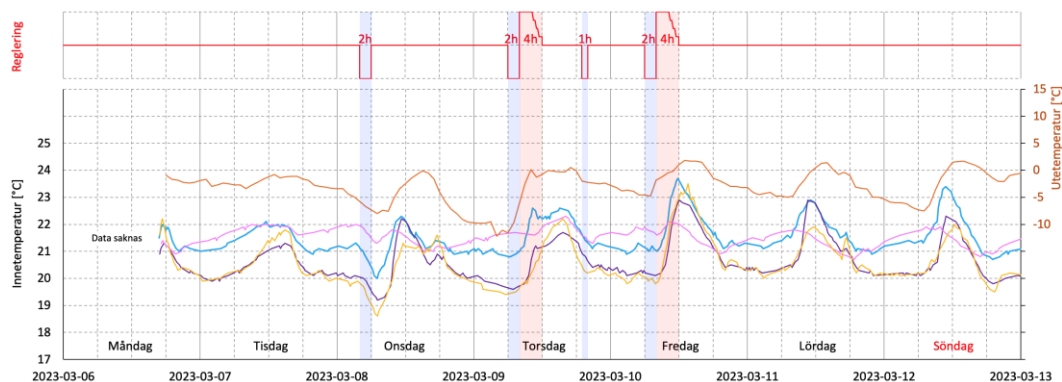
Elförbrukningen varierade kraftigt både när ingen reglering gjordes och när den gjordes. På morgonen den 9 mars påverkades inte värmepumpen alls av vår reglering, men annars verkar den stoppas när vi skickar stoppsignalen.



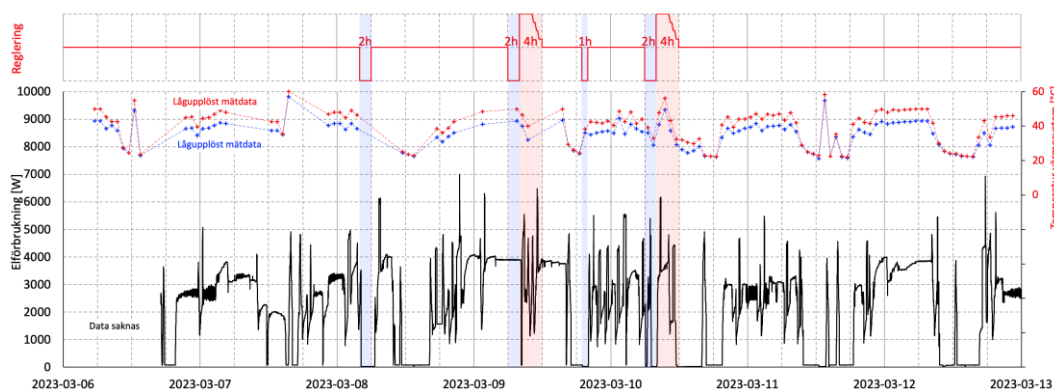
Figur 33 Värmepumpens elförbrukning i BFF01 vecka 11 2023. *Värmesystemets framlednings- och returtemperatur* i rött och blått (höger skala). När värmepumpen gör varmvatten visas med en blå droppe. *Reglersignal i rött* överst för tydlighet, samma som Figur 31 ovan.

Värmepump BFF03 är en bergvärmepump i ett större enplanshus med källare. Huset har stora fönster mot ostsydost, vilket gör att solsken kommer påverka klimatet inomhus från tidig morgon till mitt på dagen. Tydliga temperaturtoppar syns nästan varje dag denna vecka och sannolikt är temperaturåterhämtningen efter avstängningen den 8 mars till stor del pga solinstrålning genom dessa fönster. Liksom för BFF01 fungerar inte den planerade avstängningen av BFF03 morgonen den 9 mars, sannolikt var det något fel i vår programmering eller i kommunikationen till värmepumparna den dagen. Avstängningen på eftermiddagen samma dag blev i praktiken bara en förlängning av den avstängningen som redan gjorts av värmepumpens styrning, pga övertemperatur i huset. Fredagen den 10 mars stoppade inte värmepumpen omgående, kanske pga att den valde att göra varmvatten istället. Pga lågupplösta data från värmepumpens framledning- och returtemperaturer så går det inte avgöra om värmepumpen gjort varmvatten eller inte. Den ökade reglersignalen efter avstängningen gav en kraftig temperaturökning

inomhus, antagligen pga att den samverkade med solinstrålning. Temperaturen i tre av rummen hamnade mellan 22,9°C och 23,7°C då. Se Figur 34 och Figur 35 nedan.



Figur 34 Temperatur i BFF03s fyra olika uppmätta rum vecka 10 2023. *Brun-orange kurva* visar utetemperaturen (höger skala). *Reglersignal i rött* överst för tydlighet, samma som Figur 31 ovan.



Figur 35 Värmepumpens elförbrukning i BFF03 vecka 10 2023. *Värmesystemets framlednings- och returtemperatur i rött och blått* (höger skala). När värmepumpen gör varmvatten visas med en blå droppe. *Reglersignal i rött* överst för tydlighet, samma som Figur 31 ovan.

8.4 Tester på frånluftsvärmepump

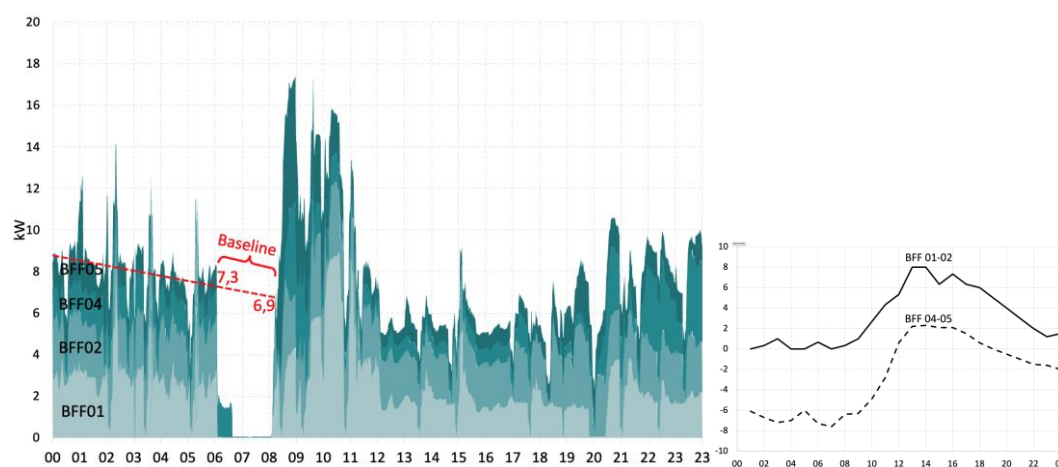
Inledande tester på en frånluftsvärmepump genomfördes under förvintern 2022/23 när elpriserna var väldigt höga och det samtidigt var relativt kallt. Resultaten visade att flexibilitetspotentialen från frånluftsvärmepumpen var väldigt låg. Detta är rimligt, då frånluftsvärmepumpar generellt har en begränsad värmekälla att jobba med (frånluften) och de därför alltid kommer vara snålt dimensionerade och aldrig kan klara huset behov vid DVUT utan att elpatronen används. Varje nedreglering i effekt riskerar därför att elpatronen kopplas in för att stötta värmepumpen, med sämre prestanda och högre elförbrukning som följd, något som sågs i testerna.

Den testade frånluftsvärmepumpen hade en nyare frekvensstyrd kompressor, vilka kan ta ut mer energi ur luften än äldre teknik för ON/OFF-frånluftsvärmepumpar. De äldre har alltså ännu sämre möjlighet att användas för flexibilitet.

Naturligtvis går det använda frånluftsvärmepumpar till flexibilitet, men flexibilitetspotentialen är låg pga låg installerad kompressoreffekt och efter nedreglering av effekten gjorts så är risken hög att elpatronen går in tillsammans med kompressorn, vilket alltså ger sämre prestanda och högre elförbrukning. När elpatronen är i drift stora delar av dygnet så är flexibilitet högre, då kan man stänga av elpatronen utan att prestandan försämras lika mycket.

8.5 Kombinerad effekt av testerna

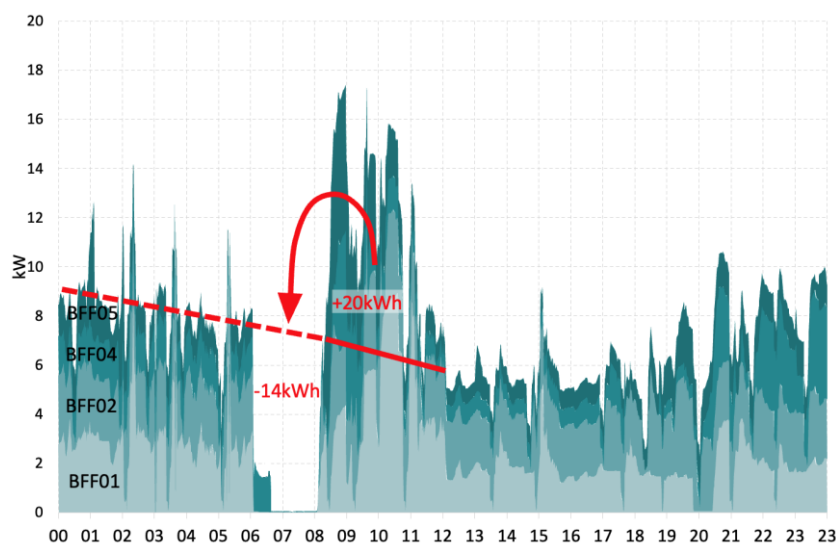
Testerna från den 10 mars 2023 stämmer väl med teorin ovan och här har vi gjort en brutal avstängning, precis som beräkningarna i kapitel 8.8.2.1 på sidan 37 och framåt utgår ifrån. Med linjarisering av sammanlagrade effekten före nedstängningen ser man att medelförbrukningen över nedstängningen borde börjat på ca 7,3 kW för att när avstängningen precis avslutades vara 6,9 kW, dvs ett medel på 7,1 kW eller 1,8 kW per värmepump, se Figur 36 nedan. Detta är ett sätt att beräkna den så kallade baseline [1], [2], [13], som behövs för att räkna ut hur mycket flexibilitet som de aggregerade värmepumparna lyckats producera. Den beräkningen krävde här att detaljerat data fanns före nedstängningen, men kunde egentligen inte beräknas utan att ha data även efter nedstängningen. För att leverera flexibilitet till Svenska Kraftnäts stödtjänster behöver antagligen beräkningen göras före leverans, vilket som se i detta exempel är utmanande, åtminstone om det krävs högre noggrannhet. I RISE rapport *Storskalig laststyrning av värmepumpar i elnätet* [1] visade vi att noggrannheten ännu inte är definierad för aggregerade resurser.



Figur 36 Summering av fyra av värmepumparna under projektets nedstängning den 10 mars 2023, inkl illustration av baselineberäkning (vänster), utomhustemperaturer (höger) vars form visar att det var en solig dag.

Efter nedstängningen av värmepumparna överkompenserar värmepumparna till bitvis mer än dubbla totala effekten. Detta beror, åtminstone delvis, på att den positiva reglersignalen vi skickade efteråt. Den var dessutom längre än den negativa som stängde av värmepumparna var, se Figur 31 ovan. Detta beteende hos värmepumparna kan leda till problem efteråt i stället för de problem vi försöker lösa med nedstängningen i sig. Med den reglering vi använde här drar värmepumparna

närmare 50 % mer el efteråt, jämfört med den elen som inte användes under nedstängningen, alltså jämfört med baseline, se Figur 37 nedan.



Figur 37 Summering av fyra av värmepumparna under RISE nedstängning den 10 mars 2023, inkl beräkning av flyttad energimängd.

Att styra värmepumparna efter en nedstängning så att överslängar i effektförbrukning inte uppstår kommer vara mycket viktigt, annars riskerar värmepumparna att skapa nya problem i elsystemet, efter de problem de hjälpt till att lösa.

8.6 Sammanfattning av tester

Många fler tester än de som visas i kapitel 8.2 till 8.4 utfördes och i rapporten visas ett urval. Flera av testerna har genomförts flera gånger. Testerna ovan fångar därför, trots att det bara är en liten del av de verkliga testerna, relativt väl vad projektet lyckades göra.

Vi ser att vi kan stoppa värmepumparna effektivt och att öka elförbrukningen lyckas vi nästan alltid med, men att det emellanåt fanns utmaningar med att styra tillverkare A:s värmepumpar. Vi ser oftast en tydlig påverkan på temperaturen i husen när vi reglerar värmepumparnas effekt, temperaturen faller när vi reglerar ned och stiger när vi reglerar upp. De tester som gjorts under senvintern när solen skiner in i husen gör det dock svårt att förstå vad som är påverkan pga regleringen och vad som är påverkan från solen.

