



Potential till flexibilitet och energilagring

- Modellering av det framtida bostadsområdet
Tarv Västra

Carl Edling, Markus Fransson, Lina Gudmundsson, Agnes Lindberg,
Frida Nordlund och Tova Ohm

Självständigt arbete • 15 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institutionen för energi och teknik
Civilingenjörsprogrammet i energisystem
Examensarbete 2023:19 • ISSN 1654-9392
Uppsala 2023



Potential till flexibilitet och energilagring - Modellering av det framtida bostadsområdet Tarv Västra

Potential of flexibility and energy storage - Modelling of the future residential area Tarv Västra

Carl Edling, Markus Fransson, Lina Gudmundsson, Agnes Lindberg, Frida Nordlund och Tova Ohm

Handledare: Anders Larsolle, SLU, institutionen för energi och teknik
Examinator: David Ljungberg, SLU, institutionen för energi och teknik

Omfattning: 15 hp
Nivå och fördjupning: G2E
Kurstitel: Självständigt arbete i energisystem
Kurskod: EX0946
Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem
Kursansvarig inst.: Institutionen för energi och teknik
Utgivningsort: Uppsala
Utgivningsår: 2023
Upphovsrätt: Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd
Serietitel: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)
Delnummer i serien: 2023:19
ISSN: 1654-9392

Nyckelord: energilagring, energisystem, energilösningar, flexibilitet, batterier, vätgas, termiskt borrhålslager, vätgaslager, vehicle-to-grid, batterilager, efterfrågefleksibilitet

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap

Institutionen för energi och teknik

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Även om du inte publicerar fulltexten kommer den arkiveras digitalt. Om fler än en person har skrivit arbetet gäller krysset för samtliga författare. Läs om SLU:s publiceringsavtal [här](https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/):

- <https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/>.

JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.

Abstract

Knivsta municipality is expanding with new residential areas. Meanwhile, the housing sector already accounts for 40 % of Sweden's total energy use. To ensure energy security in future residential areas and to reduce instability in the power system due to increased intermittent energy production, the need and potential for energy storage and flexibility solutions must be investigated. Implementing these solutions in residential areas will lead to increased self-sufficiency and hence relieve surrounding power system, whereon Tarv Västra, a future community planned in Knivsta, intends to implement these solutions.

The aim of this project was to examine how local electricity and heat production, in combination with flexibility and storage, could contribute to increased local energy independence in Tarv Västra and to balance the surrounding power system. The system solutions implemented are borehole thermal storage, batteries and hydrogen for energy storage, as well as vehicle-to-grid and demand flexibility as flexibility solutions. To assess the requirement for energy storage and flexibility in the residential area, it was essential to analyze both energy demand and production. Modelling of the chosen system solutions could then be conducted on an hourly basis using previous academic works and assumptions. To nuance the results, the created model was simulated with 0 %, 20 % and 40 % base load of electricity from the power grid.

The created model of energy solutions in Tarv Västra resulted in a high potential for energy storage and flexibility to reach a higher degree of self-sufficiency as well as relief of the surrounding grid. The degree of self-sufficiency increased with less percentage of base load from the local power grid (60 %, 64 %, 70 % with 40 %, 20 %, 0 % of baseload), unlike the degree of peak coverage which increased with greater percentage of base load (78 %, 86 %, 100 % with 0 %, 20 %, 40 % of baseload). The combination of borehole thermal storage, batteries and hydrogen satisfied the entire heating requirement and a major part of the electricity requirement. Implementation of vehicle-to-grid and demand flexibility relieved the power system regarding to the number of extracted power peaks.

Sammanfattning

Knivsta kommun expanderar med nya bostadsområden. Samtidigt står bostadssektorn redan för 40 % av Sveriges totala energianvändning. För att säkerställa energitrygghet i framtida bostadsområden och minska instabilitet i elnäten uppkommen av ökad intermittent energiproduktion måste behovet och potentialen för lagring- och flexibilitetslösningar undersökas. Att implementera sådana lösningar i bostadsområden förväntas leda till ökad självförsörjning och således avlasta kringliggande elnät, varpå Tarv Västra, ett framtida bostadsområde planerat i Knivsta kommun, avser att implementera dessa.

Syftet med arbetet var att undersöka hur lokal elkraft- och värmeproduktion, i kombination med flexibilitet och lagring, skulle kunna bidra till ett ökat lokalt energiberoende i Tarv Västra och balansera det kringliggande elnätet. De systemlösningar som implementerats är termisk lagring i borrhål, batterier och vätgas för energilagring, samt vehicle-to-grid och efterfrågefleksibilitet som flexibilitetslösningar. För att utvärdera behovet av lagring och flexibilitet i bostadsområdet var det väsentligt att analysera både energikonsumtion- och produktion. Modellerings av valda systemlösningar kunde sedan genomföras på timbasis med hjälp av tidigare akademiska arbeten och antaganden. För att nyansera resultaten simulerades den skapade modellen med 0 %, 20 % och 40 % baslast av elkraft från elnätet.

Den skapade modellen av energilösningar i Tarv Västra resulterade i en hög potential av energilagring och flexibilitet för att nå en hög självförsörjningsgrad samt avlastning av kringliggande elnät. Självförsörjningsgraden ökade med en minskad procentuell baslast från det lokala elnätet (60 %, 64 %, 70 % för 40 %, 20 %, 0 % av baslast), till skillnad från toptäckningsgraden som ökade med en ökad procentuell baslast (78 %, 86 %, 100 % för 0 %, 20 %, 40 % av baslast). Kombinationen av termisk lagring i borrhål, batterier och vätgas tillfredsställde hela värmebehovet och en stor del av elkraftbehovet. Med implementering av vehicle-to-grid och efterfrågefleksibilitet avlastades elkraftsystemet med avseende på antalet uttagna effekttoppar.

Innehåll

1	Inledning	3
1.1	Bakgrund	3
1.2	Syfte	3
1.3	Frågeställningar	3
1.4	Område och avgränsningar	4
2	Teoretisk bakgrund	4
2.1	El- och värmeproduktion	4
2.1.1	Solceller	4
2.1.2	Solfångare	4
2.1.3	Hybridsolceller	4
2.2	Flexibilitet	5
2.2.1	Vehicle-to-grid	5
2.2.2	Efterfrågefleksibilitet	5
2.3	Energilagring	5
2.3.1	Vätgas	5
2.3.2	Batterier	5
2.3.3	Termisk lagring	6
3	Metod och modellering	6
3.1	Elkraftbehov	6
3.2	Värmebehov	6
3.3	Elkraft- och värmeproduktion	6
3.4	Flexibilitet	7
3.4.1	Vehicle-to-grid	7
3.4.2	Efterfrågefleksibilitet	7
3.5	Energilagring	8
3.5.1	Termisk energilagring	8
3.5.2	Batterier	8
3.5.3	Vätgas	9
3.6	Total systemlösning	9
3.7	Simuleringsmodell	10
3.7.1	Simuleringsmodell värmesystem	10
3.7.2	Simuleringsmodell elkraftsystem	10
4	Resultat	11
4.1	Försörjning av elkraft och värme	11
4.2	Efterfrågefleksibilitet	14
4.3	Bortfall av elkraft	14
4.4	Känslighetsanalys	15
5	Diskussion	15
5.1	Systemlösning	15
5.2	Efterfrågefleksibilitet	16
5.3	Bortfall av elkraft	17
6	Slutsatser	17
7	Referenser	18

1 Inledning

1.1 Bakgrund

En ökande global medeltemperatur orsakad av växthusgasutsläpp är en bidragande faktor till Europeiska unionens mål om klimatneutralitet till 2050 (Europeiska rådet 2023). I linje med klimatomställningen har andelen förnybar intermittent energiproduktion konsekvensenligt expanderat. I Sverige har andelen sol- och vindkraft mellan år 2015 och 2021 ökat från 9 % till 16 % (SCB 2023). Till följd av denna utökning och variationer i energiproduktion uppstår instabilitet i elnätet (Naturskyddsföreningen 2021), vilket medför ett ökat behov av lagring och flexibilitet. Särskilt väsentligt är behovet i den svenska bostadssektorn som förlitar sig på allt mer lokalproducerad förnybar energi (SCB 2023), och dessutom konsumerar upp mot 40 % av Sveriges totala energikonsumtion (Energimyndigheten 2023).

Vidare finns ett stort behov av nyproducerade bostäder i Sverige i och med den omfattande bostadsbristen (Boverket 2022). Genom integration av förnybara energisystem i nybyggnationer tillsammans med lagring- och flexibilitetslösningar kan högre lokal självförsörjningsgrad uppnås (Thore 2019), vilket avlastar kringliggande el- och fjärrvärmenät. Detta ger fördelar för lokalnätet som förstärks och risken för kapacitetsbrist minskar (Karlsson 2020).

Knivsta kommun är en av flertalet kommuner med snabb tillväxttakt där etablering av nya bostadsområden planeras (Knivsta kommun 2020). I ett av de projekterade bostadsområdena, Tarv Västra, planeras implementering av lokal förnybar energiproduktion. Detta arbete undersöker potentialen samt möjligheterna till flexibilitet och energilagring i det planerade området Tarv Västra i Knivsta kommun.

1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att undersöka hur lokal elkraft- samt värmeproduktion i kombination med flexibilitet och lagring kan bidra till en ökad lokal energisjälvständighet i Tarv Västra och att balansera kringliggande elnät. Den skapade modellen simuleras med varierande uttag av baslast, vilket är ett konstant uttag av elkraft från elnätet på 0 %, 20 % och 40 % av det årliga timmedelvärdet. Resultatet presenteras i självförsörjningsgrad av värme och elkraft, förmåga att hantera toppar i effektuttag (topptäckning) samt högsta momentana effektuttag. Självförsörjningsgraden av elkraft delas upp i total självförsörjningsgrad samt självförsörjningsgrad exklusive baslast för att betona de fluktuationer i effektuttag som undviks då en baslast nyttjas.

