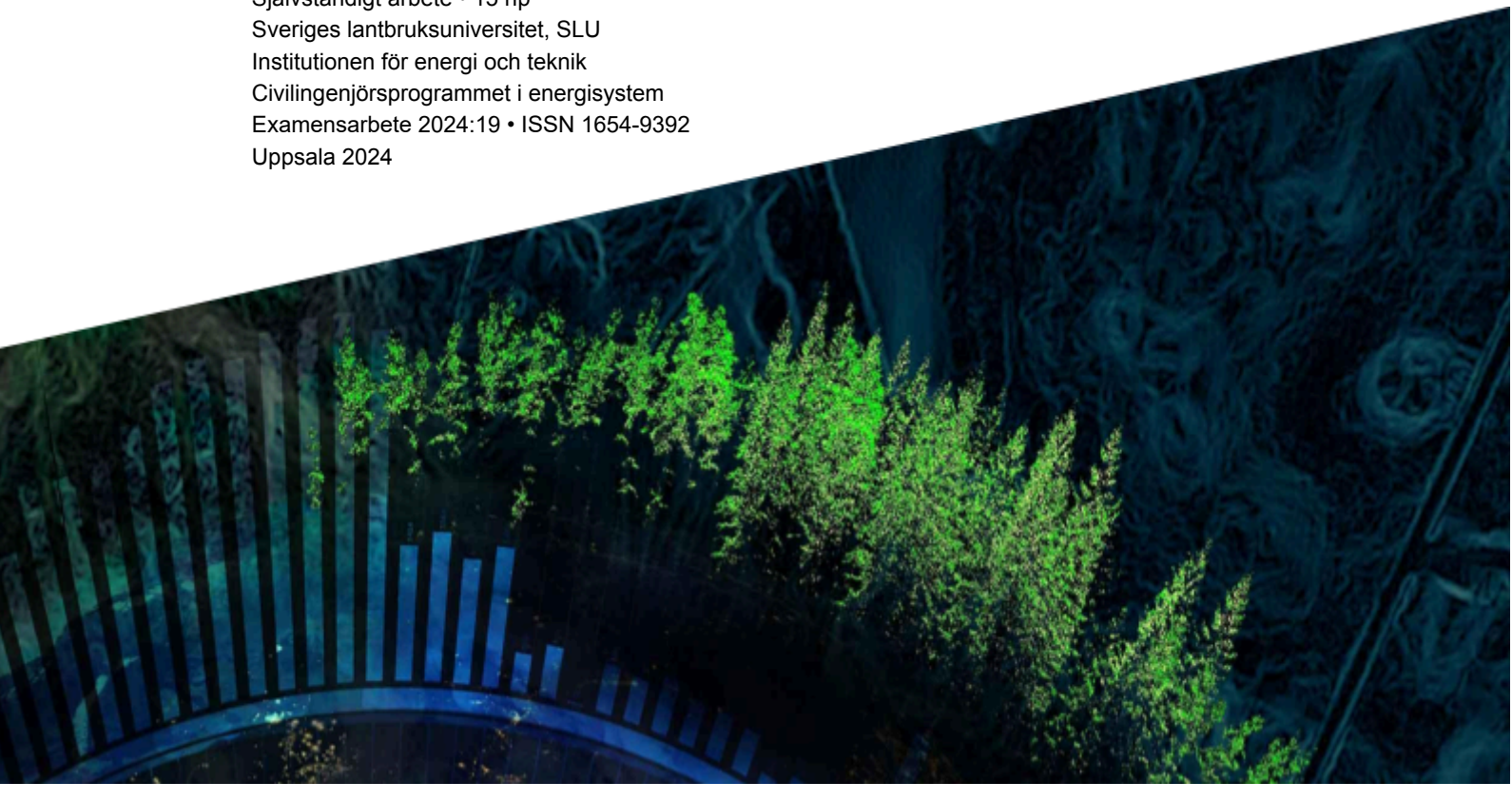




Långtidslagring av energi för småskaligt lantbruk på Mälsta gård

Oskar Andersson
Vendela Hallgren
Nilo Javani
Ida Johnsson
Josefin Landgren
Kalle Lindell
Amanda Terlinder

Självständigt arbete • 15 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institutionen för energi och teknik
Civilingenjörsprogrammet i energisystem
Examensarbete 2024:19 • ISSN 1654-9392
Uppsala 2024



Långtidslagring av energi för småskaligt lantbruk på Mälsta gård

Long-term energy storage for small-scale agriculture at Mälsta farm

Oskar Andersson
Vendela Hallgren
Nilo Javani
Ida Johnsson
Josefin Landgren
Kalle Lindell
Amanda Terlinder

Handledare: Gunnar Larsson, institutionen för energi och teknik
Examinator: David Ljungberg, SLU, institutionen för energi och teknik

Omfattning: 15 hp
Nivå och fördjupning: Grundnivå, G2E
Kurstitel: Självständigt arbete i energisystem
Kurskod: EX0946
Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem
Kursansvarig inst.: Institutionen för energi och teknik
Utgivningsort: Uppsala
Utgivningsår: 2024
Upphovsrätt: Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.
Serietitel: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)
Delnummer i serien: 2024:19
ISSN: 1654-9392

Nyckelord: energilagring, energiproduktion, batterier, vätgas, monokristallina solceller, vertikal vindturbin, småskalig vindturbin, ö-drift

Sveriges lantbruksuniversitet
Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Abstract

The small-scale Mälsta farm near Knivsta is committed to sustainability, focusing on energy savings and self-sufficiency. The farm spans 4 hectares, including 3 hectares of arable and pasture land, supporting small-scale animal husbandry and household cultivation. Since 1994, energy efficiency measures such as solar and geothermal heating, solar panels, a water-jacketed wood stove, additional insulation, and LED lighting have reduced electricity consumption from 50,000 kWh to 12,500 kWh per year by 2022.