Vi har sammanvägt ett tillfälle då vi lyckades stoppa fyra värmepumpar samtidigt och under två timmar, vilket visade på potentialen i vår brutala avstängning av värmepumparna. Det visade också hur värmepumparna överkompenserar efteråt så att elförbrukningen kortvarigt blev mer än dubbel så hög mot vad elförbrukning skulle varit om vi lämnade värmepumparna orörda. Den eleffektskompensering som krävs efteråt, för att upprätthålla temperaturbalansen, måste sannolikt smetas ut betydligt bättre om det i sig inte ska leda till flyttade problem för elsystemet. Den totala elförbrukningen ökade dessutom, något som sannolikt kommer vara svårt för

elsystemet att hantera i stor skala, åtminstone om anledningen till nedregleringen av värmepumparna är potentiell elbrist.

8.7 Intervjustudier

Resultatet från intervjustudien presenteras i två huvudsakliga spår, där det första handlar om hur deltagarna upplevde själva styrningen och experimentet, och det andra spåret handlar om hur de tänker kring en möjlig styrningstjänst som liknar den i experimentet.

Tabell 2 Översikt över hushåll och personer som deltog i intervjustudien. Namnen har ersatts av fiktiva namn.

Hushåll	1	2	3	4	5	6	7
Intervjudeltagare (Pseudonymer)	Simon	David	Sam	Rickard	Kristina	Philip	Tina
	Anna			Lina	Josef	Emily	William

8.7.1 Deltagarnas upplevelse av styrningen

Sammantaget visade analysen av intervjuerna och sms-konversationerna under testperioderna att de flesta deltagarna i studien knappt märkte av styrningen utifrån förändringar i inomhusklimatet. Tre personer från tre olika hushåll uttryckte specifikt att de märkte av effekterna av styrningen på inomhusklimatet, medan resterande nio uttryckte att de inte märkte av det. Två av dem beskrev att de märkte av det "periodvis", eller "vid få tillfällen", och en av dessa två uttryckte att hen bara upplevt att styrningen var märkbar under första vintern i experimentet (2022). Den tredje deltagaren "David", som uttryckte att han tydligt märkte av effekterna, var också den enda som upplevde att komforten påverkades negativt när det blev för kallt. Vid några tillfällen hörde han av sig till forskarna av den anledningen. Deltagaren resonerade att en anledning till att de märkte av styrningen så mycket troligen hade att göra med fysiska förutsättningarna i familjens hus, som enligt hans egen beskrivning hade dåligt isolerade fönster som gjorde det svårt att få upp värmen även utan styrningen.

En förklaring till varför så få angav att de märkte av styrningen verkar ha att göra med att en variation i upplevd inomhuskomfort ses som mer eller mindre normalt för de här hushållen, utifrån intervjuerna. Överlag var det tydligt att de flesta deltagarna hade svårt att härleda upplevda förändringar i inomhusklimat specifikt till styrningen i projektet, eftersom de beskrev hur sådana förändringar sker ändå på grund av väderomslag, husets egenskaper och aktiviteter som utförs hemma som påverkar temperaturen. Effekterna av styrningen verkade därför, i de flesta av de deltagande hushållen, smälta in i den "normala" temperaturvariationen som deltagarna förknippade med att bo i ett hus.

"Nej, alltså, har ju ingenting att jämföra, man vet ju inte egentligen vad som har påverkat, man har ju påverkan av väderleken och att det inte hänger med riktigt i temperaturförändringar, så det är väl helt normalt, så jag har inte märkt av nånting." – Philip, uppföljningsintervju.

Utöver att de flesta deltagarna inte märkte av styrningen i någon större utsträckning, samt att de var osäkra på om förändringar i inomhusklimatet var orsakade av

styrningen eller något annat, så uttryckte deltagarna att de till största del var positiva till sina upplevelser av experimentet. Styrningen verkade inte ha påverkat deras vardagsliv i någon negativ bemärkelse, oavsett om de upplevde att de märkte den eller inte. Det faktum att de inte märkte av styrningen gjorde också deltagarna osäkra på huruvida styrningen var igång eller ej, om den var aktiv och när. Vissa deltagare uttryckte också att under testperiodernas gång då och då undrat om värmepumpen fungerade som den skulle, i och med att de inte hade någon insyn i exakt hur styrningen gick till.

8.7.2 Styrning av värmepump som tjänst

Även om deltagarna uttryckte positiva upplevelser från experimentet och även om de flesta inte märkte av styrningen genom förändringar i inomhuskomfort, framkom det flera förbehåll gällande att använda fjärrstyrning av värmepumpen som en möjlig framtida tjänst. I analysen identifierades tre övergripande typer av behov som deltagarna uttryckte var villkor för att använda sig av en den typ av tjänst som utforskas i projektet.

1. **Pålitlighet** – Deltagarna uttryckte att ett viktigt villkor för att vilja engagera sig i en flexibilitetstjänst av denna typ är att tjänsten fungerar väl och är effektiv. Flera av hushållen uttryckte att det är viktigt att inte behöva ringa och felanmäla eller ”krångla” eller involvera sig för mycket i tekniken kring värmepumpen för att delta i en flexibilitetstjänst som denna. Deltagare lyfte också att det krävs att leverantören av en sådan tjänst är pålitlig och möjlig att kontakta på ett enkelt sätt om något händer.
2. **Säkerhet** – Genom intervjuerna framkom också frågetecken om säkerheten kring en fjärrstyrningstjänst. Det fanns en variation där vissa deltagare var mindre oroliga för säkerhetsfrågor än andra, men där de som uttryckte att säkerhet är viktigt underströk det på ett tydligt sätt. Detta berörde exempelvis vilka leverantörerna är, där vissa deltagare uttryckte att deras tillit ser olika ut beroende på om det är svenskt välkänt företag, en bekant leverantör som de kanske har en relation till sedan tidigare, exempelvis ett kommunalt energibolag, eller ett internationellt företag eller en för hushållen okänd aktör. Säkerhetsfrågor handlade också om integritetsskydd och hur hushållens data och information hanteras och vem den delas med.
3. **Inflytande** – Samtidigt som vissa deltagare uttryckte att de inte ville behöva engagera sig i tekniken för att tjänsten skulle fungera och vara effektivt, fanns en vilja att ha inflytande över styrningen och anpassa den efter hushållets aktiviteter och behov. Några deltagare undrade om de inte lika gärna kunde göra styrningen själv på något sätt, och för två av dem var den egna kontrollen så viktig att de uttryckte att de inte skulle vara villiga att släppa in någon annan. Exempelvis Rickard och Josef uttryckte att det är lättare att acceptera en sänkt inomhustemperatur om det är ens egna aktiva beslut, snarare än någon extern som bestämt det åt en. Andra uttryckte mer att det var viktigt att kunna stänga av eller sätta på styrningen vid behov, beroende på hur många som är hemma exempelvis då familjen har gäster eller kanske själva är på semester.

8.7.3 Incitament

Genom intervjuerna utforskades också vilka incitament, främst ekonomiska, som skulle kunna göra hushållen intresserade av ett erbjuda flexibilitet genom fjärrstyrning av sina värmepumpar. Resultatet från intervjuerna visade dock att deltagarna hade mycket svårt att sätta en siffra på vad de skulle behöva spara eller tjäna på att erbjuda sin flexibilitet på detta sätt. När deltagarna uppmanades att uppskatta vad de skulle förvänta sig att spara på tjänsten, sa några uttryckligen att de inte kunde det, medan andra gav en godtycklig siffra någonstans mellan att spara hundralappar i månaden till tusenlappar på en vinter. Det var dock tydligt att dessa siffror var godtyckliga och svåra att sätta, då deltagarna hade av förklarliga skäl svårt att ta ställning till en fiktiv tjänst där villkoren inte är klara.

Tvärtemot vad vi förväntade oss, uttryckte de flesta deltagarna låga förväntningar på ekonomisk ersättning, och fem av dem sa uttryckligen att de inte förväntade sig någon ekonomisk vinning alls, med motiveringen att hjälpa samhället och att jämna ut elanvändningen och indirekt elpriset till nytta för alla. Att bidra till energisystemet och samhället och samtidigt inte behöva vara särskilt aktivt verkade vara en viktig motivering hos deltagarna, i vissa fall starkare än ekonomiska incitament. Detta bör förstås mot bakgrund av att de flesta deltagarna knappt märkte av styrningen och inte påverkades negativt, beskrivet ovan (8.2.1).

Förväntningen om eventuell ekonomisk kompensation kan kopplas till deltagarnas tolkning och förståelse av tjänsten i sig, där deras svar indikerade en viss osäkerhet kring vem som är leverantör och kund. Några uttryckte exempelvis att de inte var intresserade av att betala för en sådan tjänst, vilket indikerar att det var svårt för hushållen att helt och hållet förstå var värdet i tjänsten låg. Ett annat antagande som vissa deltagare uttryckte var att en tjänst där ens värmepump fjärrstyrs skulle ge en minskad elräkning, och att det därför, utöver en sådan besparing, inte behövdes något mer ekonomiskt incitament.

Sammantaget visar intervjuerna att deltagarna hade låga förväntningar på ekonomiska incitament och hade därför svårt att sätta en siffra på vad de tycker vore en rimlig ersättning. Det var dock tydligt att deltagarna inte heller ville ha ökade kostnader på grund av tjänsten. Dessa förväntningar verkar vara kopplade till hur hushållen förstår tjänsten och nyttan för samhället, samt att de i vissa fall förväntade sig att en sådan tjänst kan ge någon typ av besparing på elräkningen antingen direkt eller indirekt (genom att elpriset jämnas ut för alla).

8.8 Värmelaststyrning i sitt sammanhang

8.8.1 Bakgrund

En studie i hur mycket elförbrukning som kan flyttas vid styrning av värmepumpar gjordes, för att få en grov förståelse för potentialen. Det som begränsar är i första hand husägarnas komfortbehov, men även kapaciteten hos värmepumpen begränsar. I studien har vi räknat med tre olika värmepumpar i två olika villor:

- 1) En fulldimensionerad frekvensstyrd värmepump i en äldre villa
- 2) En lägre dimensionerad On/Off-värmepump i en äldre villa
- 3) En överdimensionerad värmepump i en modern villa.

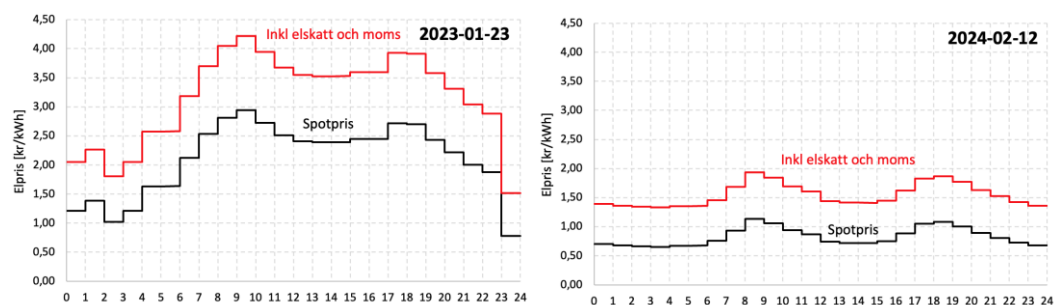
För att det ska vara intressant för husägaren att värmelaststyra krävs dessutom en ekonomisk kompensation, antingen i form av lägre elkostnad, eller betalning för systemnytta mot elsystemet.

Den dimensionerande vinterutetemperatur (DVUT) är -15°C i alla fallen, dvs villorna finns någonstans i södra Sverige. Den lägre dimensionerade värmepumpen klarar villans värmebehov utan inkopplad elpatron ned till -5°C , medan den fulldimensionerade värmepumpen precis klarar detsamma vid DVUT. Välkonstruerade moderna villor med ventilationsåtervinning (FTX) har så lågt effektbehov att det är svårt att hitta tillräckligt små värmepumpar, därför hamnar man lätt på värmepumpar som är överdimensionerade (i de fall bergvärme eller luftvattenvärmepumpar väljs), likt den tredje värmepumpen.

8.8.2 Stödjande av nationella elsystemet

8.8.2.1 Nedreglering av effekt

Elsystemet är på nationell nivå oftast hårdast belastat några timmar direkt på morgonen samt några timmar på sena eftermiddagen, dvs det är ofta också då elpriserna är som högst, se Figur 38 nedan.

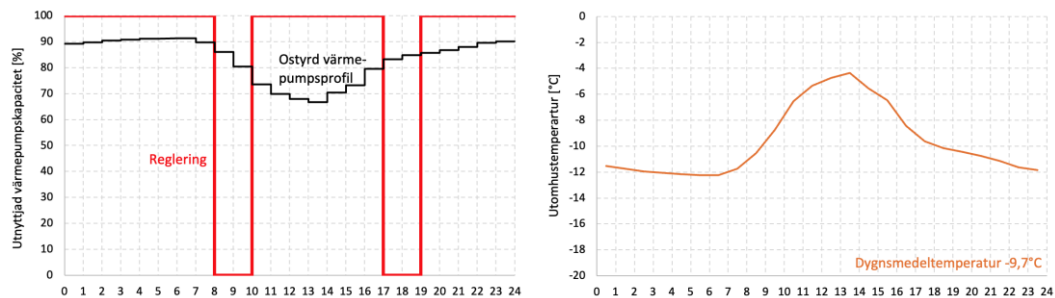


Figur 38 Två exempel där elpriserna är högre under morgonen och sena eftermiddagen. Spotpris från NordPool för elområde SE4 i svart och inkl elskatt och moms i rött.