De systemlösningar som nyttjas är borrhålslager, batterier och vätgas för energilagring, samt vehicle-to-grid (V2G) och efterfrågefleksibilitet som flexibilitetslösningar.

1.3 Frågeställningar

För att konkretisera syftet formuleras fyra frågeställningar enligt nedan. Frågeställningarna omfattar det framtida bostadsområdet Tarv Västra och undersöks under ett år.

- Vad finns det för behov av flexibilitet och lagring baserat på konsumtion och produktion av elkraft och värme?
- Vilken är potentialen i att nyttja borrhålslager, vätgaslager samt batterier för att tillfredsställa lagringsbehovet av elkraft och värme?
- Vilken är potentialen i att nyttja V2G-teknik och efterfrågefleksibilitet för att tillfredsställa flexibilitetsbehovet av elkraft?
- Vid variation av baslast från elnätet, hur självständigt är systemet sett till topptäckning, elkraft- och värmebehov samt hur resilient är systemet mot momentana strömavbrott?

1.4 Område och avgränsningar

Arbetet avgränsas till det framtida bostadsområdet Tarv Västra beläget i Knivsta kommun. I bostadsområdet planeras 442 bostäder fördelat på 9 kvarter, med 15 flerbostadshus, 6 radhus samt kontor, skola och idrottshall. Området har en yta av ungefär 67 000 m² och är beläget i västra Ängby i västra delen av Knivsta tätort (Gullberg 2023).

Lösningar för flexibilitet och energilagring i detta arbete inkluderar solceller, hybridsolceller, V2G-laddstolpar, borrhållager, vätgaslager och batterilager. Variationer i konsumtion och produktion av både elkraft och värme avgränsas till att analyseras på timbasis.

2 Teoretisk bakgrund

2.1 El- och värmeproduktion

2.1.1 Solceller

Solceller genererar elkraft genom att omvandla solens energi till elektrisk energi. När solens strålar träffar solcellen skapas en elektrisk spänning mellan fram- och baksida. Sammankopplas dessa i en elektrisk krets utjämnas potentialskillnaden då en ström uppstår när elektroner strömmar från sidan med hög potential till sidan med låg potential (Naturskyddsföreningen 2023).

Den mest konventionella typen av solceller är så kallade kristallina solceller. Dessa består av halvledarmaterialet kisel vars atomer ligger i en kristallstruktur för materialet. Under de senaste åren har det även blivit vanligare med så kallade tunnfilmssolceller. Dessa består av ett tunt lager ledarmaterial ovanpå ett annat genomskinligt material, till exempel glas eller plast. Kristallina kiselsolceller har än så länge högre verkningsgrad än tunnfilmssolceller, men de är också dyrare och får en lägre verkningsgrad vid höga temperaturer, vilket innebär att de genererar en lägre ström då de blir varma (Nohrstedt 2017).

2.1.2 Solfångare

Utöver elkraftproduktion från solceller kan solens energi nyttjas för värmeproduktion genom att använda så kallade solfångare. Solfångare omvandlar solenergi till värme med hjälp av en absorbatör. Absorbatören värmer upp systemets medium, oftast luft eller vatten, som transporteras till en lagringstank för att kunna nyttjas då behovet finns. Mediet pumpas då till huset där värmen avges för uppvärmning av fastighetens tappvarmvatten och/eller element. Sedan pumpas mediet tillbaka från huset till solfångaren för att återigen värmas upp på nytt (Naturskyddsföreningen 2023).

Då det finns en omvänd relation mellan behovet av uppvärmning samt tillgången till solvärme är det av vikt att kunna lagra solvärmens över längre tidsperioder. Detta är möjligt med hjälp av så kallade borrhållager som är ett exempel på termisk lagring, mer om detta i avsnitt 2.3.3 Termisk lagring.

2.1.3 Hybridsolceller

För att öka verkningsgraden och nyttja den begränsade tillgängliga ytan för arbetet är så kallade hybridsolceller intressanta att nyttja. Dessa kombinerar de olika syftena med solceller och solfångare genom att ha värmeväxlare på baksidan av solceller. På detta sätt ersätts absorbatören i solfångarsystemet av solceller, som värmer systemets medium, och både elkraft och värme produceras. Detta innebär att det inte behövs separata ytor för solceller samt för solfångare, utan dessa kombineras på en gemensam yta och sparar därmed mycket plats. Ytterligare innebär värmeväxlingen att solcellerna kyls vilket ökar effekten och därmed verkningsgraden för dessa, resulterande i en 15 % högre elkraftgenerering per år jämfört med konventionella solceller (Free Energy 2023).

2.2 Flexibilitet

2.2.1 Vehicle-to-grid

Vehicle-to-grid (V2G), är en teknik som kan nyttjas för att öka flexibilitet i lokala energisystem. V2G-teknik tillåter elfordon att agera som mobila batterier, där energin lagrad i batteriet kan nyttjas vid momentana toppar av effektuttag för att avlasta elnätet. Särskilda laddstolpar möjliggör den dubbelriktade energiöverföringen mellan fordon och elnät. Utöver att öka flexibiliteten i lokala energisystem kan V2G-teknik även främja utvecklingen av förnybara, intermittenta energikällor. Den främsta tekniska nackdelen är att batteriets livslängd försämras med ökad upp- och urladdning (Nordlund 2023c).

2.2.2 Efterfrågeflexibilitet

Med den lokala, varierande elkraftproduktionen för Tarv Västra kommer så kallad efterfrågeflexibilitet tillsammans med energilagring att spela en avgörande roll för ett stabilt och effektivt energisystem. Efterfrågeflexibilitet är möjligheten att styra bostäders lastprofil efter dess produktionsprofil, för att således upprätthålla en effektbalans och minska eventuella förluster i systemet (Nilsson & Samuelsson 2015). Med andra ord styrs elkraftkonsumtionen utefter när tillgängligheten i nätet är som störst, för att bemöta effekttoppar och minska risken för effektbrist (Energimarknadsinspektionen u.å).

Att minska topplasten, det vill säga den last som dras då efterfrågan är som störst, skulle säkerställa en mer fullständig användning av tillgängliga resurser och minska onödiga investeringar i elkraftsystemet. Detta leder till långsiktiga systembesparingar med minskad risk för överbelastning. Minskningen av topplasten innebär inte nödvändigtvis en minskning av den totala elkraftkonsumtionen hos slutanvändaren, utan endast en omfördelning av denna (Fröberg & Mehdiipoor 2020).

För att möjliggöra efterfrågeflexibilitet krävs implementering av så kallade smarta tjänster i bostäderna. En möjlig typ av smart tjänst skulle kunna vara en plattform där lokal hantering av mätvärden för energiproduktion finns tillgänglig. Detta skulle kräva att slutanvändarna själva använder hushållsapparater då tillgängligheten av elkraft är som störst eller då lasten för systemet är som lägst, för att på så sätt styra sin elkraftkonsumtion. Denna typ av styrning från slutanvändarens sida kallas för aktiv efterfrågeflexibilitet. Om slutanvändarens elkraftförbrukning istället styrs av en yttre aktör kallas det för passiv efterfrågeflexibilitet (Nilsson & Samuelsson 2015).

2.3 Energilagring

2.3.1 Vätgas

Att nyttja vätgas som energibärare och lagringsmedium är en storskalig teknik med hög potential att på både dygns- och säsongsbasis kunna lagra energi. Med hjälp av vätgaslagring i Tarv Västra kan denna teknik ersätta andra bränslealternativ och bidra till en större lokal flexibilitet. Genom att nyttja förnybar energi för att tillverka vätgas och sedan lagra denna i bostadsområdet kan ett stabilt och effektivt elkraftsystem uppnås. På detta sätt innebär vätgasproduktion ett möjligt sätt att öka försörjningstryggheten (Andrén 2022).

2.3.2 Batterier

Batterier är en flexibel, lättillgänglig och effektiv lagringstyp av elektrisk energi. Batterier bidrar med systemtjänster som spännings- och frekvensreglering vilka kapar effekttoppar, avlastar elnätet och bidrar till en mer driftsäker elkraftförsörjning (Svenska kraftnät 2022). Vanligtvis nyttjas batterier för kortvarig lagring, på tim- till dygnsbasis, och kan då placeras fastighetsnära. Säsongslagring är inte lika vanligt då det kräver stora samt kostsamma anläggningar (Thore 2019). Det finns flera olika varianter av batterilager beroende på önskad självförsörjningsgrad och efterfrågat tidsintervall (IRENA 2015). Ett batterilager i Tarv Västra bidrar både med lagringsmöjlighet av egenproducerad elkraft och flexibilitet i det lokala energisystemet (Lindberg 2023).

2.3.3 Termisk lagring

Termisk energilagring i borrhål (BTES, borehole thermal energy storage), är en lagringsmetod som används för att säsongslagra värme och kyla i berggrunden. Den typ av värmelagring bäst lämpad för Tarv Västra är så kallad sensibel värmelagring, vilken bygger på att värme lagras i ett medium. Som tidigare nämnt är mängden värme producerad från hybridsolcellerna som störst då behovet är som lägst, vilket möjliggör lagring av överskottsvärmen i BTES-systemet. Implementering av borrhålslager kräver minimala ytor då det går att placera under parkeringsplatser, grönområden och i bostadsområden. Detta skapar förutsättningar för aktiv säsongslagring av värme och kyla och bidrar till ett självförsörjande värmesystem (Ohm 2023).