To further enhance self-sufficiency, Mälsta farm aims for 24-hour island operation, prioritized island operation for three weeks, and long-term total self-sufficiency in energy and sewage. Key strategies include expanding ground and roof-mounted monocrystalline solar panels and initially considering a vertical wind turbine. However, due to low wind speeds and high costs, wind turbines were deemed unfeasible. Instead, monocrystalline solar panels were prioritized. Despite their limited energy production period, they can provide a stable energy supply year-round when combined with storage solutions.

By collecting wind and solar data, simulations were performed to model energy production and compare it to the farm's energy consumption. This analysis determined the optimal energy storage solution, which includes an 8000 kWh hydrogen system and a 30 kWh lithium-ion battery. The hydrogen system is intended for long-term energy storage from summer to winter, while the lithium-ion battery provides short-term storage for heating and lighting at night. Batteries are primarily used due to their higher efficiency, with hydrogen production occurring only when the batteries are fully charged.

Innehåll

1	Introduktion	3
1.1	Syfte	3
1.2	Frågeställningar	3
1.3	Avgränsningar	3
2	Alternativ för lagring av energi	4
2.1	Vätgas	4
2.1.1	Elektrolysör	4
2.1.2	Lagring	4
2.1.3	Bränslecell	4
2.2	Batterier	5
2.2.1	Flödesbatterier	5
2.2.2	Litium-jon batterier	6
2.3	Ekonomi	6
2.4	Alternativa lagringsmetoder	7
3	Material och metoder	8
3.1	Mälsta Gård	8
3.2	Energiproduktion	9
3.2.1	Vindenergi	9
3.2.1.1	Horisontella vindturbiner	9
3.2.1.2	Vertikala vindturbiner	10
3.2.1.3	Datainsamling	10
3.2.1.4	Modellering och simulering i Python	10
3.2.2	Solceller	10
3.2.2.1	Kristallina solceller	11
3.2.2.2	Tak- och markbaserade solcellspaneler	11
3.2.2.3	Datainsamling	11
3.2.2.4	Modellering och simulering i Python	12
3.3	Ekonomi	12
3.4	Energilagring och allokering av energi	12
3.5	Systembeskrivning	13
4	Resultat	14
4.1	Energiproduktion - vindsnurror	14
4.2	Energiproduktion - solceller	14
4.3	Systemsimulering	15
5	Resultatsanalys	18
5.1	Ö-drift i 24 timmar	18
5.2	Prioriterad Ö-drift i tre veckor	18
5.3	Långsiktig Ö-drift	18
6	Slutsats	19
7	Referenser	20
8	Delrapporter	21

1 Introduktion

Elpriserna har under de senaste åren ökat samtidigt som det har blivit vanligare att kapacitetsbrist uppstår. Detta är ett problem som ägaren till Mälsta gård utanför Knivsta uppmärksammat. För att kunna säkra den egna energiförsörjningen har gårdsägaren höga ambitioner om att kunna gå i ö-drift med egenproducerad energi samt goda möjligheter till energilagring. Gården har, från 1994 till 2023, minskat energikonsumtionen från 50 000 kWh per år till 12 000 kWh per år. Denna minskning har varit möjlig genom beteendeförändringar tillsammans med viktiga energieffektiviseringsåtgärder som isolering, LED-belysning och vattenuppvärmning. Utöver detta har även en vattenmantlad vedspis och flertalet solceller installerats på gården för att kunna täcka en del av energibehovet. Det finns goda möjligheter till fortsatt utbyggnation av solceller men även potential till installation av en småskalig vindturbin.

En viktig utmaning har varit energilagringens roll och hur den kan optimeras för att ta vara på så mycket energi som möjligt. Solceller tillåter mycket större energiproduktion på sommarhalvåret jämfört med vinterhalvåret vilket skapar problematik då energikonsumtionen är större på vintern än på sommaren. Planen är att kunna jämna ut detta med hjälp av effektiv energilagring.

1.1 Syfte

Syftet med detta projekt är att utveckla en hållbar energilösning för Mälsta gård som möjliggör fullständig ö-drift under 24 timmar, prioriterad ö-drift under tre veckor, och på längre sikt, att kunna driva gården helt avgränsad från det allmänna elnätet. Med prioriterad ö-drift menas att diverse väsentliga elbehov som ska fortgå. Följande behov ska täckas: fyra stycken värmecirkulationspumpar, kyl och frys, vattenpump och laddning av mindre elektroniska apparater/LED-lampor. Projektet fokuserar på att öka energiproduktionen samt att lagra denna energi på kort sikt med hjälp av batterier, och på lång sikt med hjälp av vätgas.

1.2 Frågeställningar

- Hur kan förnybar energiproduktion i samband med energilagring implementeras på Mälsta gård i syfte att bli självförsörjande?
- Hur kan energilagring implementeras för att möjliggöra total ö-drift i 24 timmar?
- Hur kan energilagring implementeras för att möjliggöra prioriterad ö-drift i 3 veckor där det säkerställs att viktiga funktioner bibehålls?
- Hur kan energilagring implementeras för att möjliggöra total ö-drift på längre sikt?

1.3 Avgränsningar

Arbetet är geografiskt begränsat till området för Mälsta gård, beläget i Knivsta kommun. Tekniskt sett begränsas projektet till att implementera vindsnurror, solceller och lagringssystem. Rapporten berör endast produktion och lagring av el. Ett kontrollsystem för hur dessa delar ska samverka inkluderas inte i rapporten. Dessutom görs en ekonomisk avgränsning då inga kostnader för implementation tas hänsyn till för att uppnå syftet. Däremot tas kostnader upp i ett upplysande syfte.