Den elskatten och momsens som tillkommer på spotpriset till privatpersoner jämnar ut de procentuella skillnaderna mellan timmar med högt och lågt elpris. Det betyder att incitamentet att styra sin elförbrukning minskar något om man jämför dessa priser. Notera att om man bara tittar på skillnaden i kronor är det tvärtom, då är skillnaden ökad med momsens 25 % när elskatt och moms lagts till.

I ett beräkningsmässigt exempel har vi här räknat med att värmepumparna behöver begränsa elförbrukningen så mycket som möjligt under två timmar på morgonen och två timmar under sena eftermiddagen, dvs under totalt fyra timmar. Om värmepumparna helt ska kunna vara stillastående under fyra timmar kan inte värmeförbrukningen i snitt över dygnet vara högre än 83 % av värmepumpens maximala värmeeffekt. Överskrider 83 % kommer inte värmepumpen kunna kompensera under de andra 20 timmarna, alltså för de stoppade timmarna (20h med 100 % = 24h med 83 %). Värmebalansen upprätthålls helt enkelt inte i så fall. I verkligheten kommer värmepumpens elpatronen kopplas in då, vilket leder till en cirka tre gånger så hög elförbrukning (antaget ett COP på 3). Därför räknar vi inte

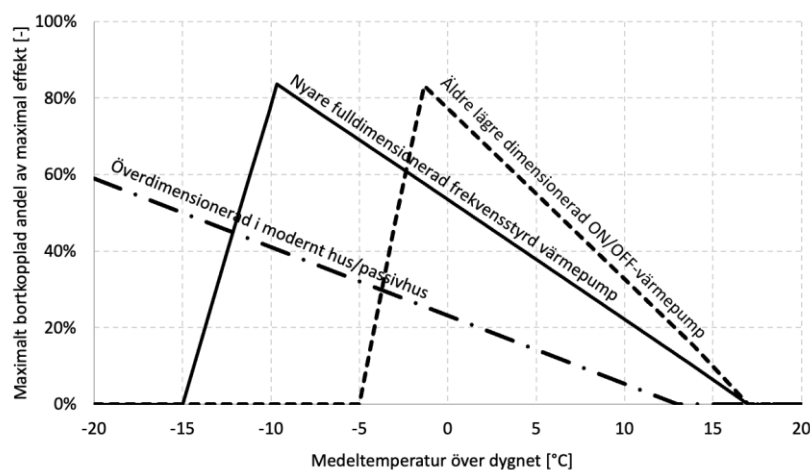
att värmepumpen kan hjälpa till att minska effekten alls när kompressorn går på 100 % av sin kapacitet. Se brytpunktstemperaturen för den fulldimensionerade värmepumpen i Figur 39 nedan.



Figur 39 Maximala nedstyrbara effekter hos den fulldimensionerade värmepumpen (vänster) och det simulerade dygnets temperaturprofil (höger)

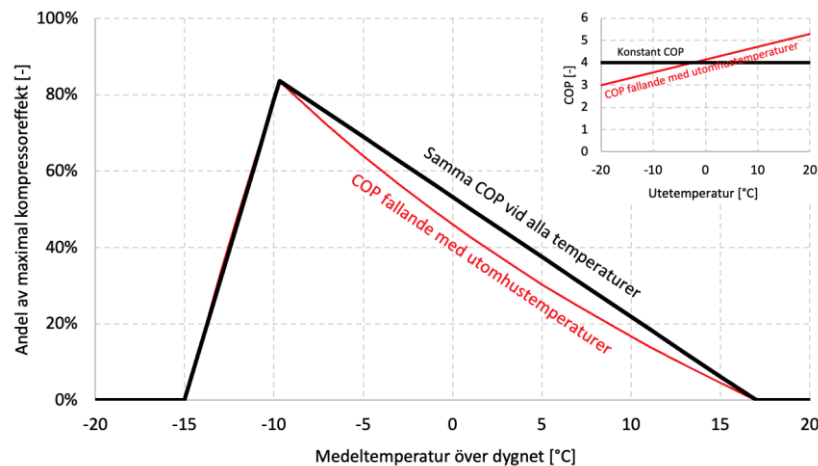
Över den gränsen kommer nämligen all el som undviks under de fyra timmarna ersättas till 100 % med elpatronsdrift (utöver kompressordrift) under de resterande 20 timmarna. Att styra enbart elpatronen har inte undersökts, då moderna värmepumpar oftare fulldimensioneras och elpatronen därför sällan kommer användas, samt att det är svårare att förutsäga i förväg om elpatronen verkligen kommer vara i drift eller inte. En viktig aspekt som saknas i resonemanget här är varmvattendriften, något som kraftigt varierar mellan olika villor och olika dagar. Den kommer trycka ned tillgänglig flexibilitetskapacitet hos värmepumparna mer, men påverkar en värmepump med högre kapacitet mindre än en med låg kapacitet.

I Figur 40 nedan visas de tre värmepumparna i de två olika villorna, där den fulldimensionerade precis klarar husets effektbehov vid -15°C medan den äldre värmepumpen kräver hjälp av värmepumpens inbyggda elpatron redan vid -5°C . Moderna frekvensstyrda värmepumpar finns inte i speciellt många storlekar, så att dimensioneringen hamnar precis på 100 % är inte speciellt troligt, därför ska Figur 40 nedan ses som ett exempel, inget annat.



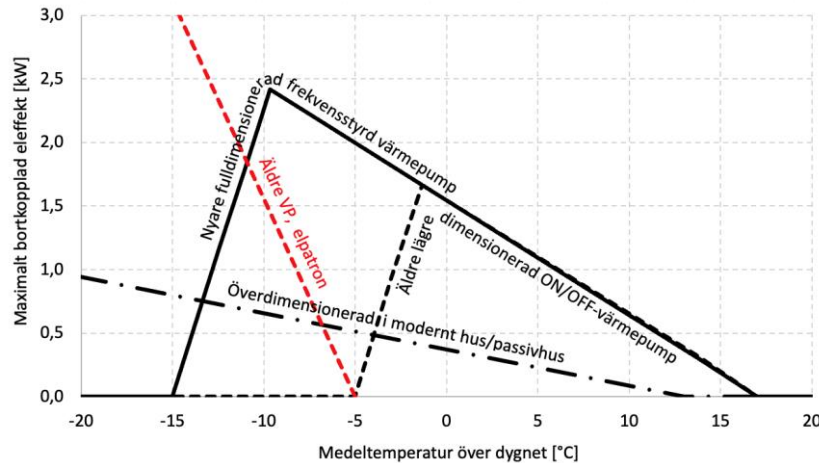
Figur 40 Några exempel på möjlig bortkopplad effekt under fyra timmar per dygn, som funktion av maximal effekt hos värmepumpen (exkl elpatron).

Diagrammen är konstruerade med konstant värmefaktor (COP) över året, vilket är en förenkling. Det påverkar dock bara resultatet marginellt, speciellt som komfortaspekter sannolikt gör att den bitvis brutala nedstängningen av värmepumpen här ändå inte kommer accepteras av de boende. COP är väldigt beroende av värmesystemets (tex om det är radiatorer eller golvvärme) och värmekällans (tex om det är berg eller luft) temperatur, men i Figur 41 nedan visas en typisk bergvärmepump som jobbar mot radiatorer. Skillnaden mot konstant COP är inte speciellt stor.



Figur 41 Skillnad mellan konstant värmefaktor (COP) över året i svart och sjunkande COP med sjunkande utomhustemperatur i rött. COP syns i inklippta diagrammet uppe till höger

Om man räknar om till faktisk eleffekt i kW så ser resultatet annorlunda, men lite tydligare ut, se Figur 42 nedan. Fortfarande gäller förenklingen att COP är konstant över hela uppvärmningssäsongen, vilket vi såg ovan gav liten påverkan på resultatet. I figuren har även elpatronen lagts in på den lägre dimensionerade värmepumpen. Vi räknar här att flexibiliteten går mot noll när kompressorn går dygnet runt och att flexibiliteten börjar på noll när elpatronens flexibilitet börjar användas vid än lägre temperaturer. Anledningen är att värmepumpens kompressor inte ska stoppas, för bästa prestanda, när elpatronen kopplas in. Finns gott om elförsörjning de återstående 20 timmarna på dygnet behöver detta sätt inte vara korrekt, men det är så vi räknat.

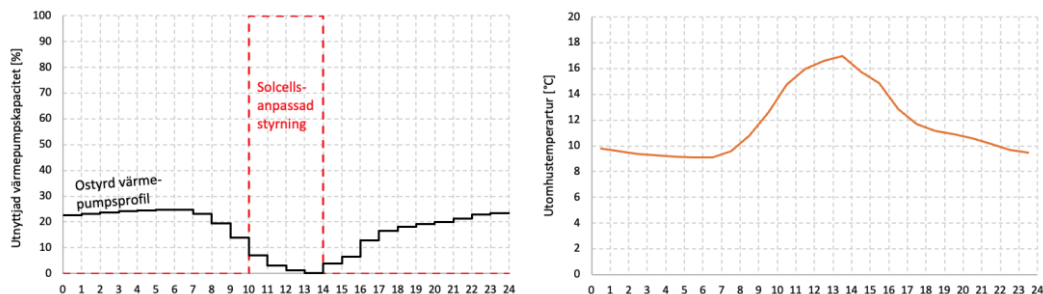


Figur 42 Några exempel på möjlig bortkopplad effekt (i kW) under fyra timmar per dygn i de tre olika värmepumpsalternativen. I rött är nu även möjlig bortkopplad effekt med den äldre värmepumpens elpatronen med.

8.8.2.2 Uppreglering av effekt

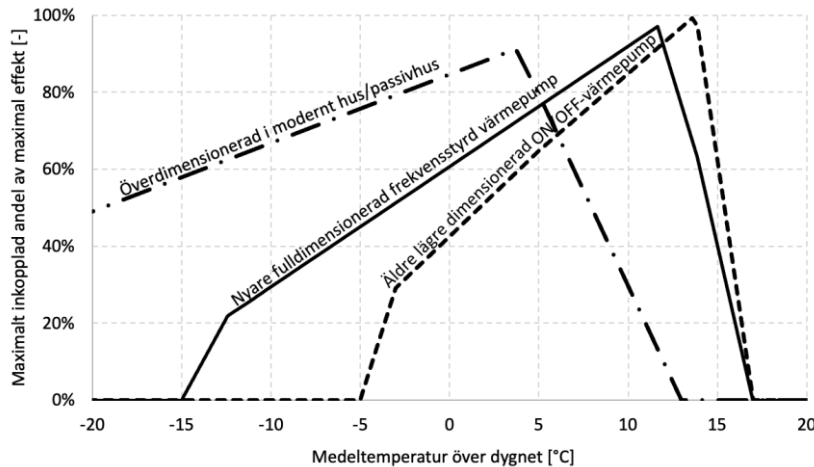
I Figur 16 ovan ser vi att tillverkaren reglerar upp värmepumpen kraftigt runt midnatt. Då går kompressorn sannolikt på eller väldigt nära maximalt varvtal, men varvas ned efter knappt två timmar. Detta sker sannolikt pga två anledningar, dels att värmesystemet inte klarade av att hantera så mycket effekt under längre tid samt dels att elpriset ökade.

Att öka effekten hos värmepumpar för att få lägre elkostnad finns alltså även det praktiskt i verkliga produkter och att direkt stödja elsystemet när produktionen där är för hög kan alltså bli en möjlighet i framtiden. På liknade sätt som i kapitel 8.8.2.1 ovan har kapaciteten för tre olika värmepumpslösningar beräknats. Förutsättningen var att värmepumpen skulle ge så hög effekt som möjligt under fyra timmar per dygn, företrädesvis mitt på dagen, för att simulera överskott från solceller, men även överskott på vindkraft kan ju vara högst relevant att hantera. I Figur 43 nedan visas brytpunkten då värmepumpen teoretiskt kan producera all dygnets värme under de fyra soliga timmarna. Självklart kommer detta ge låg komfort, med låg temperatur på morgonen innan värmen slås på och hög temperatur efter kompressorn varmt klart, men det tar vi ingen hänsyn till i denna teoretiska studie.