3 Metod och modellering

3.1 Elkraftbehov

För att modellera elkraftkonsumtionen i Tarv Västra beräknades det årliga elkraftbehovet för flerbostadshus, radhus, skolor samt kontor inklusive annan offentlig verksamhet. Det årliga elkraftbehovet beräknas som produkten av fastighetsyta och elkraftbehov (kWh/m^2) i respektive fastighetstyp (Sveby 2012a,c,b). De beräknade värdena för respektive fastighetstyp redovisas i tabell 1 nedan.

Tabell 1: Redovisar totala elkraftbehovet för olika fastighetstyper per år.

Fastighetstyp	Elkraftbehov (kWh/m^2)	Fastighetsyta (m^2)	Värde (MWh)
Flerbostadshus	45	17 800	802
Radhus	30	8 560	257
Skolor	37	10 800	400
Kontor och offentlig verksamhet	65	8 820	515

Fyra konsumtionsprofiler skapades för att modellera elkraftkonsumtionen på timbasis, två för hushåll och två för offentlig verksamhet där vardera fastighetstyp har en profil för vardag respektive helg. Hushåll innefattar lägenheter och radhus medan offentlig verksamhet innefattar skolor och kontorsverksamhet. I modellen tas endast elkraftbehovet för hushåll och fastigheter hänsyn till, vilket innebär att elkraftkonsumtionen inte bör variera avsevärt under året. Säsong tas därför inte i beaktning. För figurer över konsumtionsprofilerna, se underrapporten (Nordlund 2023a).

För att utvärdera systemlösningens flexibilitet har förmågan att undvika toppar i effektuttag beräknats. En topp definieras som en timmas elkraftkonsumtion överskridande 330 kWh. Detta antas rimligt då endast 9 % av det årliga elkraftkonsumtionen överskrider detta värde. Värdet är i övrigt godtyckligt valt.

3.2 Värmebehov

Modelleringen av värmebehovet för det framtida bostadsområdet genomfördes med avseende på två kategorier. Den första kategorin är uppvärmningsbehov till följd av värmeläckage. Parametrar som togs i beaktning för värmeläckage är temperaturdata, specifikationer för passivhus, köldbryggor och dimensionerna för bostadsområdet (Fransson 2023). Den andra kategorin är varmvattenanvändning för de olika typerna av fastigheter i bostadsområdet. Dessa baserades på årsschabloner och skapade dygnsprofiler för vattenanvändning för olika fastighetstyper (Fransson 2023). Det totala värmebehovet beräknades som summan av uppvärmningsbehovet och varmvattenanvändningen, och uppnår 1800 MWh över året.

3.3 Elkraft- och värmeproduktion

Elkraft- och värmebehovet tillgodoses av klassiska kristallina kiselsolceller och hybridsolceller. Solceller placerades på samtliga bostäders söderorienterade fasadytor, samt på 67 % av söderorienterade takytor,

vilket motsvarar 6100 m² för respektive yta. Beroende på solcellstyp producerar dessa årligen upp till 200 kWh/m² (Free Energy 2023). Den årliga produktionen uppskattades till 170 kWh/m². Hybridsolceller placerades på resterande 33 % av söderorienterade takytor, motsvarande 3100 m². Denna yta är tillräcklig för att uppnå önskad värmeproduktion med minimal spillvärme, därav är separata solfångare inte av intresse. Mediet i värmeväxlersystemet tillhörande hybridsolcellerna antogs vara vatten och nyttjades för uppvärmning av tappvarmvatten och i element. Vid dessa normala driftförhållanden genererar hybridsolceller årligen 186 kWh elkraft/m² och 800 kWh värme/m² (Free Energy 2023).

För att modellera värme- samt elkraftproduktionen på timbasis från samtliga solceller på tak och fasad nyttjades timvis solinstrålning (W/m²) över Uppsala 2022 enligt STRÅNG-modellen från SMHI (SMHI 2023).

3.4 Flexibilitet

3.4.1 Vehicle-to-grid

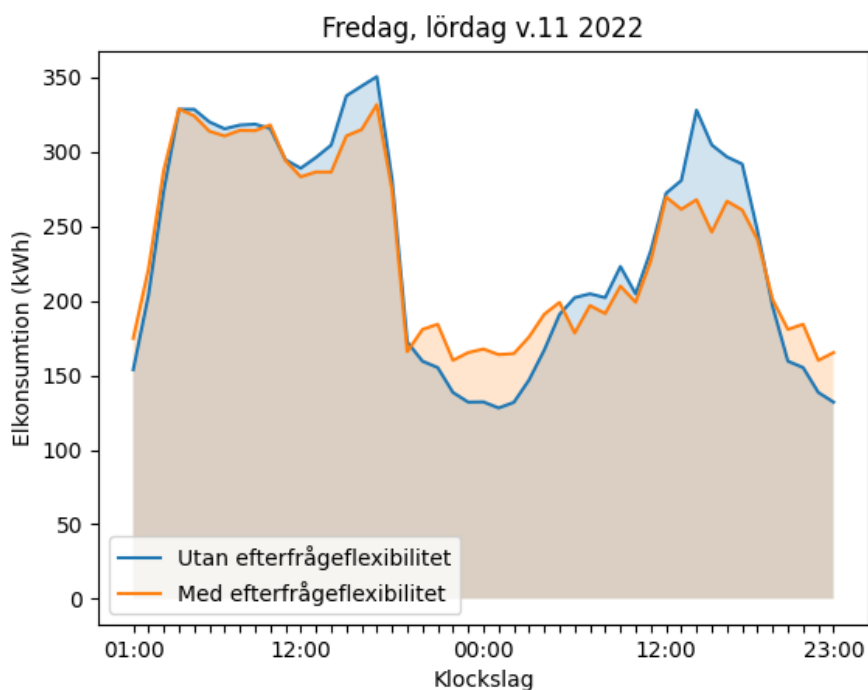
För att modellera nyttan av V2G i Tarv Västra fastställdes ett antal parametrar. Dessa parameterer inkluderar storleken av ett elfordonsbatteri till 50 kWh, installerad effekt per laddplats till 11 kW, en urladdningseffekt av 2,2 kW, antalet laddplatser till 133, urladdningsgrad efter körning till 40 % och uppladdningstid till 2 timmar (Nordlund 2023c).

Utöver de basantaganden som nämns ovan måste även fordonens rörelsemönster identifieras. Av denna anledning nyttjades avläsning i rapporten *A temporal assessment of vehicle use patterns and their impact on the provision of vehicle-to-grid services* (Harris & Webber 2012), där fordonsanvändning i andelar beskrivs för vardag respektive helg. Därefter nyttjades samma tillvägagångssätt som i den nämnda rapporten för att modellera tillgängligheten av det totala lagret elfordonsbatterier med hänsyn till ur- och uppladdning (Nordlund 2023c). Det ökade elkraftbehovet som uppstod till följd av uppladdning av elfordonen adderades till den tidigare skapade konsumtionsprofilen över året.

3.4.2 Efterfrågefleksibilitet

Implementering av passiv efterfrågefleksibilitet i Tarv Västra resulterade i att den dagliga lastprofilen förändrades. Genom att användningsmönstret för hushållsapparater som tvättmaskin, diskmaskin och torktumlare schemalades jämnt över dygnet förväntades variationerna i den totala lastprofilen att jämnas ut. För att modellera hur denna förändring påverkade resultatet antogs hushållsapparaternas normala användningsmönster under ett dygn, fördelat på vardag och helgdag, följa de trender illustrerade i (Zimmermann 2009). Genom figuravläsning erhöles användningsmönster för respektive hushållsapparat i både villor samt flerbostadshus under vardag och helgdag. Dessa sammanfogades därefter till ett totalt användningsmönster för en generell bostad där vardag och helgdag särskiljdes. De generella dygnsprofilerna för nämnda hushållsapparater antogs ha samma utseende för samtliga bostäder i Tarv Västra under hela året och resulterade därmed i en årlig lastprofil.

Den årliga lastprofilen jämnades därefter ut då efterfrågefleksibilitet nyttjades. Förbrukningen av tvättmaskin, diskmaskin och torktumlare varje timme ansattes till medelvärdet av hushållsapparaternas dygnsförbrukning med avseende på helgdag respektive vardag. Detta resulterade i en ny årlig lastprofil där hushållsapparaternas förbrukning förflyttas ifrån timmar då toppar i effektuttag annars sker. Med hänsyn till denna istället för tidigare modell erhöles en ny total elkonsumtionsprofil för bostadsområdet Tarv Västra, där effektuttaget under topplasttimmar är lägre. Hur den nya profilen med implementerad efterfrågefleksibilitet ser ut illustreras för två dagar v.11 i mars i figur 1.



Figur 1: Totala elkraftkonsumtionsprofilen med och utan efterfrågefleksibilitet för en vardag och helgdag i mars.

3.5 Energilagring

3.5.1 Termisk energilagring

Dimensioneringen av systemet beror på energibehovet och bemötes med antal hål, djup och avstånd mellan hålen, samt de geologiska förhållanden som råder på platsen (Sveriges geologiska undersökning 2021). Vid modellering av det termiska energilagret genomfördes omfattande förenklingar. Lagret definierades av borrhålsdjup på 150 m, en borrhålsdiameter på 108-115 mm och ett avstånd mellan hålen av 4 m. Maximal tilloppstemperatur bestämdes till 70 °C och minimal tilloppstemperatur till 40 °C (Ohm 2023).

Dimensioneringen av det termiska lagret baserades på Tarv Västras årliga värmebehov. För att möjliggöra detta användes data från det befintliga borrhåslagret i Emmaboda, där parametrar som lagringsvolym, verkningsgrad, maximal kapacitet och antal hål definierats (Carlstedt 2010). Beräkningar och formler så som den sensibla värmelagringsekvationen nyttjades därefter för dimensionering av BTES-systemet i Tarv Västra (Ohm 2023). Den slutgiltiga dimensioneringen redovisas i tabell 2 nedan.