2 Alternativ för lagring av energi

2.1 Vätgas

Användningen av vätgas som energilager för förnybar energi kan delas upp i tre steg, produktion av vätgas, lagring av vätgas och slutligen förbränningen av vätgas vilket resulterar i el och värme. Denna process resulterar i noll miljöfarliga växthusgaser och lagringen i sig kräver ingen energi. Syftet med denna metod är att lagra energi från sommaren då energiproduktionen är hög och konsumtionen låg till vinter då det är vice versa, hög energikonsumtion och låg produktion. Verkningsgraden elmässigt hos en vätgasanläggning är drygt 40 procent och lagringen sker i princip med noll energiförluster över. Förlusterna uppstår istället vid omvandlingen från el till väte och vice versa. Det produceras även lika mycket värmeenergi som el vid förbränningen av vätgasen i bränslecellen. (Delrapport 5)

2.1.1 Elektrolysör

En elektrolysör består av en anod och en katod vilka separeras av ett membran. Dess funktion är att omvandla tillsatt vatten och el till vätgas och syrgas genom att spjälka vattenmolekylerna. Det finns i dagsläget tre typer av elektrolysörer, proton exchange membrane electrolysis cell (PEMEC), solid oxide electrolysis cell (SOEC) och alkaliska elektrolysörer, där PEMEC och alkaliska är kommersiellt gångbara. PEMEC kostar mer än alkalisk men har mindre läckage. PEMEC har även bättre dynamisk prestanda och kan hantera intermittent eltillförsel vilket är fallet för småskalig förnybar elproduktion. Fördelar med alkaliska elektrolysörer är att de är billigare. De drivs vid en lägre temperatur och kräver en mer konstant eltillförsel. Verkningsgraden för olika typer av elektrolysör varierar vanligtvis mellan 62 och 82 procent och beräknad livslängd är upp till 15 år. (Delrapport 5)

2.1.2 Lagring

Den lagringsmetod som är bäst anpassad till småskalig vätgaslagring är trycksatt gas vilket också också är den mest kommersiellt gångbara metoden. Denna metod är också säker, kostnadseffektiv och har en verkningsgrad på 95%. Idag är stålcyndrar den mest välkända metod för att lagra vätgasen men det produceras även kompositcyndrar som klarar högre tryck vilket ger högre energidensitet. Dessa byggs vanligtvis i glas eller kolfiber och medför markant högre tillverkningskostnader. Livslängden för själva tanken i en vätgasanläggning är cirka 25 år. (Delrapport 5)

2.1.3 Bränslecell

För att omvandla den lagrade vätgasen tillbaka till el samt värme används en bränslecell. Likt elektrolysörerna finns det tre huvudsakliga kategorier av bränsleceller, alkaliska, proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) och solid oxide fuel cell (SOFC). Alkaliska bränsleceller utvecklades tidigast och används i nuläget primärt på rymdfordon. Även PEMFC används idag för att driva fordon men landbaserat. Denna typ av bränslecell är liten och kompakt och passar därför utmärkt för fordon. Den är även väldigt kostnadseffektiv. (Delrapport 5)

SOFC är bäst anpassad för storskalig stationär lagring av vätgas, metoden har höga drifttemperaturer och har därför en snabb reaktionstid. Nackdelar jämfört med PEM-

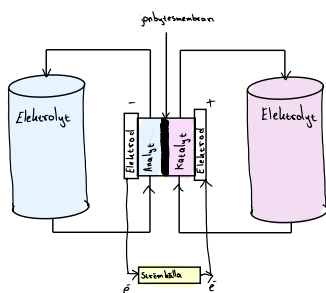
FC metoden har längre uppstartstid, sämre energieffektivitet och kortare livslängd då PEMFC drivs vid lägre temperaturer vilket sliter mindre på komponenter. Den generella verkningsgraden för bränsleceller ligger mellan 40 och 65 procent beroende på modell. Även livslängden skiljer sig rejält beroende på modell, SOFC har en livslängd på cirka 15 000 timmar och PEMFC har 30 000 timmar. (Delrapport 5)

2.2 Batterier

Batterier kan delas in i olika underkategorier beroende på typ. Här tas flödesbatterier och litiumjon batterier upp som olika två alternativ för det ämnade syftet.

2.2.1 Flödesbatterier

Sekundära batterier är sådana som besitter egenskapen att de är återuppladdningsbara. Till denna grupp hör bland annat flödesbatterier. Processen för alla sekundära batterier är väldigt liknande med en elektrolys. Speciellt med flödesbatterier är att elektrolyterna är upplösta i flytande form i två separata tankar, det finns flera typer av dessa men den vanligaste och den som tas upp i rapporten är vanadin (23V). Dessa batterier kallas vanadin redod flödesbatterier (VRFB). Det finns en anolyt- och en katolytsida som skiljs av ett jonbytesmembran. När batteriet laddas ur vandrar joner från anod- till katodsidan vilket tillåter elektroner att börja strömma vilket genererar en ström. När alla molekyler i anoden har släppt sina elektroner och joner är batteriet fullt urladdat. Vid uppladdning sker processen åt andra hållet så att anodsidan kan börja om att släppa igenom joner och elektroner till katodsidan. Verkningsgraden är ungefär 85 procent. Figur 1 visar en schematisk bild av ett flödesbatteri. (Delrapport 2)



Figur 1 – Schematisk bild av ett flödesbatteri

En fördel med VRFB är att de kan laddas upp och ur till 100 procent utan att ta skada och de har i regel relativt lång livstid. Självurladdningen är väldigt låg men om batteriet blir sämre går det att byta ut elektrolyterna för att förnya batteriet. En annan fördel med att ha två tankar utanför själva elektrolysdelen är att det enkelt går att justera storleken på dessa. Det skapar en flexibilitet hos batteriet då det går att anpassa energi- och effektkapaciteten för att passa specifika applikationer. Att det är två tankar med vätska, ofta utblandat i vatten, minskar risken för överhettning eller explosion vilket är en betydande egenskap.