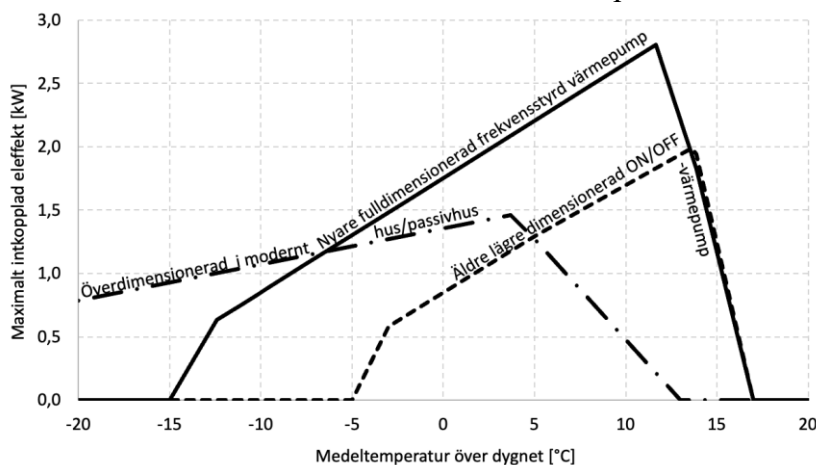
Figur 43 Maximala uppstyrbar effekt hos den fulldimensionerade värmepumpen (vänster) och det simulerade dygnets temperaturprofil (höger)

I Figur 44 nedan visas den procentuella maximalt inkopplade effekten i de tre olika kombinationerna av värmepump och hus. Att den är över 90 % i alla fallen beror på att vi räknat med lägre verkligt värmebehov mitt på dagen, pga högre utomhustemperatur då, vilket syns tydligt i Figur 43 ovan.



Figur 44 Några exempel på möjlig inkopplad effekt under fyra timmar per dygn, som funktion av maximal eleffekt hos värmepumpen (exkl elpatron). Notera att den enkla modellen inte fungerar bra när värmepumpen behöver gå dygnet runt, därför knäcker kurvan nedåt där.

Räknar vi om Figur 44 ovan till eleffekt så får vi utseendet i Figur 45 nedan, där möjlig effekt alltså minskar med minskande utomhustemperatur.



Figur 45 Några exempel på möjlig inkopplad effekt under fyra timmar per dygn. Notera att den enkla modellen inte fungerar bra när värmepumpen behöver gå dygnet runt, därför knäcker kurvan nedåt där.

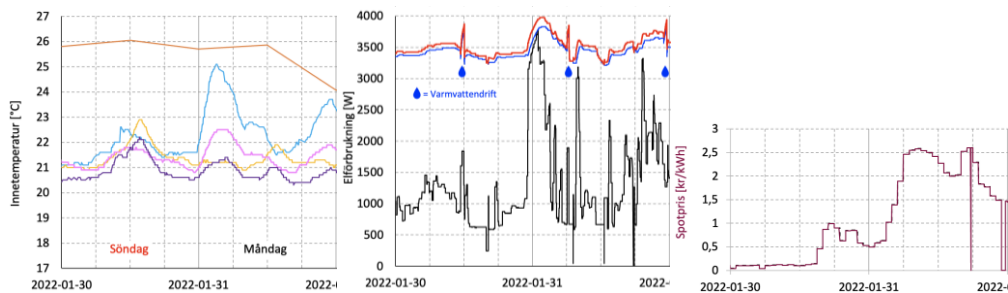
Som ses i Figur 45 ovan så är det en fördel att ha hög installerad kompressoreffekt att jobba med och ett värmebehov även vid varmare väder. Om vi lyckas energirenova (i betydelsen förbättra klimatskalet) kommer alltså potentialen här att minska. Potentialen att ta hand om överskottsenergi riktigt kalla dygn, som moderna hus klarar av, är nog helt ointressant. Särskilt om det är stiltje med låg vindkraftsproduktion samtidigt som produktionen av solen är låg då detta oftast

inträffar runt midvintern. Men för de tillfällen då vi ser riktigt låga temperaturer under t.ex. mars och april är det en annan situation, eller att det är kraftiga vindar tillsammans med kyla, då finns det anledning att försöka hantera även detta med värmepumpar.

8.8.2.3 Uppskattning av potential hos alla Sveriges värmepumpar

Att försöka göra en modell över alla Sveriges styrbara villavärmepumpar låter sig inte enkelt göras, då de hamnar i olika klimat, i villor med olika värmebehov, i familjer med olika behov av komfort och med olika ekonomi. RISE har tidigare uppskattat antalet uppkopplingsbara värmepumpar i vattenburna system (alltså luftluftvärmepumpar exkluderade) till knappt 300.000 [14], något som vid årsskiftet 2023/24 borde ha växt till ca 340.000 baserat på statistik från SKVP [25]. Antar man att alla dessa värmepumpar är uppkopplade över internet och kan styras effektivt, så motsvarar detta ändå väl under 1 GW effekt om de styrs synkroniserat på det sätt som visats i kapitel 8.8.2.1 och 8.8.2.2 ovan. Man kan nog utgå ifrån att minst den tredjedel som först nådde marknaden av dessa uppkopplingsbara värmepumpar faktiskt inte är uppkopplade, då de första krävde ethernetkabel indragen till värmepumpen för att få funktionen. De senare värmepumparna är svårt att uppskatta, men vi vet att intresset varit högt att få till elprisstyrning efter de senaste årens extremt höga elpriser, något som såklart kräver att värmepumpen kopplas upp på internet. Kombinerar vi den drivkraften med att teknisk utrustning numer allt oftare kräver uppkoppling, vilket gör att motståndet bland folk sannolikt är lägre att koppla upp sina värmepumpar, så kan man nog utgå ifrån att en stor del av senaste årens värmepumpar faktiskt är uppkopplade nu. Med detta resonemang så är sannolikt den högsta möjliga flexibilitet grovt räknat några hundra MW nu, dvs om alla uppkopplade värmepumpar används till flexibilitet.

Om vi tittar på hur tillverkares befintliga elprisstyrningar fungerar i praktiken under detta projekt, tex i Figur 16 ovan (se urklipp i Figur 46 nedan), så ser vi att reglerstrategin hos den tillverkaren inte är i närheten av det vi skissat på här, dvs den verkligt nedreglerade effekten kommer bli väsentligt lägre än resonemanget vi fört här. Värmepumpen hade enkelt kunnat stoppas under de väldigt höga elpriserna under t.ex. förmiddagen den 31 januari 2022, men trots det använde värmepumpen nästan 1 kW el. Tillverkare B har dock lämnat slutliga beslutet till värmepumpsägaren, då ägaren väljer hur brutalt den vill att värmepumpen ska reagera på elpriset. Hur ägaren av BFF04 tänkt vet vi inte, inte heller hur elprisstyrningen är inställd, då det inte ingick i frågorna vi ställde. Notera att värmepumpen reglerar upp effekten ordentligt under ca två timmar, vilket leder till kraftig övertemperatur i ett av rummen, vilket är i linje med vår uppregeringsstrategi här.

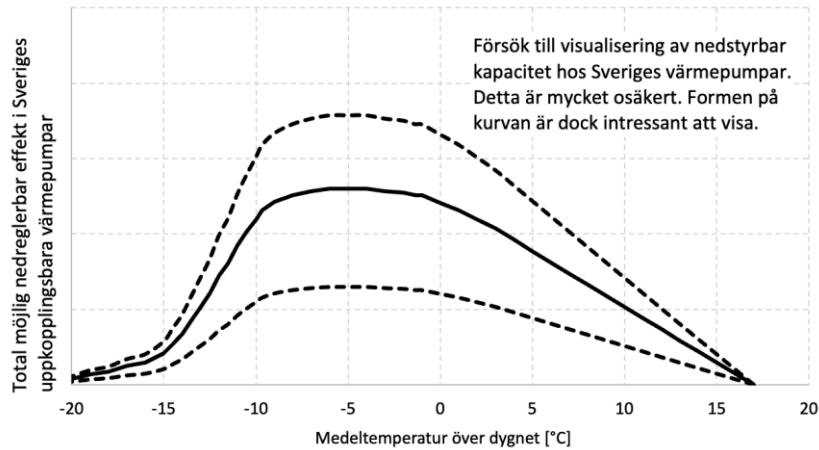


Figur 46 Reglering efter elprisstyrning i BFF04, urklipp från Figur 15, Figur 16 och Figur 17.

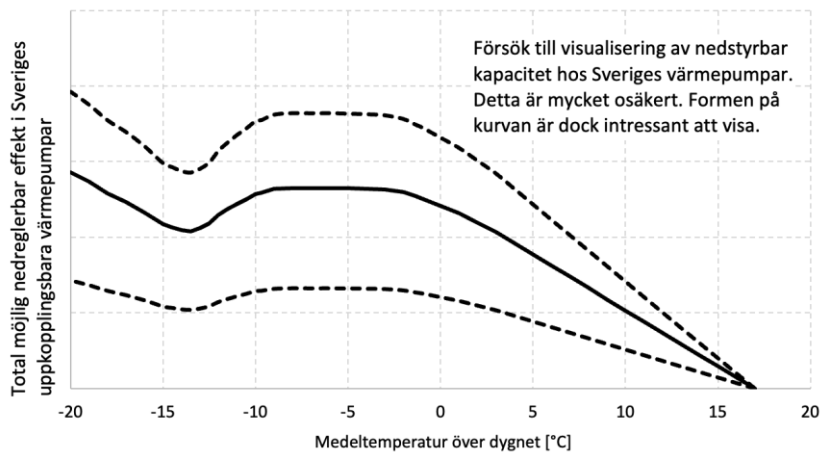
Som vi sett under våra testkörningar, men framför allt i intervjuerna har hushållen i detta projekt väldigt hög tålighet mot låga temperaturer. Något som kan ha påverkat detta är de extremt höga elpriserna under testperioden och att regeringen faktiskt manade till ransonering av el under hösten 2022. Men en annan anledning är att fyra av de sex huvudundersökta hushållen har tillgång till eldstad, där man enkelt och snabbt kan höja temperaturen i bostaden, utan värmepumpens hjälp. Man kan tom tänka sig att det ger en positiv återkoppling att det är kallt när man kommer hem, då ”får man ju elda”.

Potentialen i Sveriges uppkopplingsbara värmepumpar är alltså mycket svår att uppskatta, men från Figur 40 och Figur 45 kan vi dra slutsatserna att flexibiliteten är mycket låg både vid höga och låga utomhustemperaturer, samt att puckeln är relativt längre vid nedreglering av effekten, medan den är smalare och högre vid uppreglering av densamma. Detta betyder att värmepumpar sannolikt inte kan hjälpa till mycket för att hantera effektbrist vid sträng kyla, åtminstone inte utan att putta över energimängd till elpatronsdrift under andra timmar, något som alltså ökar elförbrukningen över dygnet. Värmepumpar som är lågt dimensionerade kommer vid låga temperaturer redan gå på elpatron, där finns såklart en potential att dra ned just den effekten, men fortsätta att köra kompressorn då, för att inte hamna i alldeles för stor obalans. Idag dimensioneras frekvensstyrda bergvärmepumpar till drygt 100% (lätt överdimensionerad), medan ON/OFF-bergvärmepumpar dimensioneras till ca 70% [11], dvs till ca -5°C i södra Sverige, under det krävs att elpatronen kopplas in. Luftvärmepumpar varierar mer, men i medel dimensioneras de till ca 50% [11], vilket med fallande effekt pga lägre temperatur på värmekällan borde innebära ungefär samma temperatur, ca -5°C , då elpatronen behöver hjälpa till.

I Figur 47 och Figur 49 nedan visas en grov visualisering på hur mycket Sveriges värmepumpar kan styras ned i effekt som funktion av medeltemperaturen över dygnet, där den ska tolkas som medeltemperaturen vägt på värmepumpstäthet i Sverige, dvs med stor övervikt på södra Sverige. Skalan på y-axeln är medvetet borttagen, då osäkerheterna här är alldeles för stora för att publiceras med någon form av vetenskaplig rimlighet. Det som är intressant är formen på kurvan, dvs hur stor relativ kapacitet som uppskattas finnas vid olika temperaturer. Figur 47 visar potentialen utan elpatronen och Figur 49 med elpatronen. Att styra värmepumpen när den är nära maxgränsen för vad enbart kompressorn klarar av är svårt. Risker är stor att värmepumpen förbrukar mer el över dygnet, något som i dessa situationer behöver beaktas.



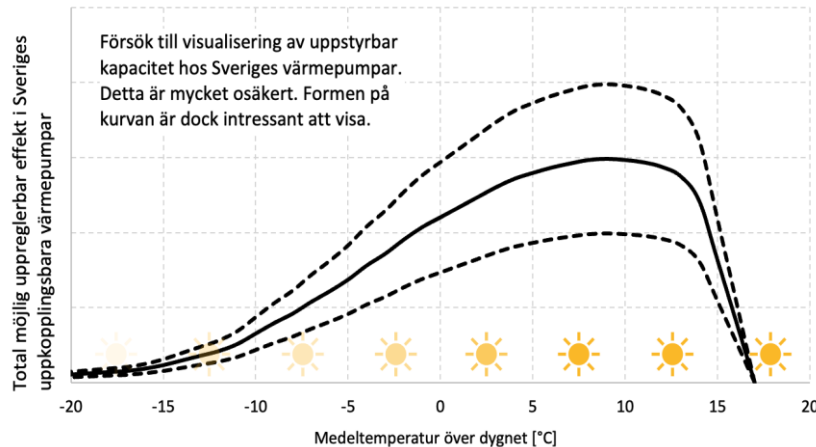
Figur 47 Grov visualisering av potentialen för nedstyrning av eleffekten hos Sveriges värmepumpar, potential hos värmepumparnas elpatron exkluderad.