Tabell 2: Redovisar dimensionerings resultat för det termiska energilagret.

Parameter	Värde
Antal borrhål (st)	18
Total volym (m ³)	38 600
Kapacitet (MWh)	1 340
Uttagskapacitet (MWh)	885

3.5.2 Batterier

Solcellsbatterier av litiumjärnfosfat valdes som batterilösning för fastigheterna i Tarv Västra, vilket är batterier direkt kopplade till solcellssystemet. Batteriernas tekniska parametrar fastställdes till en kapacitet om 5 kWh samt upp- och urladdningseffekt till 10 kW respektive 2,5 kW. Vidare bestämdes

urladdningsdjupet till 100 %, förlusterna vid upp- och urladdning till 6 % och batterilagret till initialt urladdat (Lindberg 2023).

Utöver dessa antaganden om batteriparametrar, bestämdes det totala antalet batterier och därmed lagrets totala kapacitet. Utifrån antalet planerade bostäder i Tarv Västra (Gullberg 2023) ansattes antalet batterier till 157 st. Ytterligare förenklades de enskilda batterierna till att fungera som en gemensam enhet. Den totala storleken av batterilagrets parametrar redovisas i tabell 3 nedan.

Tabell 3: Redovisar parametrar för vardera batteri i batterilagret.

Parameter	Värde
Antal batterier (st)	157
Batterikapacitet (kWh)	5,00
Maximal utgångseffekt (kW)	2,50
Maximal uppladdningseffekt (kW)	10,0
Urladdningsdjup (% *)	100
Självladdning (%)	0

* Om kapaciteten i batteriet är 15 % av maximal batterikapacitet laddas inte batteriet ur (Huawei u.å.), för att spara på batteriets livslängd.

3.5.3 Vätgas

Vätgaslagret i Tarv Västra laddades upp vid överbliven elkraft i systemet, förutsatt att alla andra lagringsalternativ har uppnått optimala nivåer. Denna prioritering är nödvändig då produktion och konsumtion av vätgas innefattar stora förluster (Felseghand et al. 2019).

Batterinivåerna stämde kontinuerligt av med vätgaslagret. Om batterierna inte uppnådde 50 % kapacitet och det finns ett överskott av vätgas, nyttjades denna i bränslecellen och batterierna laddades upp. På detta sätt säkerställdes en stabil energilagring som mötte den momentana elkraftkonsumtionen. Således undveks fördröjningsproblem och efterfrågan på flertal bränsleceller.

Det generella upplägget för vätgasmodelleringen kan summeras med systemets tre stora delar: elektrolyt, vätgaslagring och bränsleceller.

Elektrolysen är av typen unipolär, vilket är en alkalielektrolys. Denna lämpade sig bra på grund av dess höga verkningsgrad på 85 %, låga kostnad och pålitlighet (Shiva Kumar & Himabindu 2019, LeRoy & Stuart 1981), (Edling & Gudmundsson 2023).

Vidare finns ett behov av att lagra vätgas då den inte omedelbart användes vid produktion. Lagringsmetoden sker genom komprimering av gasen i vätgastankar under ett högt tryck av 70 MPa. Metoden är industriellt väletablerad och säker med korrekta trycksäkerhetsåtgärder samt behållare som klarar nedbrytningskrav upp till 2000 MPa, som länge varit standard inom vätgasindustrin (Edling & Gudmundsson 2023). Vätgas och tankar har tillsammans en densitet på 30 kg/m^3 vid 70 MPa. För att tillförse bostadsområdet med tillräcklig energi året runt antogs vätgaslagret rymma upp till 23 ton, vilket motsvarar ett 800 m^3 stort lager (Züttel 2004).

I bränslecellen alstras elkraft av vätgas. PEMFC (Proton exchange membrane fuel cell) ansågs vara den bäst lämpade bränslecellstypen till följd av den pålitliga teknologin och relativt långa varaktigheten (Felseghand et al. 2019). Vid modellering av vätgas nyttjades dess lägre värmevärde 33 kWh/kg (Züttel 2004). Vidare antogs verkningsgraden av elkraftproduktion uppnå 60 %, då hög vätgaskvalité uppskattades (Felseghand et al. 2019). Ytterligare antogs resterande energi bli värme.

3.6 Total systemlösning

Den totala systemlösningen i Tarv Västra innefattades av batterier, vätgas och borrhållslager för energilagring samt V2G och efterfrågeflexibilitet som flexibilitetslösning. Energiproduktionen tillgodosågs av klassiska- och hybridsolceller. Den totala systemlösningen presenteras i stora drag i tabell 4 nedan. För

respektive lagringslösning bestämdes startnivån av energi till att överensstämma med nivån vid årets slut. Anledningen till att nivån i vätgastanken vid 40 % baslast skiljer sig åt från resterande två fall beror på att nivån i vätgastanken ska ha samma värde vid början och slutet av året för att bättre efterlikna verkligheten.

Tabell 4: Redovisar totala systemlösningens kapacitet för solceller, batterier, V2G, vätgas och borrhålslager.

Energilösning	Total kapacitet (kWh)	Startnivå (kWh)
Solceller	1 910 000	-
Hybridsolceller	2 110 000	-
Batterilager	785	0
V2G-lager	6 650	3250
Vätgastank	460 000	0 (20 %, 0 %), 174000 (40 %)
Borrhålslager	13 400 000	630000

3.7 Simuleringsmodell

För att sammanfoga modelleringens olika delar implementerades en dynamisk simuleringsmodell som successivt uppdaterar hela systemet i tidssteg om en timme. I detta avsnitt kommer simuleringsmodellens tillvägagångssätt att beskrivas översiktligt. Elkraftsystemet och värmesystemet särskiljs här.

3.7.1 Simuleringsmodell värmesystem

För att beskriva värmesystemets beteende jämfördes värmeproduktion med värmebehov på timbasis. Två huvudslingor förlöpte jämsides där den ena inkluderar värmeproduktion från hybridsolceller och den andra nyttjande av restvärme från vätgas i bränslecellen. De två slingorna mynnade ut i att kontrollera behovet av extern fjärrvärmeförsel.

I den första slingan kontrollerade modellen om det finns värmeproduktion från hybridsolcellerna. Om det fanns värme att nyttja, kontrollerade modellen om denna är tillräcklig för att tillföra hela områdets värmebehov. Om behovet uppfylldes går modellen vidare undersöktes eventuellt värmeöverskott som sedan lagrades i borrhålslagret. Parallellt med denna slinga kontrollerade modellen om det fanns restvärme att nyttja från bränslecellen. Eventuell restvärme gick till att värma upp huset vid behov. På samma sätt kontrollerade modellen därefter om det fanns ett värmeöverskott, som adderades till borrhålslagret. Om värmebehovet uppfylldes stannade modellen här. Om den totala värmeförseln från hybridsolceller och restvärme från bränslecellen inte täckte bostadsområdets värmebehov gick modellen vidare med att kontrollera tillgänglig värme i borrhålslagret. Vid möjlighet användes den lagrade värmen för att täcka upp värmebehovet. Om denna inte var tillräcklig för att nå värmelasten, eller inte existerade, nyttjades istället fjärrvärme från det omkringliggande värmenet för att täcka Tarv Västras värmebehov.

3.7.2 Simuleringsmodell elkraftsystem

Även i modellen för elkraftsystemet förlöpte två huvudslingor med varandra. Den första beskriver huruvida elfordonsbatterierna och batterilagret laddas upp eller laddas ur och den andra beskriver vätgasens uppladdning av batterilagret.

I den första slingan kontrollerades först om elkraftkonsumtionen översteg en så kallad topp i effektuttag. Om detta var fallet, i kombination med att elkraftbehovet översteg summan av elproduktion och baslast så kontrollerades det om elfordonsbatteriernas kapacitet översteg 40 % av den maximala kapaciteten. Om detta villkor uppfylldes nyttjades möjlig uteffekt från elfordonsbatterierna för att täcka elkraftbehovet. Om lasten uppnåddes tar slingan slut. Annars gick modellen vidare med att kontrollera om batterilagret kan laddas ur. Om nej, är effekttillförseln otillräcklig under denna timma och Tarv västra behövde stötts av det omkringliggande elnätet. Om elfordonsbatterierna inte kunde laddas ur vid en effekttopp går modellen vidare med att kontrollera om batterilagret kunde nyttjas för att uppnå lasten enligt

samma procedur som beskrivs ovan. Om det inte var en momentan effekttopp kontrollerade modellen endast om elkraftbehovet översteg summan av elkraftproduktion och baslast. Då svaret är ja går modellen igenom samma slinga enligt ovan exkluderat elfordonsbatterierna.

I de fall då elkraftbehovet inte översteg summan av elkraftproduktion och baslast fanns ett momentant effektoverskott, vilket innebar att det fanns möjlighet att ladda upp de lagringsmöjligheter som fanns i systemet. Först kontrollerade modellen om elfordonsbatterierna kunde laddas upp som prioriterades över det vanliga batterilagret. Därefter kontrollerade modellen om det fanns överskottsenergi tillgängligt. I de fall ett överskott inte existerade tar slingan slut. Annars gick modellen vidare med att kontrollera om batterierna kunde laddas upp, vilket de också gjorde om det fanns möjlighet. Vid ytterligare eventuell överskottsenergi från batteriuppladdningen gick modellen vidare till vätgasproduktion och därefter tog slingan slut.