Flödesbatteriernas främsta nackdel är den låga energidensiteten som begränsar viss mobil användning eftersom batterierna behöver vara ganska stora. I dagsläget finns det dessvärre inte flödesbatterier lättillgängligt på marknaden för kommersiellt bruk. Tekniken är fortfarande under utveckling och det finns begränsad information kring användning och resultat av flödesbatterier i sammanhang som liknar det vid Mälsta gård. (Delrapport 2)

2.2.2 Litium-jon batterier

Även Litium-jon (Li-jon) batterier tillhör sekundära batterier och fungerar teoretiskt väldigt liknande VRFB. På samma sätt sker en elektrolys i mitten av ett anod- och ett katodmaterial som skiljs av med ett membran. Hos Li-jon batterier är elektrolyterna däremot fasta ämnen. I denna rapport granskas ett litium-järn-fosfat batteri (LiFePO_4). Dessa batterier har en verkningsgrad på cirka 90 procent. (Delrapport 2)

Li-jon batterier har en mycket hög energidensitet vilket gör dem mer behändiga än flödesbatterier. De kan byggas i mindre skalor men leverera en hög effekt vilket gör att de lämpar sig bra för mobilt bruk. En viktig skillnad från VRFB är att Li-jon batterierna bör hållas inom 20 – 80% av dess laddningskapacitet för att inte förlora kvalitet. De ska idealt hållas vid 25°C för att fungera så effektivt som möjligt. Även om detta följs sker ändå en viss degradering av kapacitet beroende på antalet avverkade laddningscykler, trots att självurladdningen är relativt låg. Efter en viss tid behöver batterierna bytas ut helt. Just LiFePO_4 har en något lägre energidensitet än andra typer av Li-jon batterier men vägs upp av att de är säkrare, besitter en termisk stabilitet och har en längre livstid. Därav väljs litiumjon batterier som det alternativ som ska användas på Mälsta gård. (Delrapport 2)

2.3 Ekonomi

Priset på en komplett vätgasanläggning kan variera mycket beroende på valet av komponenter, främst elektrolysör, lagringsmetod samt bränslecell. Idag bedöms en vätgasanläggning passande en gårds storlek kosta drygt fem miljoner kronor och vara kapabel till att leverera 7 000 kWh el plus lika mycket termisk energi i form av 65-70 gradig värme. Investeringskostnaden är hög, men ska man istället lagra lika mycket el i batterier kostar det upp emot 45 miljoner kronor. (Delrapport 5)

Kostnader för batterier är relativt höga men skiljer sig mycket beroende på vilken typ som efterfrågas. Generellt kan sägas att Li-jon batterier har ett prisspann på 2 200 -

9 030 SEK/kWh och VRFB har installationskostnader på 3 800 - 11 300 SEK/kWh. De breda intervallen speglar den mängd varianter som finns av olika batterier. Eftersom det är teknik som ständigt är under utveckling förväntas båda sjunka i pris med åren (IRENA [2017](#)).

Vid installation av batterier kopplade till egna energikällor krävs även en omvandlare som kan optimera strömmen från energikällan till batteriet. Detta blir en betydande del av investeringskostnaden. Vid flera olika energikällor, exempelvis vindsnurra och solceller, behövs det en omvandlare till varje modul. Flödesbatterier har i regel högre investeringskostnader än litium-jon batterier men flödesbatterier har även längre livstid. Li-jon batterier har högre verkningsgrad och är mindre vilket minskar förluster vid drift. (Delrapport 2)

2.4 Alternativa lagringsmetoder

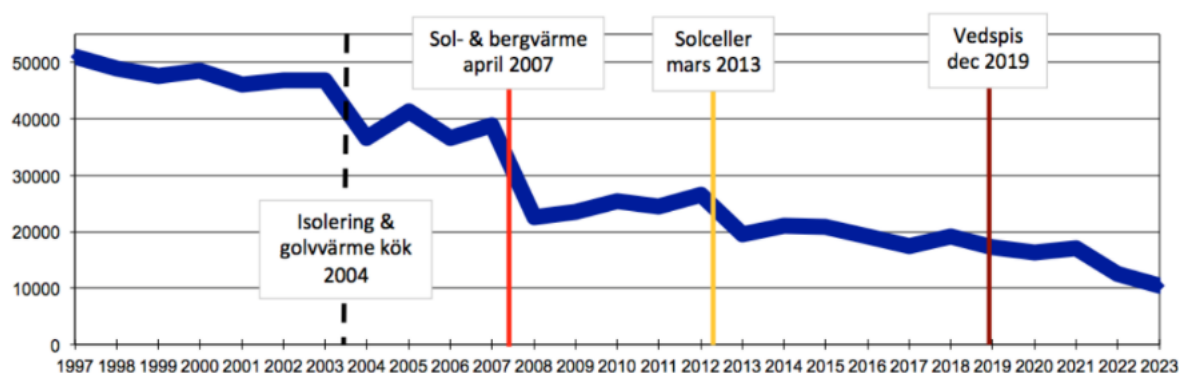
Två lagringsmetoder som undersökts som alternativ till batteri- och vätgaslagring är svänghjul och ammoniak. Svänghjul är en typ av korttidslagring som oftast lagrar energin i några sekunder men det finns även modeller där lagringen kan vara i några timmar. Den korta lagringstiden gör att dessa till största del används för att möta effekttoppar. På grund av denna korta lagringstid samt att Mälsta gård inte har särskilt höga effekttoppar anses detta inte vara ett bra alternativ för gården. Ammoniak är en typ av långtidslagring som liknar principen för vätgaslagring. Fördelen med ammoniak är att den är mer lätthanterlig och har högre energiinnehåll. Processen för att framställa ammoniak är dock mer energikrävande vilket gör att det inte är lönsamt att framställa ammoniak i mindre skalor. På grund av detta väljs ammoniak bort som alternativ för långtidslagring på gården. (Delrapport 4)

3 Material och metoder

3.1 Mälsta Gård

På Mälsta gård bedrivs småskalig djurhållning med hästar och får samt odling för eget bruk. Gården omfattar totalt 4 hektar mark varav 3 hektar används som åker- och odlingsmark. Gården består av huvudbyggnaden, en stallbyggnad, ett magasin och ett torrdass. I södra stallängan finns även en lägenhet. När gården köptes 1994 låg andelen köpt el under de första åren på 50 000 kWh per år. Sedan dess har en rad åtgärder vidtagits vilket har minskat mängden köpt el över åren. Gårdsägaren implementerade år 2004 isolering och golvvärme i köket. 2007 implementerades sol- och bergvärme. Sex år senare, år 2013, implementerades solceller och den slutgiltiga åtgärden skedde 2019 då en vedspis införskaffades. Dessa åtgärder har resulterat i ett minskat energibehov samt ökad energiproduktion vilket har minskat mängden köpt el.