Figur 48 Grov visualisering av potentialen för nedstyrning av eleffekten hos Sveriges värmepumpar, potential hos värmepumparnas elpatron inkluderad.

Om tiden värmepumpen levererar flexibilitet per dygn minskas kommer kurva tryckas över något åt det kallare hållet, dvs kapaciteten vid lägre temperaturer ökas, men faller ännu fortare när fler och fler värmepumpar når sin maximala kapacitet. Då måste de arbeta på full effekt dygnet runt och flexibilitetspotentialen försvinner helt. Höjden (puckeln) på resterande delen av kurvan påverkas dock inte av detta.

På likande sätt har en grov visualisering gjorts på hur mycket Sveriges värmepumpar kan styras upp i effekt som funktion av medeltemperaturen över dygnet. Skalan på y-axeln är här också medvetet borttagen, av samma anledning. Det som är intressant är formen på kurvan, dvs hur stor relativ kapacitet som uppskattas finnas vid olika temperaturer. För att hantera överskott på förnybar elproduktion kan värmepumpar definitivt spela en roll och med den profil som visas passar värmepumparnas effektprofil väl med överproduktion från solceller under uppvärmningssäsongen, se Figur 49 nedan.



Figur 49 Grov visualisering av potentialen för uppstyrning av eleffekten hos Sveriges värmepumpar, potential hos värmepumparnas elpatron exkluderad. Solarna symboliserar rimlig förväntning på elproduktion från solkraften.

Effekten som värmepumparna kan hantera är sannolikt, baserat på studien ovan, något högre än vid nedreglering av effekten, men högst troligt väl under 1 GW ändå. Sverige hade vid årsskiftet 2023/24 ca 4 GW installerad effekt i solceller, så än så länge kan värmepumpar teoretiskt ta en inte försumbar del av den producerad solenergin om de fokuseras till att följa solcellsproduktionen dagar med överproduktion. Noteras bör att många villor påverkas av solinstrålning, så det som teoretiskt fungerar, med en enkel modell, kan i praktiken ge kraftig övertemperatur inomhus på eftermiddagen, med stor risk för låga temperaturer på morgonen. Det finns alltså risk att komforten försämras, något som kommer begränsa möjligheterna, vilket nämnt tidigare.

Vid ökad konsumtion hos värmepumparna är det enklare att koppla in värmepumpens elpatron, då det inte finns någon energiskuld att betala tillbaka under andra timmar under dygnet. Därför kan man tänka sig att använda elpatronerna och därmed flerdubbla den energimängd värmepumparna kan absorbera vid produktionsöverskott i elsystemet. Projektet har dock inte kännedom om någon värmepumpsstyrning som gör detta. Dessutom gör ju detta att elförbrukningen ökar kraftig, så elpriset måste vara mycket lågt för att detta ska vara aktuellt. Sommaren 2023 hade vi, trots bitvis dåligt väder, negativa elpriser på spotmarknaden under totalt tio dygn (minst en timme per dygn). Med ökande mängd solceller kommer vi med hög sannolikhet få se fler och fler timmar med negativa elpriser, något som alltså ökar på sannolikheten att värmepumpar kommer styras efter solcellers produktion.

Under sommaren, när värmepumpar inte producerar värme, så finns dock mindre möjlighet att styra bort överskott i elsystemet med dem. Då finns enbart varmvatten att "dumpa" värme i, men varmvatten är mycket mindre förutsägbart än värme, så att hantera det effektivt, dvs utan komfortproblem, är väsentligt svårare. Förutom att mängden energi som krävs för att värma varmvatten är låg, så begränsar maximalt tillåtna varmvattentemperatur hur mycket som kan produceras. Det går komma runt det senare, men det kräver installation av fysisk

temperaturbegränsningsventil, något som nästan alltid saknas i värmepumpsinstallationer.

På liknande sätt som vid nedreglering av värmepumparna så kommer kapaciteten öka vid varmt väder om värmepumparna regleras upp kortare tid. Höjden på puckeln påverkas inte här heller, utan det är bara kurvan som förskjuts något mot högre temperaturer.

Projektet har inte tittat på potentialen hos luftluftvärmepumpar att gå över i kylläge när elpriserna är låga pga att elproduktionen från tex solkraften är hög på sommaren. Det kan vara intressant att titta på och kan antagligen hjälpa elsystemet.

En intressant studie har gjorts av Lukas Lindroos och Martin Sällström, som examensarbete på KTH [15]. Där tittar man på hur mycket flexibilitet en större population kan ha och extrapolerar sedan till alla Sveriges värmepumpar. I beräkningen låter man husen falla i temperatur (0,2-0,6°C) när värmepumparna är sekventiellt avstängda, för att sedan låta värmepumparna arbeta tillbaka förlusten. Fokus är alltså tillräcklig termisk komfort före maximal flexibilitet. De skriver själva:

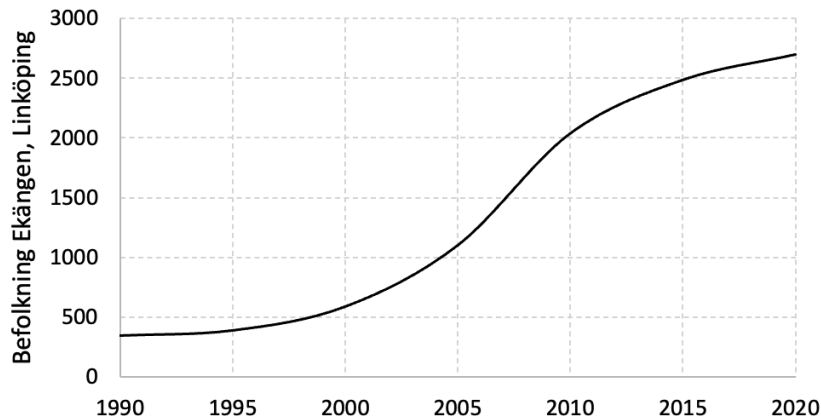
”Däremot bör modellens resultat inte användas som exakta siffervärden på potentialen för efterfrågefleksibilitet utan mer som en fingervisning inom vilka storleksordningar potentialen kan tänkas vara.”

Deras beräkning visar en potential för alla landets 1,2 miljoner värmepumpar på 0,3-0,9 GW, där värmepumparna som kollektiv är avstängda i fyra timmar per dygn, men enskilda värmepumpar betydligt kortare tid. Detta är samma storleksordning som här, men vi har bara räknat med 340.000 värmepumpar. Lindroos och Sällström har använt beräkningsprogram utvecklade av NIBE.

8.8.3 Stödjande av lokalt elsystem

Projektet har undersökt det före detta sommarstugeområdet i Ekängen nordost om Linköpings tätort, som nu består av nästan enbart permanentboenden. Vi har tittat på potentialen i att lokalt styra värmepumpar efter konsumtionstoppar vid tex elbilsladdning och lokal överproduktion i tex solceller, eller på andra sätt dra nytta av den flexibilitet som potentiellt finns i värmepumpar.

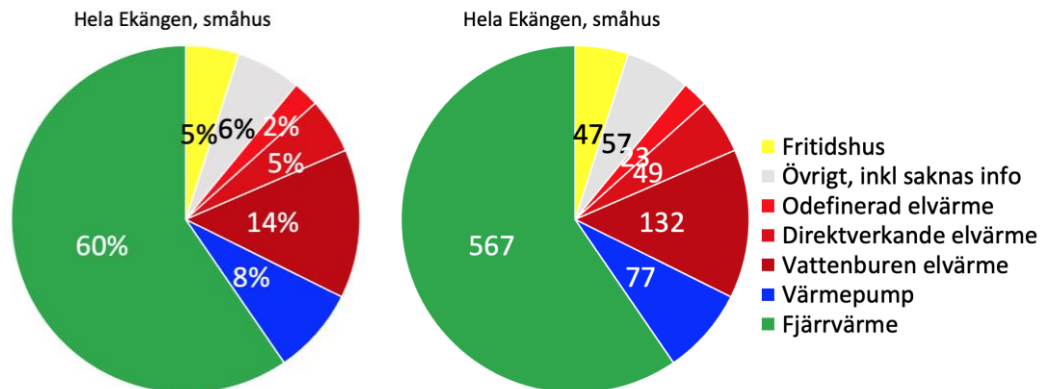
Ekängen klassificerade som tätort först år 1995 och har haft en kraftig befolkningstillväxt efter 2000, framför allt efter 2005, se Figur 50.



Figur 50 Befolkningsutveckling i Ekängen, Linköping

Data för elnätet i området har lämnats av projektparten Tekniska Verken i Linköping AB (TVAB) [12] som varit behjälplig med tolkande av underlaget, samt bollplank i undersökningen av potentialen. TVAB klassificering av de olika småhushållen, har också varit till stor hjälp. Sammanställningen syns i Figur 53 nedan.

Det är tydligt att Linköpings kommun med TVAB som utförare har haft en plan att rulla ut fjärrvärme i området, många andra nätstationer har väsentligt högre andel fjärrvärme än snittet, där några nyare områdens nätstationer har 100% eller väldigt nära 100% fjärrvärme. Enligt TVAB klassificering ser totala populationen av småhus i Ekängen ut enligt Figur 51.

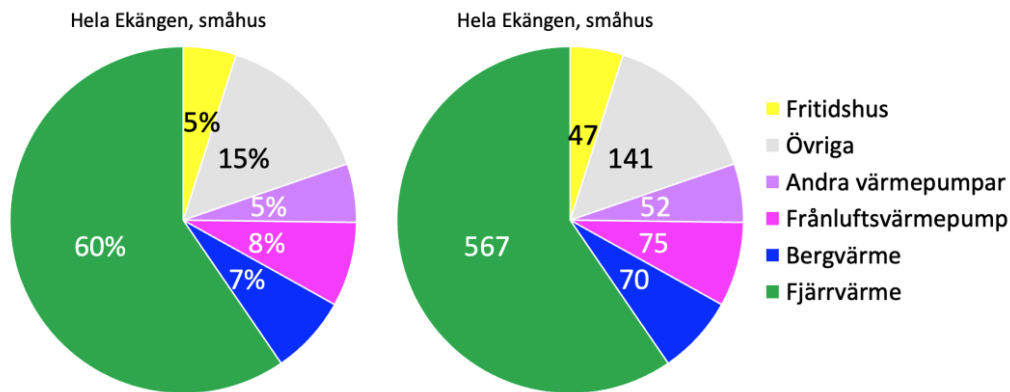


Figur 51 Fördelning av småhus i Ekängen efter uppvärmningskälla, till vänster i procent och till höger i faktiska antal, enligt TVAB kategorisering.

Datat tyder på att få hus har värmepump, men vid detaljanalys av hushållen under nätstationerna N och M såg vi att många som är klassificerade som elvärme i själva verket har värmepump, tex verkar kategorin ”Vattenburen elvärme” vara ett annat sätt skriva frånluftsvärmepump på. Även de andra två kategorier elvärme (direktverkande elvärme och det som av författarna har slagits ihop i odefinierad elvärme) innehåller värmepumpar. Kategoriseringen är inte 100 % korrekt, vid undersökningen fann vi hus med låg elförbrukning som ändå var kategoriserad som vattenburen elvärme, som alltså sannolikt var fjärrvärmewärmt i verkligheten. Vi hittade även i SGUs brunnhålsdatabas att det fanns bergvärme installerad i hus med

direktverkande el, något som kräver byte av hela uppvärmningssystemet och alltså innebär omfattande arbete i huset för att få till.

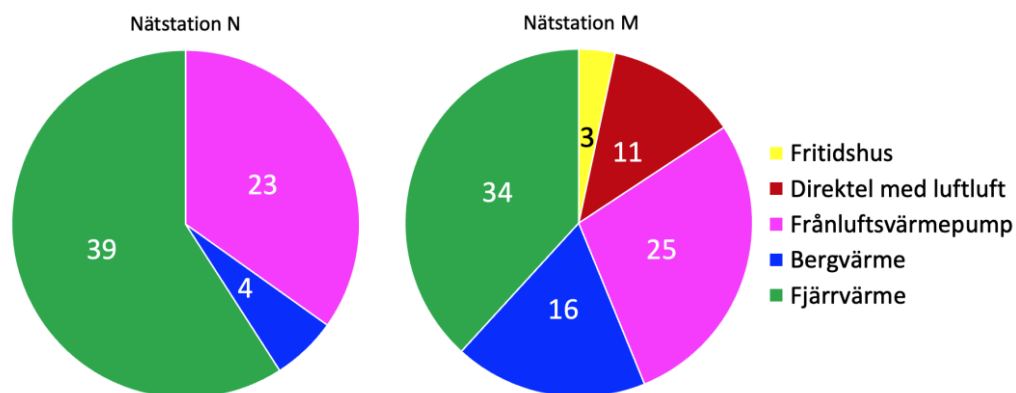
Analys gjordes där alla hus med vattenburen elvärme uppförda efter 1995 kategoriserades om som frånluftsvärmepump, alla med borrarad energiklassad brunn som bergvärme och alla andra som redan klassificerats av TVAB som värmepump fick en egen kategori; andra värmepumpar (om de inte hade borrarad energibrunn, då de klassificerades som bergvärme). När detta gjorts fanns fortfarande 141 småhus kvar med okategoriserat värmesystem, där det sannolikt gömmer sig många luftluftvärmepumpar, samt 47 fritidshus, se Figur 52.