Modellens andra slinga beskriver den jämnlöpande uppladdningen av batterierna från vätgasen. Som tidigare nämnt fanns viss fördröjning i omvandlingen mellan vätgas och elkraft. Därmed omvandlades vätgasen kontinuerligt till elkraft för att ladda upp batterilagret. Modellen kontrollerade först om det existerade vätgas i tanken och därefter nivån i batterilagret. Om nivån i batterilagret understeg 50 % av dess totala kapacitet nyttjades vätgasen i bränslecellen för att alstra elkraft som laddade upp batterierna. Gränsen på 50 % definierades för att prioritera batteriuppladdning direkt från solcellernas elkraftproduktion och därmed undvika förluster associerade med vätgasproduktion. Vid denna energiomvandling producerades även värme som biprodukt, vilket omhändertogs av värmesystemet. All restvärme antogs kunna nyttjas direkt för Tarv västras värmebehov. Därefter tog slingan slut.

4 Resultat

4.1 Försörjning av elkraft och värme

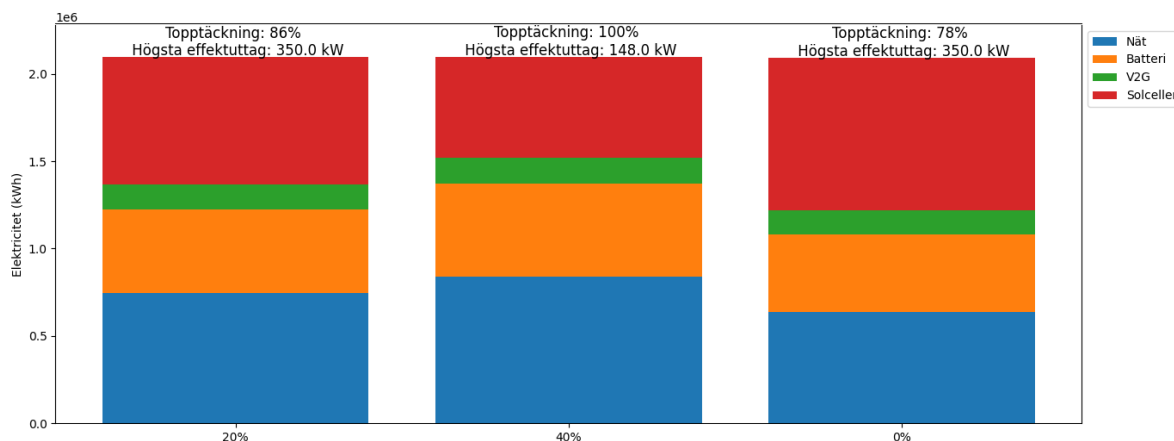
Den föreslagna systemlösningen simulerades med en baslast av effekttuttag från elnätet på 20 %, 40 % samt 0 %, där 20 % anses vara standardfallet och 0 % respektive 40 % representerar två jämförelsefall. Resultatet mättes i form av självförsörjningsgrad av elkraft samt värme, överskott av värme, högsta effekttuttag från elnät, samt förmåga att undvika toppar i effekttuttag. Självförsörjningsgrad av elkraft delas upp i total självförsörjningsgrad samt självförsörjningsgrad exklusive baslast. Dessa siffror redovisas i tabell 5 nedan. Notera att total självförsörjningsgrad av elkraft minskar med högre baslast, vilket innebär att mer elkraft från nätet nyttjas totalt sett. Självförsörjningsgrad exklusive baslast ökar istället med högre baslast och fluktuationerna i uttag blir avsevärt mindre.

Tabell 5: Resultat vid varierande av baslast i procent.

Baslast	20 %	40 %	0 %
Självförsörjning värme	1,00	1,00	1,00
Total självförsörjning elkraft	0,644	0,600	0,697
Självförsörjning elkraft exklusive baslast	0,844	0,990	0,697
Spillvärme (kWh)	9 660	9 660	14 800
Högsta effekttuttag (kWh)	350	148	350
Topptäckning	0,856	1,00	0,783

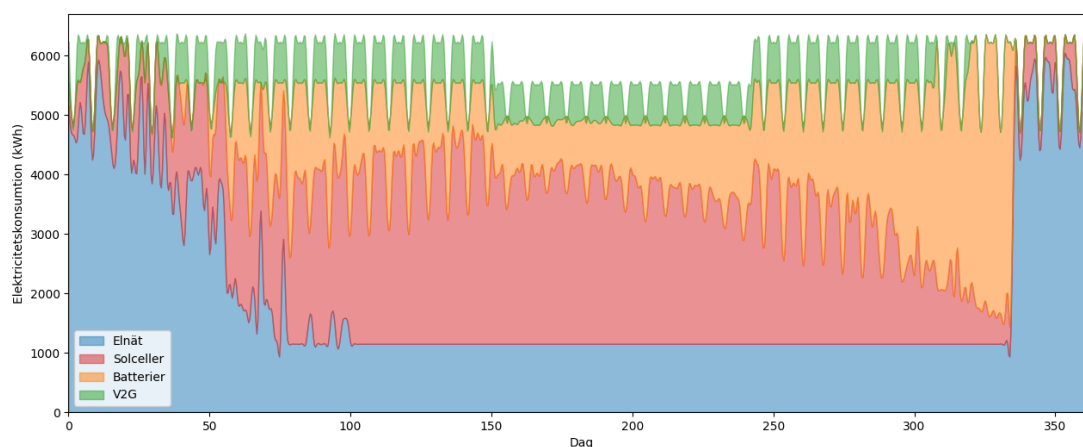
Den årliga elkraftkonsumtionen enligt simuleringsmodellen för hela området med de olika baslasterna visas i figur 2 nedan. Elkraftkonsumtionen är uppdelad på effekttuttag från elnät, batteri, V2G och solceller. En ökad baslast innebär att det totala effekttuttaget från elnätet ökar, samt att den högsta toppen i effekttuttag observeras minska. Vid 20 % respektive 0 % baslast är det maximala effekttuttaget är lika stort (350 kWh) medan det minskar vid 40 % baslast (150 kWh). Vid 40 % baslast uppnår topptäckningen 100 %, vid 20 % uppnås 86 % och vid 0 % baslast uppnår topptäckningen 78 %. Med lägre baslast observeras därmed en lägre topptäckningsgrad följa, då möjligheten till lagring av elkraft minskar. Den direkta användningen

av solkraft är som störst vid 0 % baslast då överskottet att nyttja till uppladdning av lagringsreserver blir mindre utan konstant effektuttag från elnätet. Tvärtom observeras användningen av batterier samt V2G öka med högre baslast av elkraft.



Figur 2: Total elkraftkonsumtion från elnät, batterier, V2G samt solceller för respektive val av baslast.

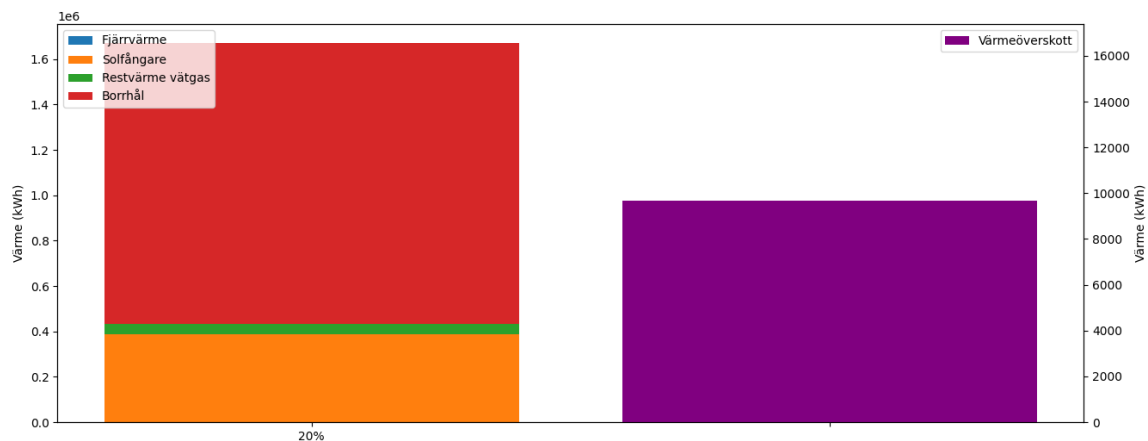
Elkraftkonsumtionen vid standardfallet 20 % baslast visas på dygnsbasis i figur 3. I början och slutet av året då produktionen från solkraft är låg är bostadsområdet beroende av effektuttag från kringliggande elnät. Vätgaslagret och batterierna är tomma samt V2G nyttjas till maxkapacitet. När solkraftproduktionen vartefter ökar prioriteras först uppladdning av elfordon, därefter batteriuppladdning och till sist vätgasproduktion. Under sommarhalvåret observeras effektuttaget från både V2G och batterier minska, då behovet är lägre och solkraftsproduktionen är hög. Därefter nyttjas lagren fullständigt då solinstrålningen minskar under hösten. Vid slutet av året kan man notera en plötslig och kraftig ökning av nyttjandet av elnätet. Detta förklaras med att vätgaslagret samt batterierna fullständigt laddats ut och att solkraften inte längre är tillräcklig för att ladda upp nivån i energilagrena.



Figur 3: Hur elkraftkonsumtionen mätts av elnät, batterier, V2G samt solceller på dygnsbasis vid 20 % baslast. Figuren är förenklad med splines för att öka läsligheten.