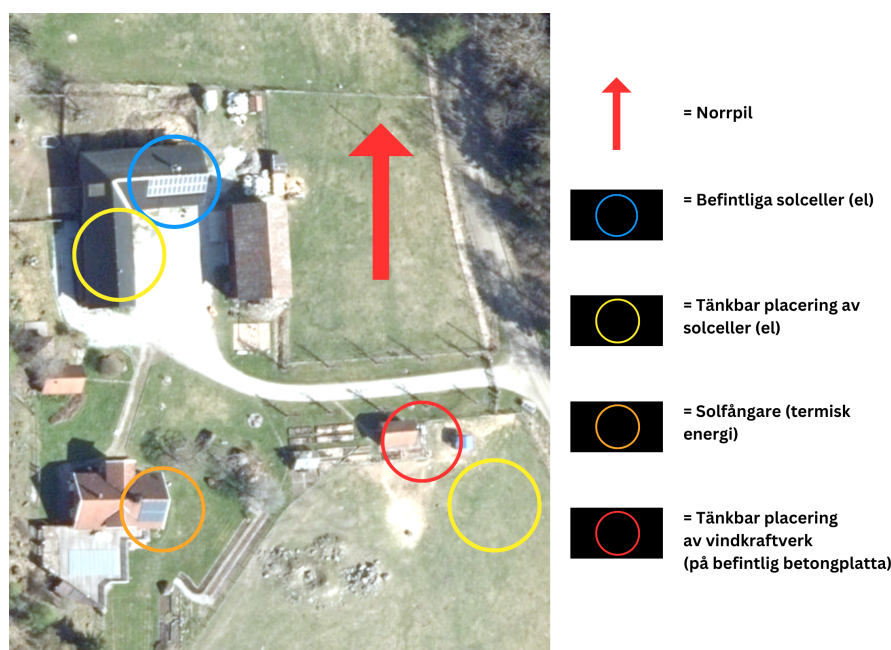
Idag köps 12 000 kWh per år. I figur 2 presenteras de nämnda åtgärderna som bidragit till att minska mängden köpt el. Utöver detta har även byte till LED-belysning och beteendeförändringar bidragit till det minskade energibehovet. Uppvärmningen i huvudbyggnaden är idag vattenburen med golvvärme på nedervåningen och vägghängda radiatorer på övervåningen. Uppvärmningen i lägenheten styrs via en vattenburen kulvert från huvudbyggnaden.



Figur 2 – Mängden köpt el över tid med utmarkerade tidpunkter för viktiga åtgärder. X-axeln representerar tid [Årtal] och Y-axeln representerar köpt el [kWh]. Förbrukningsdata för Mälsta gård från el-leverantören Vattenfall.

3.2 Energiproduktion

För att uppnå målet med att få Mälsta gård att bli självförsörjande krävs det att först och främst det kvarstående energibehovet på 12 000 kWh reduceras ner till 0 kWh samt att producera ytterligare energi utöver det på grund av förluster vid lagring. Alltså behövs det undersökas ifall vind- och solenergi kan täcka det årliga behovet för att gården ska kunna gå i ödrift i 24 timmar, prioriterad ödrift i tre veckor samt ö-drift på lång sikt. Se figur 3 för ortofoto med detaljerad beskrivning av Mälsta gård.



Figur 3 – Översikt av Mälsta gård med tillhörande information kring placering av energiproduktion samt lagring. Datakälla Ortofoto Lantmäteriet ©

3.2.1 Vindenergi

Småskalig vindkraft inkluderar generellt turbiner med en maxeffekt upp till och med 100 kW (Delrapport 3). Vind uppstår då varm luft stiger uppåt (Nationalencyklopedin 2024). Eftersom detta inte är beroende av exempelvis direkt solstrålning eller liknande väderförhållanden är vinden inte säsonsberoende, och dess energi kan nyttjas under större delen av året. Småskalig vindkraft delas in i två underkategorier; horisontella och vertikala. Potentiell placering av de småskaliga vindturbinerna är markerade med rött i figur 3.

3.2.1.1 Horisontella vindturbiner

De horisontella turbinerna efterliknar de vanligaste varianterna av de storskaliga verken där bladen, vanligast tre men kan även vara flera, roterar vinkelrätt mot sin egna axel. De horisontella verken har generellt en hög verkningsgrad vid både låga och höga vindhastigheter. Dessa turbiner behöver vara riktade mot vinden för maximal effektutvinning, vilket gör att de är känsligare mot turbulens än vertikala turbiner. Detta enligt Delrapport 3.

3.2.1.2 Vertikala vindturbiner

De vertikala vindturbinerna har blad som roterar parallellt med sin egen axel. Dessa kan vara utformade på olika sätt, och brukar delas in i så kallade Savonius- och Darrieusturbiner. Savonius har skovelformade blad monterade längs sin axel. Darrieus har blad som fästs högst upp på axeln och sedan går ut i en båge och fästs igen längre ner. Savonius-turbinen har generellt en låg verkningsgrad men brukar även kunna starta av sig självt och operera vid låga vindhastigheter. Darrieus har ofta en högre verkningsgrad men kan inte alltid starta av sig självt, alternativt att den vindhastighet som krävs för självstart är högre. Gemensamt för samtliga vertikala turbiner är att de inte behöver monteras i vindens riktning, och inte heller är känsliga mot turbulens. (Delrapport 3)

3.2.1.3 Datainsamling

Valet av den vertikala vindturbinen Aeolos V-3000 för att uppnå projektets mål grundar sig på en jämförelse mellan vertikala och horisontella vindturbiner som gjordes i delrapporten Vind. (Delrapport 3). För att uppskatta energiproduktionen från vindturbiner på gården är det avgörande att ha tillgång till data om vindhastigheterna vid platsen.