Figur 52 Fördelning av småhus i Ekängen efter uppvärmningskälla, till vänster i procent och till höger i faktiska antal, enligt författarnas kategorisering.

8.8.3.1 Detaljanalys av nätstationerna N och M

Projektet valde att detaljstudera nätstationerna N och M där N har en majoritet fjärrvärme, medan M har majoritet värmepumpar. För att hitta bergvärmepumpar har SGU borrhålsdatabas använts, medan frånluftsvärmepumpar bestämts med uteslutning (inget borrhål) samt åldern på huset. Här har Google maps streetview varit till stor nytta, den har också hjälpt att fastställa hus med luftluftvärmepumpar. Nätstation N har totalt 66 småhus. 39 av dem (59 %) har alltså fjärrvärme, medan 23 har frånluftsvärmepump (35 %) och fyra har bergvärme (6 %), se Figur 53 (vänster).



Figur 53 Fördelning av uppvärmningskällor under de två nätstationerna N och M i Ekängen, Linköping.

I Figur 53 (höger) ser vi också att nätstationen M har fler hushåll, 89 totalt. Där är 34 av dem värmda med fjärrvärme (38 %), 16 med bergvärme (18 %), 25 med frånluftsvärmepump (28 %) och elva med direktverkande elvärme och luftluftvärmepump (12 %). Under nätstationen finns även tre fritidshus (3 %). Under den nätstationen fanns i mars 2023 13 solcellsanläggningar med en installerad effekt på hela 203 kW, medan det under nätstation N inte fanns någon solcellsanläggning alls.

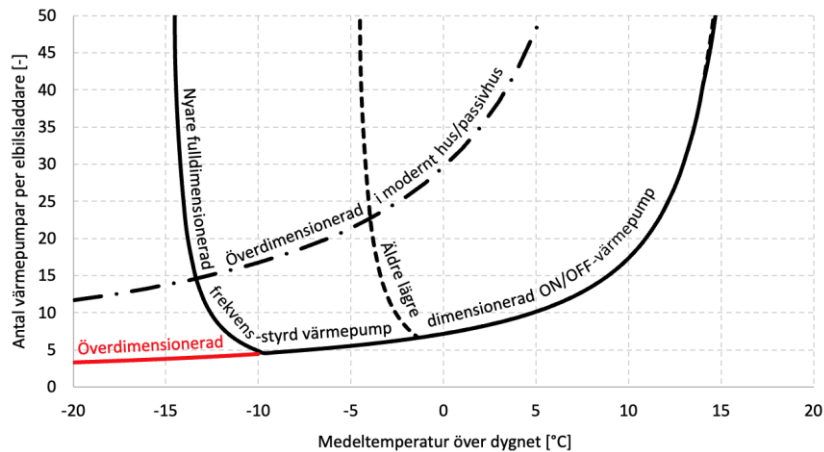
Som diskuterats i kapitel 8.4 på sidan 31 så har frånluftsvärmepumpar låg flexibilitet, sannolikt så låg att risken är övervägande att värmepumpen måste starta den inbyggda elpatronen om värmepumpens kompressor stängs av mer än kortare tid under vintern. På liknande sätt kommer nedreglerade luftluftvärmepumpar riskera att den direktverkande elvärmens, som nästan alltid finns i de husen som komplement, går in och värmer i stället. Direktverkande elvärme styrs oftast autonomt per radiator, dvs helt utan koppling till värmepumpen, den startar så fort termostaten (oftast mekanisk i äldre system) känner tillräckligt låg temperatur. Elvärmens drar alltid väsentligt mer el än värmepumpar, vilket såklart är anledningen till att värmepumpen köpts in till att börja med.

Därför anses inte frånluftsvärmepumpar och luftluftvärmepumpar i denna studie användbara för flexibilitet idag, alltså när det nationella elsystemet riskerar att ha bristsituation. Detta kan ändras med t.ex. mer elbilar i samhället, eller högre allmän förbrukning i elsystemet. I ett lokalt elsystem kan överbelastning inträffa vid andra situationer än i nationella elsystemet, tex är nätstationer med många elbilar, där användarna har liknande kör- och därmed laddmönster särskilt känsliga.

Ingen kunskap finns kring mängden elbilar i Ekängen. TVAB har inte heller någon kunskap om dem, då ingen anmälan behöver göras till elbolaget, förutom om det krävs högre säkring efter installationen av laddboxen. Inte ens då är det säkert att informationen kommer fram, då det inte verkar finnas krav på att tala om anledningen till höjd huvudsäkring.

I Sverige fanns vid årskiftet 2023/24 ca 570.000 laddbara elbilar, varav 295.000 är rena elbilar. Enligt Power Circle motsvarar de laddbara bilarna 11 % av Sveriges personbilsflotta. Det finns ingen anledning att tro att ett relativt välbärgat område utanför Linköping skiljer sig markant ifrån snittet över Sverige, vilket betyder att det borde finnas grovt elva laddbara bilar under nätstation N, varav sex rena elbilar. Detta gäller under förutsättning att det finns i snitt 1,5 bil per hushåll, vilket borde vara rimligt en bit från Linköpings tätort. Kontroll via satellitbild på Hitta.se bekräftar att detta är ett rimligt antagande. Nätstation M har 89 småhus, där borde det på samma sätt finnas 15 laddbara bilar, varav åtta rena elbilar.

Från Figur 42 på sidan 40 kan vi räkna ut hur många värmepumpar som krävs för att hantera hela effekten från en elbilsladdare på 11 kW som funktion av utomhustemperaturen, se Figur 54 ovan.



Figur 54 Antal värmepumpar som krävs för att kompensera för en elbilsaddare som laddar med 11 kW (16 A)

Figur 54 visar alltså de tre olika kombinationerna värmepump/hus som användes i kapitel 8.8.2, där två av dem var placerade i ett äldre hus. Det representerar den nedre kurvan, som här avslutas i rött med extrapolering för överdimensionerad värmepump. De fyra småhusen som har bergvärme under nätstation N är alla ca 20 år gamla, dvs byggda innan höga energikrav infördes i BBR. Man kan nog anta att de fyra ligger relativt nära den lägre kurvan i Figur 54. När det är kallt klarar de tillsammans att dra ned effekten motsvarande en elbilsaddare, förutsatt att de har tillräckligt hög dimensionering så att elpatronen inte riskerar kopplas in i stället. Gör den det så blir prestanda sämre och elförbrukningen högre över dygnet, något som antagligen, men inte självklart, är negativt för elsystemet, men definitivt är mer kostsamt för det hushållet.

De 23 luftvattenvärmepumparna finns alla i lika gamla hus, byggda 2002-04, så flertalet är nog redan bytta pga ålder. Är de bytta mot moderna frekvensstyrda frånluftsvärmepumpar har de kapacitet att regleras ned vid mildare väder, men annars kan man utgå ifrån att de inte kan hjälpa till vid ansträngningar i lokala elsystemet pga elbilsaddning. ON/OFF-frånluftsvärmepumpar har dessutom väldigt låg kompressoreffekt, väl under 1 kW verkar vara en normal dimensionering, även på de som fortfarande säljs idag på ersättningsmarknaden.

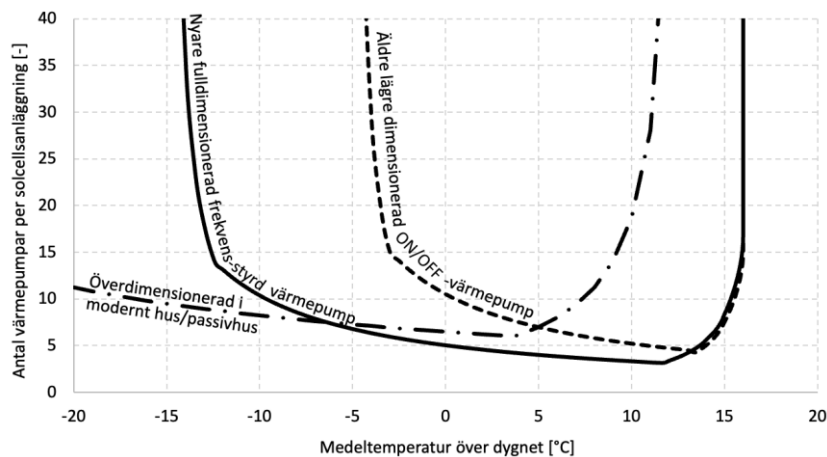
Analysen över nätstation N visar nyttan värmepumpar teoretiskt kan göra när elbilar laddar. Det krävs alltså flera värmepumpar per elbil, tex tio värmepumpar vid +5°C ute och då om vi räknar med maximal kapacitet, utan titta på komfortaspekter och vad som är långsiktigt acceptabelt för husägarna. En utbyggnad av kapaciteten i lokala elnätet, där det är begränsningar, är sannolikt den lösning som kommer göra störst nytta när elbilar blir vanligare och vanligare, samt tydliga ekonomiska incitament att sprida laddningen över de timmar i veckan då det finns överkapacitet i elnätet. Värmepumparnas bidrag kanske inte ska underskattas, de kan trots allt hjälpa till, även om laddeffekten är väsentligt högre.

TVAB har tagit fram ett förslag på effekttariff (lagkrav från 1/1-2027) som syftar till att styra emot t.ex. lägre laddeffekt. Med deras ännu inte lanserade effekttariff kommer kostnaden minska med i maximalt 2100 kr/år om elbilsägaren alltid laddar

med låg effekten (4 kW/6 A) i stället för laddboxarnas fabriksinställda och högsta effekt (11 kW/16A). Sannolikt kommer besparingen vara lägre, då den lägre laddningen inte kommer bestämma högsta använda effekten varje månad, vilket den högre gör. Under låglasttimmarna mellan kl 20 och 06 hinner elbilsladdaren ladda upp ett tomt batteri med 11 kW effekt, vilket inte går med 4 kW. Med 4 kW hinner man ladda 40 kWh, dvs från 30 % till 80 % i en bil med 80 kWh batteri, vilket kan skapa problem för en del elbilsägare, men de flesta elbilsägare kommer sannolikt ha små problem med det.

Nätstation M har fyra gånger så många bergvärmepumpar och frånluftsvärmepumparna sitter nästan uteslutande i hus byggda precis runt millennieskiftet, dvs då man hade mycket lågt dimensionerade ON/OFF-frånluftsvärmepumpar. Nätstation M skiljer sig alltså inte nämnvärt ifrån N. Skillnaden är att vid rätt temperatur kan de 16 värmepumparna teoretiskt minska effektförbrukningen lika mycket som fyra elbilar som laddas med 11 kW, eller två om de är lägre dimensionerade värmepumpar och då bara vid högre utomhustemperaturer, se Figur 54 ovan. Vi uppskattar att det redan nu finns 15 laddbara bilar, varav 8 rena elbilar, så än så länge kommer kraftig nedstyrning av värmepumparna under denna nätstation göra nytta. Om elektrifieringen av fordonsflottan fortsätter i samma takt som hittills är den potentialen snart överspelad.

För att se hur el från solceller kan förbrukas lokalt av värmepumpar vid överskottsproduktion togs Figur 55 nedan fram. Den är framtagen ifrån Figur 45 på sidan 41 och utgångspunkten är att en solcellsanläggning har 11 kW installerad effekt (men producerar i snitt bara 80 % av det de bästa timmarna, pga optimal vinkel mot solen i snitt på beståndet).



Figur 55 Antal värmepumpar som krävs för att kompensera för elproduktionen från en solcellsanläggning runt lunch i Linköping (medel 11 kW, räknat med 80 % verklig leverans)

Som vid elbilsladdning krävs det flertalet värmepumpar för att hantera överproduktion från bara en solcellsanläggning av medelstorlek i Linköping (11 kW enligt TVAB). Som nämnts ovan fanns det i mars 2023 203 kW total solcellseffekt installerad enbart under nätstation M. Installerad effekt i solceller

växte fortfarande exponentiellt på Linköpings kommunnivå 2023 enligt data från TVAB, så mängden solceller i Ekängen har nog inte nått taket än.

Ett problem vid solsken är att hus med södervända fönster lätt får övertemperatur bara av solskenet, möjligheterna att då ytterligare värma huset för att hantera överproduktion blir mycket begränsade och kommer troligen vara svårt att få acceptans för, men det kan även bli svårt att göra rent styrmässigt. När värmebehovet försvinner till sommaren minskar möjligheterna kraftigt, med enbart varmvatten att hantera. En normal varmvattenberedare på 200 l innehåller inga större energimängder och har alltså kort uthållighet. Är personerna i huset bortresta är ju energibehovet noll på sommaren.