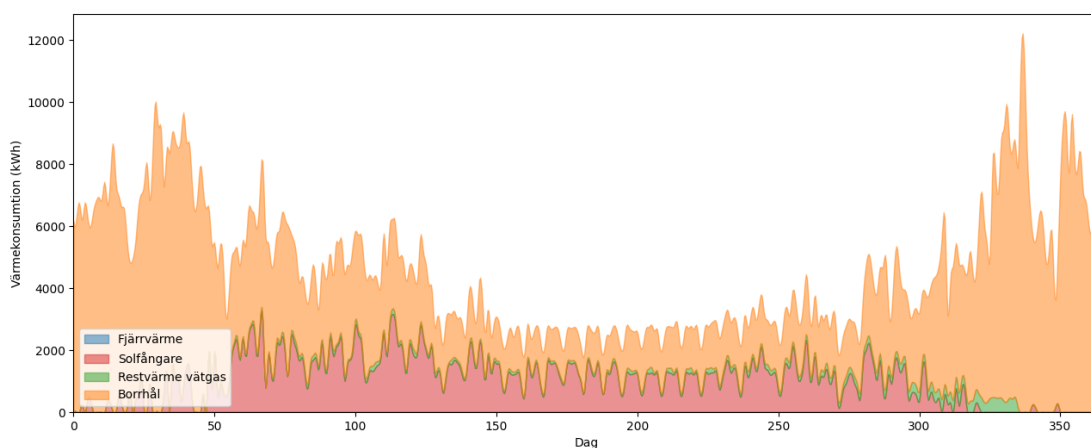
Den resulterande årliga värmekonsumtionen i området från fjärrvärme, borrhålslager, hybridsolceller och restvärme från vätgas tillsammans med den årliga spillvärme som systemet inte kan omhänderta ses i figur 4. Värmesystemet simulerades enbart för standardfallet 20 % baslast av elkraft då den enda skillnaden i värmeproduktion är restvärmen som skapades av vätgas i bränslecellen. Denna bedömdes

vara minimal i relation till de andra värmekällorna. Figur 4 betonar beroendet av borrhålslagret, som står för 71 % av den totala värmeförsörjningen under ett år samt oberoendet av fjärrvärme i detta scenario. Ett termiskt energilager är således väsentligt för att garantera självförsörjning av värme i bostadsområdet. Vidare redovisas den totala spillvärme systemet inte kan omhänderta under året som uppgår till nästan 10 000 kWh. Spillvärmen producerades framförallt under sommarmånaderna och orsakas av att värmeproduktionen översteg behovet samt att lagringsmöjligheten begränsades av pumpeffekten.



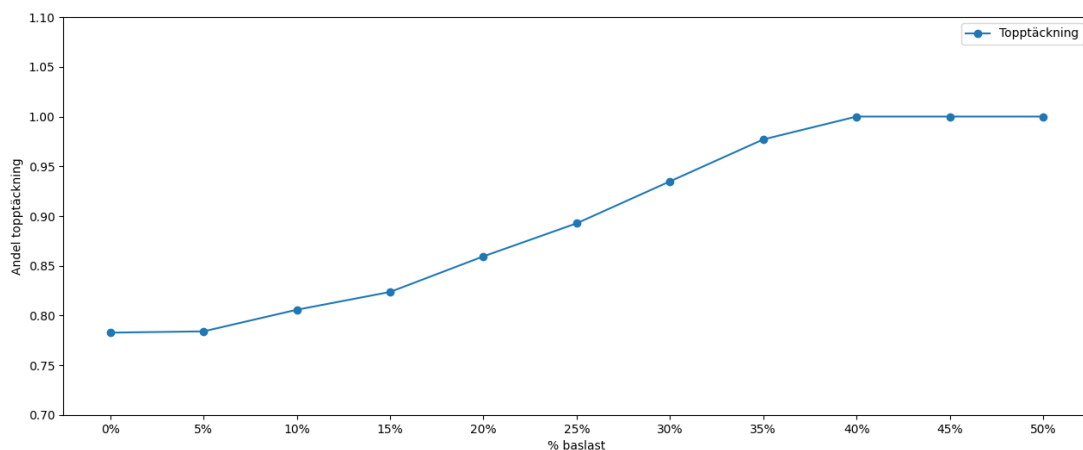
Figur 4: Total värmekonsumtion från fjärrvärme, borrhålslager, hybridsolceller och restvärme från vätgas för 20 % baslast av elkraft tillsammans med årlig spillvärme.

Resultatet över mättad värmekonsumtion visualiseras även på dygnsbasis i figur 5. Under vintermånaderna är värmeproduktionen från hybridsolcellerna låg och borrhålslagret täcker en stor del av värmebehovet. När solinstrålningen ökade närmare sommaren minskade värmebehovet och mättades framförallt av solvärme, men också av uttag från borrhålslagret. Att borrhålslagret behöver nyttjas även under sommaren beror på att solvärmeproduktionen stannar av under natten, då värme fortfarande behövs.



Figur 5: Hur värmekonsumtionen mätas av fjärrvärme, borrhålslager, hybridsolceller och restvärme från vätgas på dygnsbasis. Figuren är förenklad med splines för att öka läsligheten.

Vidare undersöktes korrelationen mellan olika nivåer av baslast av elkraft och topptäckning, se figur 6. Topptäckning har enligt tidigare definierats som andel effekttoppar i elkraftkonsumtion som systemet undviker att ta ut från elnätet genom egenproduktion. Sambandet mellan baslast och topptäckning visar sig korrelera positivt. Den lägsta topptäckningen uppmäts vid 0 % baslast, men uppgår redan då till 0,78. Därefter ökar topptäckningen snarligt en linjär kurva tills den når 1,0 vid baslast 40 %.



Figur 6: Korrelation mellan % baslast av elkraft och andel topptäckning.

4.2 Efterfrågefleksibilitet

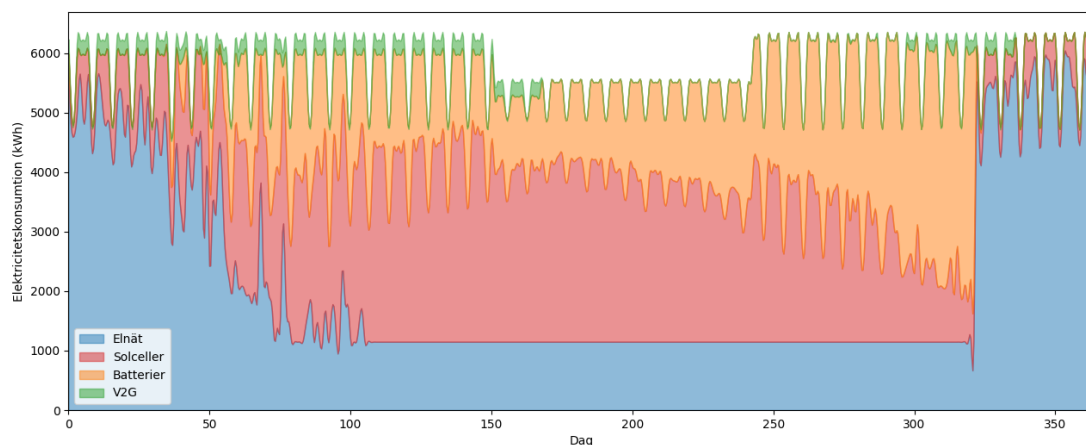
För att utvärdera implementeringen av passiv efterfrågefleksibilitet och dess effekt på systemlösningen simulerades systemet med det justerade elkraftbehovet. I tabell 6 nedan redovisas resultatet för standardfallet med 20 % baslast av elkraft. Vid denna implementering minskar antalet toppar från 783 till 208 under ett år. Systemets förmåga att täcka toppar ökar således med drygt 7 %, däremot följer även att självförsörjningsgraden av elkraft minskar, denna med knappt 4 %. Figur 7 redovisar hur elkraftkonsumtionen mätas då efterfrågefleksibilitet införs. Från figuren observeras att variationen i den årliga konsumtionsprofilen minskar överlag, topplasten minskar och minlasten/minimilasten (minsta förbrukade lasten) ökar. Vidare observeras beroendet av flexibilitetslösningen V2G minska, då antalet toppar i effektuttag minskar med implementerad efterfrågefleksibilitet.

Tabell 6: Resultat med efterfrågefleksibilitet och relativ förändring vid 20 % baslast av elkraft.

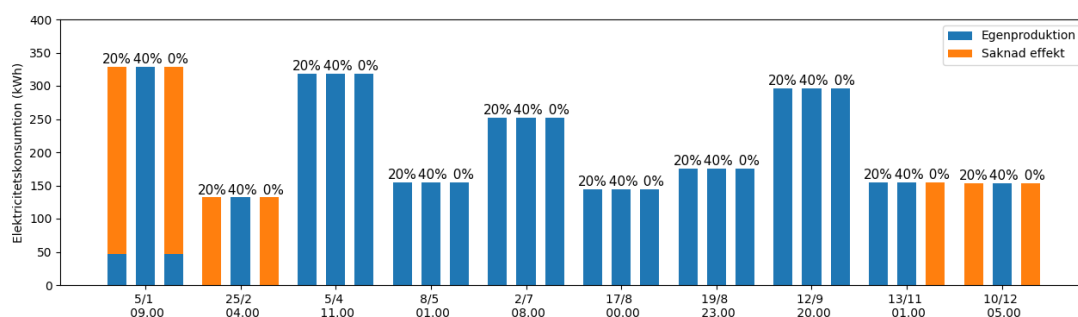
Resultat	Värde	Relativ förändring (%)
Självförsörjning värme	1,00	0,00
Total självförsörjning elkraft	0,613	-4,90
Självförsörjning elkraft exklusive baslast	0,813	-3,74
Spillvärme (kWh)	12 100	25,5
Högsta effektuttag (kWh)	339	-3,03
Topptäckning	0,923	7,40

4.3 Bortfall av elkraft

För att vidare testa systemlösningen simulerades tio strömavbrott om en timma slumpmässigt utvalda under året, se figur 8. Systemets förmåga att återhämta sig från dessa är intressant då det visar på resiliens. Elkraftbortfallen simulerades med de tre olika baslasterna, 20 %, 40 % samt 0 % och antas inte påverka behov, produktion eller nyttjandet av värme. I figuren observeras att under sommarmånaderna lyckas systemet täcka upp samtliga strömavbrott oavsett baslast, men under vintern då produktionen av solkraft är minimal är det enbart systemet med 40 % baslast som hanterar strömavbrotten. Precis som i de ursprungliga simuleringarna korrelerar ökad baslast med både högre självförsörjningsgrad av elkraft samt topptäckning.