New European Wind Atlas (NEWA) är en europeisk vindatlas som tillhandahåller vind-data för EU-länderna. Vinddata från NEWA på 10 meter höjd mellan åren 2005 och 2018 sparas som CSV-filer som kan läsas in i simuleringsprogrammet Python med syftet att ta fram ett approximerat värde för ett medelår.

3.2.1.4 Modellering och simulering i Python

Vindturbinens energiproduktion modellerades med ett Pythonscript. Med detta kunde luftens densitet bestämmas beroende på temperatur, för att sedan utifrån Betz's lag kunna bestämma den årliga produktionen för turbinen med följande formel:

$$P_{ut} = C_p A \rho \nu^3 \frac{1}{2} \quad (1)$$

C_p är vindturbinens effektkoefficient, ρ är luftens densitet och ν är vindens hastighet. Effektkoefficienten är unik för olika vindturbiner och kan beräknas enligt följande

$$C_p = \frac{P_{ut}}{P_{in}} \quad (2)$$

P_{ut} betecknar den producerade effekten från turbinen, och P_{in} den, enligt Betz's lag teoretisk möjliga produktionen vilken bestäms med [3](#), (Ragheb [2021](#))

$$P_{in} = A \rho \nu^3 \frac{1}{2} \quad (3)$$

Produktionsdata för vindturbinen vid olika vindhastigheter tillhandahölls av producenten för vindturbinen Aeolos V-3000 (Energy [2024](#)). Ekvation [2](#) kunde då användas för att bestämma effektkoefficienten för turbinen. Detta kunde sedan användas i ekvation [1](#) för att bestämma produktion.

3.2.2 Solceller

Solenergi är ett slagkraftigt energislag att implementera - särskilt för småskaligt ändamål som i detta fallet. Installation av solceller på Mälsta gård är möjligt på utritade platser med gul rund ring enligt figur [3](#) ovan - det vill säga både takbaserad och markbaserad.

3.2.2.1 Kristallina solceller

På marknaden idag finns två typer av kristallina solceller: polykristallina och monokristallina. Båda är tillverkade av grundämnet kisel (Si) (Delrapport 6). Kisel är det näst vanligaste grundämnet i jordskorpan och fungerar som en vanlig halvledare, dopad med olika ämnen för att få ledande egenskaper enligt (SGU 2020). Skillnaden ligger i kristallstrukturen: den monokristallina solcellen består av en enda kiselkristall medan den polykristallina består av flera ihopsatta kiselkristaller, stavar eller plattor. Denna skillnad påverkar elektronernas förmåga att röra sig i solcellspanelen, vilket i sin tur påverkar effektiviteten. Elektronerna har svårare att röra sig i den polykristallina solcellen på grund av dess kristallstruktur, vilket leder till sämre prestanda. Därför har polykristallina solceller en lägre verkningsgrad jämfört med de monokristallina.

För att säkerställa hög effektivitet på en begränsad yta kommer monokristallina solceller att installeras på Mälsta gård. En mer detaljerad motivering till valet av monokristallina solceller istället för polykristallina finns i delrapporten om solceller (Delrapport 6).

3.2.2.2 Tak- och markbaserade solcellspaneler

Solceller på hustak är effektiva då de utbyttjar redan befintlig bebyggelse. Optimal effektivitet uppnås med en lutning på 30° - 50° och riktning mot sydost, syd eller sydväst för att maximera solinstrålningen över dagen (Delrapport 6). Den mest gynnsamma lutningen varierar beroende på geografiskt läge. I södra Sverige är ca 40° optimalt, medan i norra delarna är det närmare 45° (Delrapport 6).

Markbaserade solceller är flexibla och kan anpassas för optimal lutning och riktning, vilket gör dem oberoende av hustak som grund. Om taket inte är lämpligt för solceller är markbaserade solceller ett utmärkt alternativ eller komplement (Delrapport 6). Markbaserade solceller kräver dock mer arbete vid installation än takbaserade solceller eftersom de måste förankras i marken istället för att monteras på en förberedd grund, det vill säga ett hustak. Det finns två olika sätt som markbaserade solcellspaneler kan installeras: på en påle eller på en ställning. Eftersom markbaserade solceller kräver mer förarbete, såsom att fästa dem i en gjuten betongplatta för att stå emot väder och vind, ökar installationskostnaden (Gerhardt 2024). Markbaserade solpaneler tenderar också att vara placerade längre bort från elcentral med växelriktare, vilket ökar kostnaderna för kablage (Energy select u.å.).

3.2.2.3 Datainsamling

Enligt Delrapport 6 är monokristallina solceller det bästa valet för Mälsta gård på grund av deras energieffektivitet på begränsad yta, vilket utesluter polykristallina solceller. För att modellera energiproduktionen har solinstrålningsdata och annan relevant information använts för att beräkna solcellernas effekt (Delrapport 6).

Solinstrålningsdatan som används är den diffusa-, direkta- samt globala solinstrålningen samt temperaturdatan för uthomhustemperatur som har hämtats från Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut (SMHI) och baseras på modellsystemet STRÅNG utifrån gårdens koordinater: longitud 17.99 och latitud 59.76. Samtlig data för solinstrålning samt utomhustemperatur har beräknats till ett approximativt värde (ett medelvär-

de) mellan åren 2017 till 2023. I simuleringen används monokristallina solcellsplaner till en storlek av $1,95 \text{ m}^2$ med en maxeffekt på 400 W för både hustak och markinstallation (Hemming, S [2023](#)). På hustaket placeras 26 paneler och på marken 27 paneler. För maximal effekt riktas de makrbunda solcellerna söderut, medan takpanelerna är riktade österut. Hustakets lutning är 37° , och markpanelernas lutning är 40° (Delrapport 6). Växelriktarens verkningsgrad är 0.98, enligt uppdragsgivare.