8.8.4 Uppskattning av nytta till nätägare

Diskussioner har förts med TVAB [12] om den ekonomiska nyttan av att kunna styra ned effekten från värmepumpar. Kontentan är att ekonomiska nyttan är så låg att det saknas intresse hos TVAB. Dessutom minskar nyttan pga mindre fördelaktig prisstruktur mot överliggande elnät (i detta fall Vattenfall) de senaste åren. TVAB har stor egen elproduktion, ca 35-40% av totala elförbrukningen i deras nät produceras i deras egna anläggningar, vilket kan påverka resultatet.

8.8.5 Affärsupplägg

Inget affärsupplägg för flexibilitet från värmepumpar har kunnat tas fram, eftersom den ekonomiska nyttan är för låg.

9 Diskussion

I projektet har vi sett att vi kan utföra avstängning och forcera fram ökad elförbrukning i värmepumparna över de API som redan finns tillgängliga via tillverkarna. Det som krävs är att värmepumpen är uppkopplad mot internet, att identiteten är känd och att ägaren godkänt tillgången till API:t, utöver programmering av regleralgoritmer. Regleringen kan göras när som helst och vi har sett i tidigare projekt [1] att vi kan hålla värmepumparna avstängda så länge vi vill. Att hålla värmepumparna i gång eller låta dem gå hårdare kontinuerligt är svårare, speciellt när det är varmare ute.

Vi har visat att värmepumpar kan stödja Sveriges elsystem även om potentialen ännu inte är så hög och potentialen minskar tydligt vid höga, men även vid låga, utomhustemperaturer. Potentialen kan även minska om det ställs tydliga komfortkrav av värmepumpsägarna, men i flera av de villorna som var med i vårt projekt varierade temperaturen inomhus kraftigt även utan vår reglering. Det finns alltså tydlig potential att variera inomhustemperaturen (inom rimliga gränser) utan att villaägarna tycker att komforten blivit för låg. Detta kan användas för en flexibel styrning av ellasten kopplad till uppvärmning av Sveriges villor, möjligen i kombination med tjänster för bättre temperatur-styrning.

En tidigare RISE-studie visar att leverans av stödtjänster till Svenska kraftnät är svårt att få till pga flertalet hinder i värmepumparna, elmarknaden och kommunikationen [1]. Flera tillverkare har elprisstyrning på uppkopplade värmepumpar, något vi såg tydligt i en av testets värmepumpar. I och med

energikrisen vintern 2022/23 har denna form av styrning blivit vanlig och detta bidrar till flexibiliteten i elsystemet, även om den ännu inte är så stor och den inte fyller riktigt det behov elsystemet behöver, tex förutsägbarhet och flexibilitetsåterkoppling till elnätsägaren. Vi såg även att den elprisstyrning som användes var, åtminstone bitvis, snällare i sin natur än den reglering som utfördes i projektet. Detta kan vara en indikation på att potentialen är lägre än vårt projekt visar, eller att den medverkande villaägaren som medverkade i våra tester har valt en försiktigare inställning än då det finns möjlighet för värmepumpsägaren att själv justera hur aggressiv elprisstyrningen ska vara, vilket kanske mer visar på försiktighets-nivån hos just det hushållet.

Vår bedömning är att vi fortfarande är långt ifrån de uppskattningar om flexibilitetspotential från Sveriges värmepumpar som tidigare framhållits i olika studier, där resultaten varierat mellan 1-6 GW [10]. Rapporten Nya samverkansmodeller på energimarknaden [16] har visat att värmepumpar kan styras ned 6 kW i snitt. Det går att göra i en population av äldre eller snålt dimensionerade värmepumpar vid riktigt låg utomhustemperatur, men moderna frekvensstyrda värmepumpar förbrukar sällan så mycket el. Prestandan och därmed elförbrukningen kommer med denna strategi, dvs att stoppa värmepumpen inklusive elpatron helt, påverkas negativt.

Vid uppkoppling av värmepumpar, speciellt vid flexibilitetsstyrning, krävs hög cybersäkerhet, så att värmepumpar inte kan användas till att störa det lokala, regionala eller nationella elsystemet. RISE har visat att om värmepumpar tags över antagonistiskt i stor skala kan det påverka elsystemet negativt redan idag [14], så riskerna med uppkopplade värmepumpar ska inte underskattas.

RISE har i projektet visat att värmepumpar kan stödja det lokala elnätet vid tex hög konsumtion hos elbilsaddare, eller hög produktion hos solceller. Vi visade dock att kapaciteten inte var speciellt hög i det området, Ekängen utanför Linköping, som vi studerade, dels pga stor andel fjärrvärme, men också pga en stor andel värmepumpar vi anser har för små möjligheter att köras på ett flexibelt sätt för att vara användbara, nämligen frånluftsvärmepumpar. Vid högre penetration av elbilar påverkar värmepumparna effekten marginellt om de styrs ned under elbilsaddning, då är det laddeffekten som måste minskas eller spridas över dygnet eller elnätet som måste byggas ut för att hantera högre effekter. Vid optimala förhållanden krävs det fem värmepumpar för varje elbilsaddare (11 kW), det fungerar alltså bara i områden med många flexibelt styrda värmepumpar och få elbilar. Vid hantering av stor utbyggnad av solceller, som i den ena nätstationen som studerades i Ekängen hade, hjälper inte heller en styrning av värmepumparna för att jämna ut effekttopparna mycket. Värmepumparna behövs bara till mindre energikrävande varmvattenproduktion under sommaren och det finns stor risk för övertemperatur om de används under längre perioder soliga dagar under våren.

I diskussioner med en elnätsägare verkade den ekonomiska nyttan för dem vara mycket låg, även om de själva skulle ha en strömbrytare att när som helst stänga av en viss mängd värmepumpar så skulle det inte finnas någon ekonomi i det. Inget förslag till affärsupplägg kunde därför tas fram inom projektet.

Gällande intervjustudierna och hushållens perspektiv så visar våra resultat att styrningen av värmepumparna smälte in i en variation av inomhusklimatet som hushållen upplever som normal. Detta innebär att få personer märkte styrningen eller upplevde att de visste när en förändring i inomhuskomfort var knuten till experimentet, förutom vid de tillfällen då något problem uppstod. Eldning, väderomslag, klädsel och andra aktiviteter i hemmet var faktorer som också påverkar inomhuskomforten och därigenom hushållens upplevelse av experimentet. Detta kan knytas till tidigare forskning som visar att erfarenhet av varierande inomhustemperatur formar förväntningar och nöjdhet med inomhuskomfort [21].

När hushållen ombads att reflektera över fjärrstyrning av värmepumpar som en möjlig framtida tjänst, framkom flera viktiga parametrar som avgjorde huruvida de skulle vara intresserade eller villiga att testa en sådan tjänst. Deltagarna från hushållen uttryckte att det var viktigt att tjänsten var *pålitlig* och effektiv, att de kunde ha *agens* och influerande över systemet som tjänsten är kopplad till för att få sina behov och önskemål tillgodosedda, samt att systemet är *säkert* och tillförlitligt i relation till cybersäkerhet och dataintegritet. Vissa deltagare uttryckte tydligt att de hellre skulle vilja styra värmepumpen själva och ifrågasatte syftet med att låta någon utifrån göra det. Dessa resultat bekräftar tidigare forskning som visar att dessa faktorer är viktiga för att hushåll ska vilja erbjuda flexibilitet [22].

Trots att upplevelsen av styrningen i sig inte verkade påverka hushållens praktiker kopplade till värme i någon större utsträckning utan snarare gick obemärkt förbi tack vare dessa värmepraktiker, ville hushållen alltså att en eventuell tjänst ska ta hänsyn till deras aktiviteter och önskemål.

Anmärkningsvärt nog så uttryckte inte hushållen att ekonomisk kompensation för en sådan tjänst var det viktigaste för att få dem intresserade, och de hade därför svårt att sätta en siffra på vad de skulle vilja spara genom tjänsten. Tvärtom diskuterade flera deltagare hur det är önskvärt med en besparing, men ännu viktigare att det inte kostar något, att det fungerar och att de själva kan vara med och styra. Andra deltagare förväntade sig ingen kompensation alls utan såg flexibiliteten som ett slags solidariskt ansvar gentemot samhället. Detta bekräftar också tidigare studier som visar att ekonomiska incitament inte alltid avgör flexibilitetspotential utan snarare hur väl förändringar i hemmet fungerar med hushållens vardagliga praktiker [23], [24].

Sammanfattningsvis var deltagarnas upplevelse av experimentet generellt positiv och det fanns stark motivering till att erbjuda sin flexibilitet genom värmepumpen. Däremot visar användarstudien att fjärrstyrning av värmepumpar som format för att erbjuda flexibilitet inte är en självklarhet, och att en eventuell tjänst behöver ta hänsyn till faktorer som pålitlighet, agens och säkerhet för att hushållen ska vilja delta i en eventuell flexibilitetsmarknad för värmepumpar.

10 Slutsats

Projektets utförde och utvärderade reglering av värmepumpar i nio villor i södra Sverige, där ägarna var informerade, men inte när styrningen utfördes. Sex av

värmepumparna från två olika tillverkare (A och B) rekryterades med hjälp av tillverkarnas nätverk.

Eftersom testerna utfördes i samband med och efter Rysslands fullskaliga invasion av Ukraina och den energikris som det innebar, påverkades hushållens ekonomi kraftigt av elpriserna. Under hösten 2022 var läget i Sveriges elsystem så ansträngt att Energimyndigheten uppmanade Sveriges befolkning att frivilligt ransonera el. Vi ser att hushållen i projektet sänkte temperaturen i februari 2023 med 0,6°C, jämfört med februari 2022, vilket visar att uppmaningen sannolikt fungerade.

Stora variationer sågs i de olika hushållens inomhustemperaturer, så stora att det i vissa hushåll ibland var svårt att urskilja vad projektets styrning gjorde för påverkan. Detta gällde speciellt det hushåll vars värmepump var styrd efter spotpriset på nordiska elbörsen, där temperaturen och värmepumpens elförbrukning emellanåt varierade väldigt kraftigt, men även eldning i de fyra hushåll som hade kamin påverkade temperaturen mycket. Andra värmepumpar gav tydlig temperaturrespons på de regleringar vi gjorde och hade relativt stabila temperaturer.

Precis som de tester vi utfört tidigare [1] så klarade vi enkelt av att stänga av värmepumparna från tillverkare B, när vi skickade tillräckligt kraftig negativ reglersignal. Tillverkare A:s värmepumpar kunde vi inte reglera första vintern, pga saknad hårdvara och när vi reglerade andra vintern var resultatet varierande. Vi lyckades inte tydligt påverka värmepumparna varje gång

Att reglera upp värmepumparna från tillverkare B gick bra, även om vi inte lyckades med någon specifik ändring generell. Detta berodde på att vi inte skickade individuella reglersignaler till de tre värmepumparna, utan förenklade med samma signal till alla. Reglersignalen gav alltså olika utslag på de olika värmepumparna.

Vi visade att vi kunde flytta eleffekt i fyra värmepumpar genom att stänga av dem alla samtidigt och under två timmar. Efter avstängningen visade den sammanvägda elförbrukningen i de fyra värmepumparna mer än dubbla elförbrukningen mot vad den skulle varit när vi stängde av. Denna efterföljande effektökning efter att styrningen har avslutats behöver hanteras om flexibilitet från värmepumpar ska fungera, annars är risken stor att problemet bara flyttas i tid.

De inledande tester som utfördes på en av testets frånluftvärmepumpar, en modernare frekvensstyrd värmepump, visade att potentialen att reglera denna typ av värmepump var låg pga låg effekt hos värmepumpens kompressor. Därför kopplades elpatronen ofta in efter regleringen och förstörde prestandan och ökade elförbrukningen.

Projektet har försökt att kvantifiera flexibilitetspotentialen per värmepump, i ett lokalt elnät och på nationell nivå. Vi utgick ifrån att inga komfortaspekter skulle påverka hur mycket värmepumparna skulle kunna regleras ned eller upp, vilket sannolikt är optimistisk, även om intervjustudierna i projektet faktiskt visar att det skulle fungera. På individuell nivå är flexibilitetspotentialen spetsig, med högst potential strax innan den temperatur då värmepumpens kompressor tvingas att gå dygnet runt. Detta inträffar vid några minusgrader till nära DVUT (förbi DVUT på överdimensionerade), beroende på dimensionering av värmepumpen. Vid än lägre

temperaturer faller potentialen snabbt mot noll. Tillåts reglering även av elpatronen stiger potentialen vid ännu lägre temperaturer, i gränslandet anses potentialen vara låg, men det beror såklart på den ekonomiska nyttan de timmar kompressorn och elpatronen stoppas. Uppreglering av effekten hos värmepumpar visar den omvända profilen.

Vid årskiftet 2023/24 uppskattade RISE att det fanns 340.000 värmepumpar i vattenburna värmesystem i Sverige som gick att koppla upp över internet. Dessa värmepumpar uppskattas kunna ge en flexibilitetspotential på bra bit under 1 GW, men då de som först kom ut på marknaden är svårare att koppla upp, så är många sannolikt inte uppkopplade, varför den siffran troligt är för hög. Jämför vi med den elprisstyrningen som användes i en av testets värmepumpar, så ser vi att denna reglerhypotes är alldeles för tuff, tillverkare B reglerar inte alls så hårt som vi räknar med här. Därför vågar projektet inte sätta en flexibilitetssiffra på Sveriges värmepumpar. Klart är dock att den växer varje år och eftersom vi har lätt att acceptera och använda uppkopplad teknisk utrustning numer, så kommer många av de nyinstallerade värmepumparna sannolikt bli uppkopplade.