Figur 7: Hur elkraftkonsumtionen mätas på dygnsbasis vid 20 % baslast och efterfrågefleksibilitet. Figuren är förenklad med splines för att öka läsligheten.



Figur 8: Resultat av bortfall av elkraft vid de olika baslasterna 20 %, 40 % samt 0 %.

4.4 Känslighetsanalys

Simuleringsmodellen utvärderades med en känslighetsanalys där inverkan av batterikapacitet, solcellsyta, effekttoppsdefinition och värmeåtervinning på självförsörjningsgrad och topptäckning analyserades (Nordlund 2023b). Känslighetsanalysen påvisade ett starkt beroende av ytan klassiska och hybridsolceller, där exempelvis topptäckningen varierade mellan -11 % till +12 % när ytan minskade respektive ökade med 20 %.

5 Diskussion

5.1 Systemlösning

I resultatet jämförs tre scenarier av uttagen baslast från elnätet, från vilket ett uppenbart samband mellan uttagen baslast av elkraft och ett antal fördelar för det lokala energisystemet noteras. Högre topptäckning och mindre högsta effektuttag innebär att systemet belastar omkringliggande nät mindre då baslasten ökar. Dessutom visar simuleringar med strömbortfall att även leveranssäkerheten av elkraft ökar till följd av den ökade lagringsmöjligheten. Trots att scenariot med 0 % baslast kräver minst total elkraft från elnätet behöver det därmed inte vara detta som nödvändigtvis gynnar elnätet mest. Till sist är det även värt att betona systemlösningens effektivitet då hög topptäckning nås även vid låg baslast enligt figur 6.

Med ett batterilager skapas möjligheter till lättillgänglig energi och flexibilitet. De valda batterierna är solcells batterier vilket är fastighetsnära batterier kopplade till solcellsanläggningen. Alternativt finns batterilagringmetoder där andra batterityper, bestående av en eller flera moduler beroende på dess

storlek, samlas på en gemensam yta. Förenklingar, så som bland annat exkludering av batterihälsan och batteriers självförluster, leder till osäkerheter i batterimodellen. Dessutom är det orealistiskt att anta optimala driftförhållanden. Nyttjandet av litiumjonbatterilager medför vissa risker, bland annat brandfara då överladdning kan leda till svårsläckta bränder. Överlag anses dock batterier vara en säker metod för energilagring så länge de uppfyller batteristandard och de regelverk som finns (Elsäkerhetsverket 2022). Solcells batterier har idag höga investeringskostnader och låg lönsamhet, men med den tekniska utvecklingen finns potential för en ökad lönsamhet i framtiden.

Att nyttja vätgas som energilager har stor potential för att stabilisera Tarv Västras energisystem. Genom att producera vätgas då det finns ett överskott av elkraft och sedan nyttja denna i ett senare skede då det istället finns ett underskott, säkerställs ett system med mer effektivt nyttjande av tillgänglig energi vilket påvisas i figur 3. Däremot följer ett antal risker med implementeringen av vätgasproduktion och -lager. Vätgas är explosivt. Miljön måste därför vara gnistfri, tät, klara variationer både i tryck och elkraftproduktion, och till fördel placeras en bit ifrån fastigheterna. Framtida utveckling förväntas ge säkrare lagring och hantering av vätgas då nya tekniker etableras, vilket därmed även förväntas minska de juridiska motsträvigheterna som finns idag på den svenska marknaden gällande vätgashantering i bostadsområden. I och med detta förväntas även kostnaderna för vätgaslagring minska något (Edling & Gudmundsson 2023).

En utmaning för det totala systemet med vätgaslagring är uppskattning av verkningsgraden. Det finns många osäkerheter gällande omvandlingsprocessernas energiförluster, där förluster sker i omvandlingar i flera steg. I modelleringen antas alla förluster ske i form av värmeförluster, samt att värmesystemet kan omhänderta alla dessa. Verkligheten fungerar inte enligt denna förenkling. Med ett klagörande av respektive omvandlingsprocess energiförluster skulle tillförlitligheten i beräkning av verkningsgraden öka.

Det termiska borrhållslagret möjliggör lagring av värme på både dygns- och säsongsbasis vilket ger ett flexibelt och självförsörjande värmesystem illustrerandes i figur 5. Det termiska lagret är dimensionerat utifrån ett existerande borrhållslager, vilket medför att modellerade förhållanden antagligen skiljer sig från de på plats i Tarv Västra. Egna geologiska undersökningar bör utföras för att säkerställa berggrundens lämplighet. Andra nödvändiga förenklingar för att möjliggöra modellering är att systemet antas vara slutet och att tröghet i värmeöverföring och värmeflöden försummas. Vidare utveckling av modellen bör därför övervägas för att få mer tillförlitliga resultat.

Till följd av den snabba utvecklingen och integrationen av elfordon i samhällen bör vidare utveckling av V2G-modellen övervägas. I ett framtida bostadsområde förväntas en ökning av elfordonsflottan, vilket i sin tur ökar elkraftbehovet. Samtidigt kommer antalet laddstolpar att öka kraftigt om varje hushåll installerar egna laddningsstationer. Detta kommer öka vikten i att schemalägga uppladdning till tider med lägre elkraftkonsumtion, vilket inte beaktas i nuvarande modell. Dessutom kommer elkraftbehovet och belastningen öka ytterligare om man antar att en enskild laddstolpe kan nyttjas kontinuerligt under dagen av flera olika fordon istället för att begränsas till ett specifikt fordon. Däremot bör man även betona att med fler elfordon och laddstolpar ökar potentialen av att nyttja V2G i bostadsområdet.

Känlighetsanalysen återfinns i underrapport (Nordlund 2023b) och visar på att självförsörjningsgraden av värme huvudsakligen påverkas av ytan klassiska och hybridsolceller. Denna känslighet kan vara viktig att ta i beaktning då det finns en risk att flertalet solceller förlorar deras funktion samtidigt, till följd av exempelvis skuggning eller tekniska problem. Det går även att utläsa att resultaten av topptäckning och samtlig självförsörjningsgrad av elkraft är känsligast för förändring av ytan solceller. Solcellerna bidrar med den enda egenproduktionen av energi i systemet vilket motiverar systemets känslighet för förändring av denna parameter.

5.2 Efterfrågeflexibilitet

Med hjälp av passiv efterfrågeflexibilitet erhålls en stabilare och mindre oförutsägbar lastprofil, där totala antalet toppar minskar från 783 till 208 under ett år vilket motsvarar en minskning av 73 %. Efterfrågeflexibilitet argumenteras därav ha en stor påverkan genom långsiktiga systembesparingar och

en minskad risk för överbelastning av elkraftsystemet. Ännu bättre resultat kan troligtvis erhållas om aktiv istället för passiv efterfrågefleksibilitet nyttjas för att styra slutanvändarens elkraftkonsumtion. Med aktiv styrning av lastprofilen kan variationerna i produktionsprofilen ännu tydligare bemötas, vilket medför att antalet toppar minimeras. Aktiv efterfrågefleksibilitet förväntas därför leda till ett ännu effektivare elkraftsystem med jämnare frekvenshållning, fler generella systembesparingar och större ekonomiska vinster.

Vid jämförelse av figur 3 och 7 illustrerande elkraftkonsumtionsmättnaden med och utan efterfrågefleksibilitet påvisas flexibilitetens påverkan på totala systemlösningen. Den främsta och dessutom mest förväntade skillnaden är systemets förmåga att täcka toppar, som ökar då konsumtionsprofilen förändras. Enligt argumenten ovan innebär detta flertal positiva systembesparingar. Emellertid minskar självförsörjningsgraden av elkraft vilket således innebär att systemet är mer beroende av omkringliggande elnät. Denna ökning beror på att den nya konsumtionsprofilen ökar elkraftbehovet vissa timmar då egenproduktionen inte längre räcker till. Med efterfrågefleksibilitet minskar beroendet av V2G vilket fördelaktigt kan öka elfordonsbatteriernas livslängd, dessvärre minskar också nyttan av V2G och den mister sitt syfte.

För att inte förlora nyttan av V2G kan tekniken implementeras som en typ av efterfrågefleksibilitetslösning som kan bidra till systemet genom att öka den totala flexibiliteten. Med passiv styrning av V2G schemaläggs laddningen av elfordon vilket innebär viss förbättring för systemlösningen, men med aktiv styrning skulle nyttan från lösningen ännu tydligare påvisas. V2G skulle därmed fungera både som flexibilitets- och efterfrågefleksibilitetslösning, där respektive lösning fördelar skulle gynna systemet.

5.3 Bortfall av elkraft

Från simuleringarna med strömbortfall konstateras det att fyllnadsgraden i energilagren ökar med högre baslast av elkraft. Således blir systemet bättre förberett att handskas med eventuella strömavbrott då en högre baslast nyttjas. Detta garanterar däremot inte att systemet kan hantera varje strömavbrott. Om längre och flera avbrott simuleras riskeras förmågan att hantera dessa att förloras. I och med kapacitetsbrist i elnät, utökning av intermittent energiproduktion och instabila geopolitiska situationer blir frågan om resiliens mycket viktig. Sannolikheten för längre och fler bortfall av elkraft ökar därför och måste tas hänsyn till vid framtida byggnationer. Systemlösningarna medför också en risk av lokala bortfall av elkraft. På grund av ett komplext samspel mellan delsystemen ökar risken att hela systemet kollapsar till följd av ett delsystem. Förmågan av kommunikation och nödlösningar delsystemen emellan blir således av stor vikt för att förhindra problem. Sammanfattningsvis visar resultatet att en ökad baslast av elkraft ökar leveranssäkerheten av elkraft i bostadsområdet men att risker fortfarande kvarstår.