3.2.2.4 Modellering och simulering i Python

Formler för beräkning av effekt ingår i modellen Uppsala Urban Building Energy Model, UUBEM, vilket är ett verktyg för att analysera och utvärdera olika energirelaterade scenario i en stadsdel. Mer ingående beskrivning av modell hänvisas till rapporten "Urban building energy modeling: A systematic evaluation of modeling and simulation approaches." (Johari [2020-12-10](#)). Kompletterande kod för sökt ändamål hittas i (Delrapport 6). För att beräkna effekten från solcellerna används följande formel (Delrapport 6):

$$P = \eta_0(1 + \mu(T_c - 25))NAG_T\eta_{inv} \quad (4)$$

Koden hämtar information från ett exceldokument där timvis data för ett helt år (1:a januari till 31:a december) existerar. Datan för solinstrålning, utomhustemperatur, växelriktarens verkningsgrad, solcellernas höjd ovanför marken, solcellernas vinkel, gårdens koordinater samt solcellernas maxeffekt är implementerade.

3.3 Ekonomi

För vertikala vindsnurror placeras komponenterna på marknivå vilket underlättar underhåll och därmed minskar underhållskostnaderna (Möllerström [2017](#)). Kostnaden för den valda vertikala vindsnurran Aelos-V3000 är totalt 77000 kronor. Kostnaden för ett torn på sex meters höjd tillkommer även, vilket är 13500 kronor. Motivering för valet av vindsnurra nämns i delrapporten Vind. (Delrapport 3)

Kostnaden per monokristallin solpanel inklusive installation ligger på 4250-5000 kronor (Hemming, S [2023](#)). Kostnaden för markbaserade solceller består av tre monokristallina solpaneler och en markställning. Installation av markbaserade solpaneler är 16 procent dyrare jämfört med takinstallation. En ställning med pålar kostar 2850 kronor. Den totala kostnaden blir således cirka 17400 kronor för de tre solpanelerna, plus kostnaden för markställningen. (Hemming [2024](#))

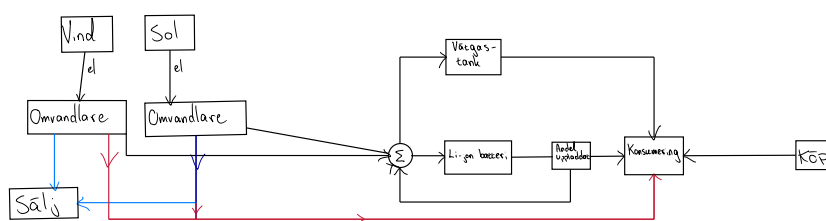
3.4 Energilagring och allokering av energi

Analys av energilagring och allokering av energi syftar till att förstå energiflödet inom systemet för olika förutsättningar för produktion och energilagring. Målet är att identifiera anläggningar som uppfyller önskade krav, såsom möjligheten att upprätthålla ö-drift i 24 timmar. (Delrapport 1)

För att utföra detta jämfördes system med olika förutsättningar för produktion och energilagring men samma energikonsumtion. Resultaten som jämförs mellan systemen är litiumjon batteriernas och vätgasanläggningens genomsnittliga energilagring, samt mängden köpt och såld energi. (Delrapport 1)

3.5 Systembeskrivning

I figur 4 visas ett förenklat flödesschema som beskriver hur el flödar i systemet. Den genererade strömmen från energiproduktionen förs vidare till två separata omvandlare som optimerar strömmen för att passa i ingången för batteriet eller vätgastanken. Då det produceras mer energi än vad konsumtionen och lagringskapaciteten tillsammans tillåter säljs överflödig el. Elen kan också konsumeras i realtid. Annars går elen vidare för att ladda upp ett litium-jon batteri. Då batteriet når maxkapacitet (80%) återkopplar systemet att börja ladda vätgastanken istället. Vid elkonsumtion laddas batteriet ur vilket återkopplar tillsystemet att det går att börja ladda upp batteriet åter igen. Ifall konsumtionen är högre än samtida elproduktion och lagring i systemet behövs el köpas in från nätet för att kunna bemöta efterfrågan.



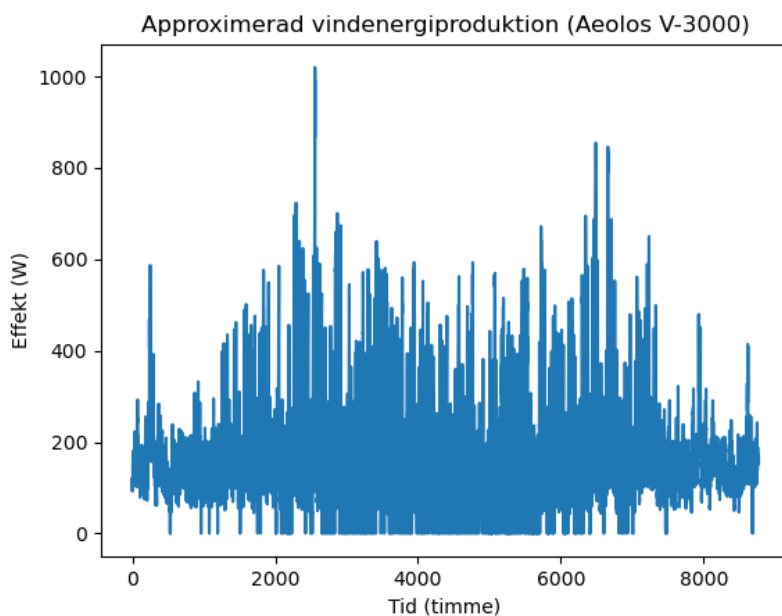
Figur 4 – Övergripande flödesschema för systemet

4 Resultat

Resultatet är uppdelat i energiproduktion samt systemsimulering. I delen för energiproduktion presenteras resultat för enskild produktionsanläggning (vertikal vindturbin, takbaserade samt markbaserade solpaneler). I delen för systemsimulering visas det hur energin kommer lagras med litiumjonbatterier samt vätgas med olika scenarion.