En studie gjordes av bostadsområdet Ekängen nordost om Linköping, där vi såg att relativt få villor faktiskt hade värmepump och många av dem troligen var värmepumpar som fungerar dåligt som flexibilitetsresurser; luftluft- och frånluftsvärmepumpar. I området som helhet var 60% av villorna fjärrvärmvärmda. De två detaljstuderade nätstationerna hade fyra respektive 16 bergvärmepumpar i ett bestånd av 66 respektive 89 villor, medan omkring en tredjedel hade frånluft- eller luftluftvärmepumpar.

Vi visade att bergvärmepumparna var alldeles för få för att kunna göra någon ordentlig flexibilitetsnytta vid laddning av elbilar, åtminstone när elbilar blir vanligare och vanligare. Att styra upp vid solelsproduktion var redan överspelat i den ena nätstationen, då det redan fanns 203 kW installerade effekt, där värmepumpseffekten var en bråkdel av det.

Vi såg i diskussioner med Tekniska Verken i Linköping inget reellt affärsupplägg för flexibilitet från värmepumpar i lokala elnät, den ekonomiska nyttan var för låg.

Från hushållens beskrivningar i intervjustudien var erfarenheten av experimentet med fjärrstyrda värmepumpar mestadels positivt. De flesta deltagarna märkte inte effekterna av styrningen i termer av förändrad inomhuskomfort i någon större utsträckning. När de väl märkte någon skillnad i inomhuskomfort hade de svårt att veta om det berodde på experimentet eller någon annan faktor så som väderomslag, aktiviteter i hemmet eller husets egenskaper. Detta resultat indikerar att det finns en viss tolerans för variation i inomhustemperatur i denna typ av hushåll, eftersom de ansågs vara normalt oavsett fjärrstyrningen.

När vi bad hushållen reflektera kring en framtida tjänst för fjärrstyrning, visade det sig att våra deltagare hade låga förväntningar på ekonomisk kompensation för att erbjuda sin flexibilitet genom värmepumpen. Deltagarnas eventuella motivation att erbjuda sådan flexibilitet handlade i stället om att bidra till energisystemet och jämna ut elanvändningen, och samtidigt minska pristoppa på kollektiv nivå. Däremot hade deltagarna andra reservationer och frågetecken kring en framtida

tjänst, framför allt gällande tjänstens pålitlighet, säkerhet och i vilken utsträckning familjen kan påverka systemet eller styrningen så att den passar med deras behov och vardag.

Sammanfattningsvis var deltagarna i experimentet mestadels positiva till att erbjuda flexibilitet genom deras värmesystem, även med svaga ekonomiska incitament. Det är dock inte säkert att en tjänst med extern fjärrstyrning av värmepumpen är hushållens föredragna sätt att erbjuda sådan flexibilitet.

11 Publikationslista

Vetenskapligt granskade publikationer

Björner Brauer, H., Håkansson, M., & Willis, M. (2023). The Ghost in the Heat Pump: Examining social flexibility potential in thermal comfort practices through an experiment of remote-controlled heating in detached houses. *Proceedings of BEHAVE 2023 7th European Conference on Behaviour Change for Energy Efficiency*. November, 2023, Maastricht, Netherlands. [Proceedings: BEHAVE Conference 2023 \(behave2023.eu\)](https://proceedings.behave2023.eu)

Andra publikationer

Projektet har presenterats med ett faktablad inom IEA Heat Pumping Technology TCP Annex 57 “Flexibility by implementation of heat pumps in multi-vector energy systems and thermal networks”, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex57/wp-content/uploads/sites/69/2023/12/swehomes-for-flexibility2p.pdf>.

Presentationer

Fysisk work shop med projektmedlemmar, 2022-05-23

Termo webinar, Online, 2023-04-13

Projektgruppmöte med ”När elbilen flytta in”, Online, 2023-11-21

Slutmöte med projektmedlemmar, Online, 2024-03-15

12 Referenser

- [1] Lindahl et al. (2023), Storskalig laststyrning av värmepumpar i elnätet (SLAV), RISE
- [2] Walfridson et al. (2022). Standard for load control of heat pumps, RISE
- [3] Regeringskansliet (2022). Mål för energipolitiken, <https://www.regeringen.se/regeringens-politik/energi/mal-och-visioner-for-energi/>
- [4] Tidöavtalet (2022). <https://www.xn--tidavtalet-gcb.se/>
- [5] Energiföretagen & Fossilfritt Sverige (2020). Färdplan för fossilfri konkurrenskraft -Elbranschen
- [6] IEA, (2023), World Energy Outlook 2023, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/42b23c45-78bc-4482-b0f9-eb826ae2da3d/WorldEnergyOutlook2023.pdf>
- [7] Eurostat Data Browser (2022). Gross and net production of electricity and derived heat by type of plant and operator, Available from: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/page/NRG_IND_PE_H_custom_2430601
- [8] Energimyndigheten (2021). *Fortsatt hög elproduktion och elexport under 2021*, <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2022/fortsatt-hog-elproduktion-och-elexport-under-2021/>
- [9] Our world in data (2022). Electricity production by source, World, Available from: <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-production-by-source>
- [10] Borgström, S., Norrsén, T., & Lindahl, M. (2019). *Laststyrning av värmepumpar i småhus samt Småhusens bidrag till minskade topplaster*, Besmå
- [11] David Kroon, Stategisk utveckling NIBE, e-postdiskussion 2024-03-01
- [12] Roger Abrahamsson, Produktledare och forskningsingenjör, Tekniska Verken Linköping Nät AB, samtal, våren 2023 och vintern 2024
- [13] Yalin Huang, Y. H. (2021). Baselinemetoder för flexibilitetsprodukter RAPPORT 2021:826. Energiforsk AB.
- [14] RISE Centrum för Cybersäkerhet (2023). Förslag på åtgärder för att möta cyberhot mot elsystemet, <https://www.ri.se/sv/forslag-pa-atgarder-for-att-mota-cyberhot-mot-elsystemet-en-rapport>
- [15] Lindroos, L., Sällström, M. (2021), Småhusens möjligheter att bidra med efterfrågefleksibilitet genom laststyrning av värmepumpar, KTH

- [16] Lindborg, J., et.al., Nya samverkansmodeller på energimarknaden, Sustainable Innovation AB
- [17] Långsiktig marknadsanalys, Scenarier för kraftsystemets utveckling fram till 2050, Svenska kraftnät, 2023
- [18] Prishistorik över rörligt elpris, Vattenfall 2023, <https://www.vattenfall.se/elavtal/elpriser/rorligt-elpris/prishistorik/>
- [19] Månads-, årstids- och årskartor, SMHI 2023, <https://www.smhi.se/data/meteorologi/kartor/avvikelse/arstidsmedeltemperatur-avvikelse/vinter>
- [20] V. Braun and V. Clarke, "Using thematic analysis in psychology," *Qualitative research in psychology*, vol. 3, no. 2, pp. 77-101, 2006.
- [21] M. Luo, Z. Wang, G. Brager, B. Cao, and Y. Zhu, "Indoor climate experience, migration, and thermal comfort expectation in buildings," *Building and Environment*, vol. 141, pp. 262-272, 2018.
- [22] B. Parrish, P. Heptonstall, R. Gross, and B. K. Sovacool, "A systematic review of motivations, enablers and barriers for consumer engagement with residential demand response," *Energy Policy*, vol. 138, p. 111221, 2020.
- [23] K. Gram-Hanssen, "Residential heat comfort practices: understanding users," *Building Research & Information*, vol. 38, no. 2, pp. 175-186, 2010, doi: 10.1080/09613210903541527.
- [24] Y. Strengers, "Peak electricity demand and social practice theories: Reframing the role of change agents in the energy sector," in *The Global Challenge of Encouraging Sustainable Living*: Edward Elgar Publishing, 2013, pp. 18-42.
- [25] SKVP (2022). *Värmepumpsförsäljning*, Available from: <https://skvp.se/statistik/varmepumpsforsaljning>

Bilaga A Beskrivning av testobjekt

MÄTOBJEKT	BFF01	BFF02	BFF03	BFF04	BFF05	BFF06
TILLVERKARE	Tillverkare A	Tillverkare A	Tillverkare A	Tillverkare B	Tillverkare B	Tillverkare B
TEKNIK	Luftvatten	Luftvatten	Bergvärme	Bergvärme	Bergvärme	Bergvärme
EXTERN VV-TANK	-	-	-	Nej	Ja	Nej
MONTERAD	2019-10-03	2020-09-02	2021-03-29	-	-	-
SMART STYRNING	Nej	Nej	Nej	Ja	Nej	Nej
IDAG						
EFFEKT VP	-	-	-	-	-	-
STORLEK	-	-	-	-	-	-
VARMVATTEN-BEREDARE						
TYP AV HUS	Småhus	Småhus	Småhus	Småhus	Småhus	Småhus
ANTAL VÅNINGAR	Enplan med källare	Enplan med källare	Enplan med källare	Enplan med källare	Enplan med källare	1 1/2-plan med källare
PLACERING VP	Källare	Källare	Källare	Källare	Källare	Källare
BOYTA (M2)	125	90	270	120	-	-
ANTAL SOVRUM	3	3	4	3	3	3
ANTAL BADRUM	2	3	3	2	3	3
BJÄLKLAG	Träbjälklag mellan källare och övre plan i äldre del av huset. Betongbjälklag mellan källare och övre plan i tillbygge (arbetsrum, gäst-rum och entré)	Betongbjälklag mellan källare och plan 1, samt plan 1 och plan 2.	Betong	Betong	Träbjälklag	Träbjälklag
KONSTRUKTION STOMME/TERMIS KT SKAL	Tegel med träfasad och tilläggsisolering	Betong och tegel	Betonghålstén och tegel	Betong och tegel	Betong och tegel	Träväggar på övervåningar, betong i källare, stenlagd grund. Gjuten platta i källare inkl golvvärme.
ENERGIBERÄKNING	Nej	Nej	Nej	-	-	-
VENTILATION	Självdrag spjäll TL, ventilationsdon i underkant glasdörr TL, trasigt ventilationsdon TL i angränsande gym.	Självdrag spring-ventil TL, ventilationskanal murstock FL, automatisk FL-fläkt i badrum som styr på fukt, ingen TL i badrum (självdrag från sovrum)	Utan spalt-/vägg-ventiler sovrum, otäta fönster enl ägare. Fuktstyrning /närvaro i bad-/tvättstuga, även extra manuell avfuktare i tvättstuga.	Självdrag utan ventiler, Frånluft, kanalfläkt i badrum. Två fuktstyrda frånluft i källare.	Frånluft badrum källare, styrs manuellt.	Saknas information
ANTAL BOENDE	2	4	4	2	2	2
ACKUMULATORT ANK	250 l	100 l	Nej	"Ja tank finns i pannrum. Den funkar inte som energilager utan är för värmeutjämning och radiator"		300 l
SENASTE BYTE TERMOSTATER	Ca 10 år sedan	Vet ej	Vet ej men vissa är av nya modell och vissa av betydligt äldre modell kanske t.o.m. sen huset byggdes	vid renovering av rum senast 2019 totalt 4 st	Inte bytta	5-10 år sedan
ANTAL RADIATORER	11	7	18	16	12	14
GOLVVÄRME	Vattenburen golvvärme på 40 kvm i badrum i källare	Eldriven golvvärme i en toalett och badrum	En stor del utav suterrängplan samt entré/hall	Ja vattenburen i kök 18 m2	Toalett / dusch i källaren och i övervåning	Toalett (el), glasveranda (el) och badrum (vatten och el på sommaren) Kamin och två små värmeslingor
ANNAN UPPVÄRMNINGSTEKNIK	1 elradiator i tvättstuga samt elektrisk golvvärme på ca 7 kvm. Bastu (Bastar max 1 ggr i veckan, oftast helg eller fredagskväll).	El-golvvärme i badrum	Eldar braskamin 2 ggr i veckan under uppvärmningssäsong. Bastar 1-2 ggr i veckan.	Nej	Nej	
DUSCHRUTIN	1 ggr per dag	1 ggr per dag	2 ggr per dag	1 ggr per dag	mer sällan än 1 ggr per dag	2 ggr per dag
RUTIN VÄDRING (SÄSONGSBASERAT)	Mekanisk ventilation	Brukar inte vädra under vintern	Fönster eller balkongdörr öppen korta perioder under dagen.	Sovrummet vädras kort tid på morgonen	Sällan eller aldrig	Öppet sovrumsfönster nattetid
UTBLÅS TVÄTTSTUGA	Nej	Nej	Ja	Ja	Ja	Nej
KAMIN/ÖPPEN BRASA	Kakelugn	Nej	Braskamin	Nej	Kamin	Kamin

BFF07-BFF09 saknar information.