6 Slutsatser

Simulering av elkraft- och värmekonsumtion med 20 % baslast från elnätet resulterade i 64 % total självförsörjningsgrad av elkraft samt 86 % topptäckning. Att öka och minska baslasten till 40 % respektive 0 % resulterade i 60 % respektive 70 % total självförsörjningsgrad av elkraft. Andelen topptäckning uppgick till 100 % respektive 78 %. I samtliga fall är självförsörjningsgraden av värme 100 %. Vidare visar efterfrågefleksibilitet ha en stor effekt på systemets topptäckning, som ökar med 7,4 %.

Vid simulering av momentana elkraftsbortfall visas en korrelation mellan ökande baslast och systemets förmåga att hantera slumpmässiga strömbortfall. 100 % av bortfallen hanteras med 40 % baslast, 70 % med 20 % baslast samt 60 % med 0 % baslast.

Avslutningsvis finns ett behov av både energilagring och flexibilitetslösningar i det framtida bostadsområdet Tarv Västra för att uppnå en hög grad av energisjälvständighet och avlasta omkringliggande nät. Med hjälp av termisk lagring, vägaslagring samt batterier kan hela värmebehovet och stora delar av elkraftbehovet tillgodoses. Med V2G-teknik samt efterfrågefleksibilitet kan även elnätet avlastas avsevärt med avseende på antal uttagna effekttoppar.

7 Referenser

- Andrén, R. (2022). *Förslag till Sveriges nationella strategi för vätgas, elektrobränslen och ammoniak*. (2021:34). Energimyndigheten: Bromma
- Boverket (2022). *Läget på bostadsmarknaden i riket*. <https://www.boverket.se/sv/samhallsplanering/bostadsmarknad/bostadsmarknaden/bostadsmarknadsenkaten/region-kommun/riket/>. [2023-05-05]
- Carlstedt, C. (2010). *Hållbarhetsaspekter på tillvaratagande av spillvärme i borrhålslager - ur ett företags- och samhällsperspektiv*. Uppsala Universitet. Masterprogram i hållbar utveckling.
- Edling, C. & Gudmundsson, L. (2023). *Vätgas. Potential till flexibilitet och energilagring - Underrapport*
- Elsäkerhetsverket (2022). *Säkerhetsrisker med batterilager*. <https://www.elsakerhetsverket.se/privatpersoner/din-elanlaggning/bygga-och-renovera/installation-av-batterilager/sakerhetsrisker-med-batterilager/> [2023-05-12]
- Energimarknadsinspektionen (u.å). *Efterfrågefleksibilitet - En outnyttjad resurs i kraftsystemet*. <https://www.ei.se/download/18.d4c49f01764cbd606218b3b/1617109641860/Efterfragefleksibilitet-en-outnyttjad-resurs-broschyr.pdf>. [2023-04-20]
- Energimyndigheten (2023). *Energiläget*. <https://www.energimyndigheten.se/statistik/energilaget/>. [2023-05-05]
- Europeiska rådet (2023). *Parisavtalet om klimatförändringar*. <https://www.consilium.europa.eu/sv/policies/climate-change/paris-agreement/>. [2023-05-05]
- Felseghian, R-A., Carcadea, E., Raboaca, M.S., Trufin, C.N. & Filote, C. (2019). Hydrogen Fuel Cell Technology for the Sustainable Future of Stationary Applications. *Energies*. 12(23), 10-16. <https://doi.org/10.3390/en12234593>
- Fransson, M. (2023). *Värmebehov. Potential till flexibilitet och energilagring - Underrapport*
- Free Energy (2023). *Free Energy*. <https://www.free-energy.com/se/solenergi#section-1>. [2023-04-13]
- Fröberg, N. & Mehdipoor, E. (2020). *Kan installationen av smarta elnätstjänster i bostäder bidra till ökad efterfrågefleksibilitet?* Kungliga Tekniska Högskolan. Civilingenjörsprogrammet inom Energi och Miljö
- Gullberg, Y. (2023). Muntlig referens. Information om framtida bostadsområdet Tarv Västra. [Mars 2023]
- Harris, C.B. & Webber, M.E. (2012). A temporal assessment of vehicle use patterns and their impact on the provision of vehicle-to-grid services. *Environmental Research Letters*. 7(3), DOI:10.1088/1748-9326/7/3/034033
- Huawei (u.å.a). *LUNA2000-5/10/15-S0 Technical Specification*. https://solar.huawei.com/es-ES/download?p=%2F-%2Fmedia%2FSolar%2Fattachment%2Fpdf%2Fen%2Fdatasheet%2Fluna2000-5-15-s0_eu_20230128.pdf [2023-04-13]
- IRENA (2015). *Battery storage for renewables: Market status and technology outlook*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_Battery_Storage_report_2015.pdf [2023-04-04]
- Karlsson, A. (2020). *Trygg energiförsörjning Uppsala län – regeringsuppdrag om eleffekt*. (Länsstyrelsens Meddelandeserie 2020:3). Uppsala: Länsstyrelsen i Uppsala län
- Knivsta Kommun (2020). *Utvecklingsprogram Knivsta 2035*. <https://knivsta.se/download/18.1d00564a17250d8c4bd641d/1590658500331/Projektdirektiv%20Utvecklingsprogram%20Knivsta%202035%2000219.pdf>. [2023-05-05]
- LeRoy, R.L. & Stuart, A.K. (1981). Advanced unipolar electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 6(6), 589-599. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(81\)90024-0](https://doi.org/10.1016/0360-3199(81)90024-0)
- Lindberg, A. (2023). *Batterier. Potential till flexibilitet och energilagring - Underrapport*
- Naturskyddsföreningen (2021). *Vanliga frågor om vindkraft*. <https://www.naturskyddsforeningen.se/artiklar/vanliga-fragor-om-vindkraft/>. [2023-05-12]
- Naturskyddsföreningen (2023). *Hur fungerar solceller och solfångare?*. <https://www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/hur-fungerar-solceller-och-solfangare/> [2023-04-17]
- Nilsson, M. & Samuelsson, S. (2015). *Energitjänst för efterfrågefleksibilitet*. Linköpings Universitet. Civilingenjör i Energi - Miljö - Management

- Nohrstedt, L. (2017). *Utvecklingen av solceller brukar delas in i tre generationer. Här är en guide till olika typer av solceller.* <https://www.nyteknik.se/energi/guide-solcellernas-tre-generationer/620975>. [2023-04-17]
- Nordlund, F. (2023a). *Elbehov. Potential till flexibilitet och energilagring - Underrapport*
- Nordlund, F. (2023b). *Känslighetsanalys. Potential till flexibilitet och energilagring - Underrapport*
- Nordlund, F. (2023c). *Vehicle-to-grid. Potential till flexibilitet och energilagring - Underrapport*
- Nordlund, F. (2023d). *Pythonkod. Potential till flexibilitet och energilagring - Underrapport*
- Ohm, T. (2023). *Termisk energilagring. Potential till flexibilitet och energilagring - Underrapport*
- Sapru, K., Stetson, N.T., Ovshinsky, S.R., Yang, J., Fritz, G., Fairlie, M. & Stuart, A.T.B. (1997). Development of a Small Scale Hydrogen Production-Storage System for Hydrogen Applications. *IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (Cat. No.97CH6203)*. 3, 1947-1952. <https://doi.org/10.1109/IECEC.1997.656724>
- SCB (2023). *textitEltillförsel i Sverige efter produktionsslag. År 1986-2021.* https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__EN__EN0105__EN0105A/EIProdAr/. [2023-05-05]
- Singla, M.K., Nijhawan, P. & Oberoi, A.S. (2021). Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 28, 15607-15626. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12231-8>
- Shiva Kumar, S. & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*. 2(3), 442-454. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>
- SMHI (2023). *STRÅNG-data.* <https://strang.smhi.se/extraction/index.php>. [2023-04-12]
- Sveby (2012a). *Brukarindata bostäder.* https://www.sveby.org/wp-content/uploads/2012/10/Sveby_Brukarindata_bostader_version_1.0.pdf. [2023-04-02]
- Sveby (2012b). *Brukarindata kontor.* <https://www.sveby.org/wp-content/uploads/2013/06/Brukarindata-kontor-version-1.1.pdf>. [2023-04-02]
- Sveby (2012c). *Brukarindata undervisningsbyggnader.* <https://www.sveby.org/wp-content/uploads/2016/05/Sveby-Brukarindata-undervisning-1.0-160525.pdf>. [2023-04-02]
- Svenska kraftnät (Svk) (2022). *Lagring av el – omvärldsanalys.* (Svk 2022/2773). Sundbyberg: Svenska kraftnät.
- Sveriges geologiska undersökning (2021). *Borrhålslager - lagring av värme och kyla.* https://passipedia.org/planning/thermal_protection/integrated_thermal_protection#u-values. [2023-04-13]
- Thore, A. (2019). *Smart Village: Självförsörjande energisystem i framtidens kvarter – en förstudie.* (10272497). Stockholm: WSP.
- Zimmermann, J.P. (2009). *End-use metering campaign in 400 households in Sweden, assessment of the potential electricity savings.* Eskilstuna: Energimyndigheten.
- Züttel, A. (2004). Hydrogen storage methods. *Die Naturwissenschaften*. 91, 157-172. <https://doi.org/10.1007/s00114-004-0516-x>