4.1 Energiproduktion - vindsnurror

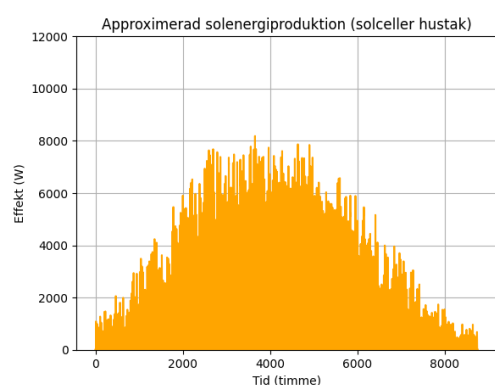
Uppskattad energiproduktion från vinden beräknades med en Aeolos V3000-turbin monterad på ett 6 meter högt torn. I figur 5 visas uppskattad effektproduktion från Aeolos V3000 under ett år. Energin som av en turbin utvinns under den perioden är 1403 kWh.



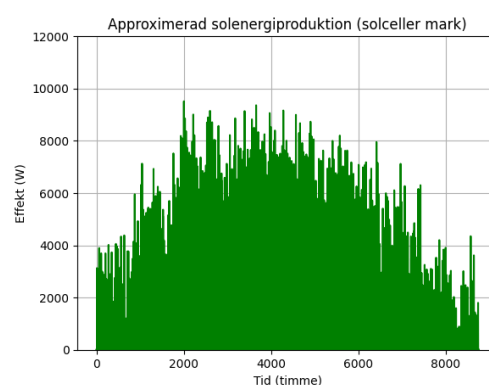
Figur 5 – Årlig energiproduktion för den vertikala turbinen Aeolos V3000.

4.2 Energiproduktion - solceller

I figur 6 ses den totala energiproduktionen för ett approximerat år med framtagna medelvärden för solinstrålning- samt temperaturdata för solceller monterade på hustak åt öst. Detta motsvarar 10 060 kWh för just detta approximerade år. Figur 7 visar motsvarande data för de markbaserade panelerna vilket ger 13 642 kWh för samma approximerade år.



Figur 6 – Effekt från solceller installerade på hustak åt öst.



Figur 7 – Effekt från solceller installerade på mark åt söder.

4.3 Systemsimulering

I tabell 1 visas den mängd köpt energi som krävs under det dygn där energiunderskottet blir som störst. Simuleringen baseras på data över en femårsperiod. Detta visar den mängd energi som saknas på grund av bristande energiproduktion och lagring.

Tabell 1 – Störst mängd köpt energi under 24 simulerat över 5 år för olika installerade energisystem vilka inte använder energilagring.

System	Energi [kWh]	Tidpunkt
Tak/markbaserade solceller, vindsnurra(Windstar)	84	23 December, år 1
Tak/markbaserade solceller, vindsnurra(Aeolos)	83	23 December, år 1
Tak/markbaserade solceller	86	23 December, år 1
Markbaserade solceller, vindsnurra(Windstar)	87	23 December, år 1
Markbaserade solceller, vindsnurra(Aeolos)	86	23 December, år 1
Takbaserade solceller, vindsnurra(Windstar)	98	23 December, år 1
Takbaserade solceller, vindsnurra(Aeolos)	97	23 December, år 1
Takbaserade solceller	100	23 December, år 1
Markbaserade solceller	89	23 December, år 1
Vindsnurra(Windstar)	101	23 December, år 1
Vindsnurra(Aeolos)	100	23 December, år 1

Figurerna 8-11 innehåller vardera fyra grafer vardera som visar resultat inom olika fyra kategorier för respektive figur. Alla simuleringar nedan är över en period av 5 år i syfte att kunna se årliga mönster.

Graf 1 visar hur mycket batteriet är uppladdat över en tid. Simuleringen är optimerad så att batteriet hålls inom 20 - 80 procent av dess kapacitet.

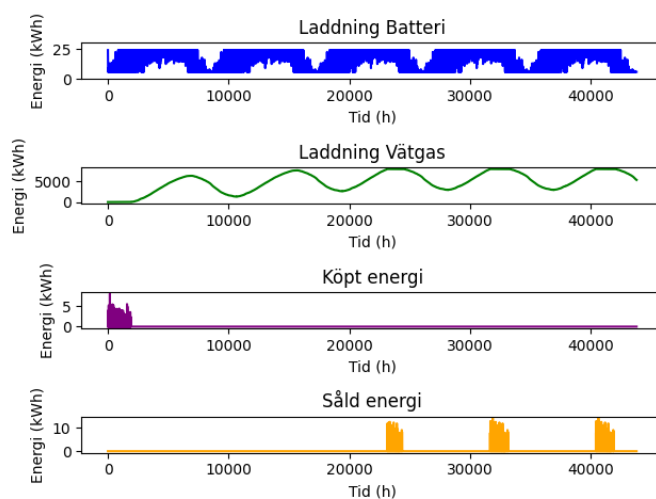
Graf 2 visar hur mycket energi som finns i vätgastanken över en tid.

Graf 3 visar hur mycket energi som skulle behövas köpas in för att möta energibehovet. Samtliga figurer har en topp vid början av simuleringen eftersom det från början antas finnas noll energi, systemet behöver en del för att fungera. I figur 10 och 11 finns ett

återkommande behov att inköpt el.

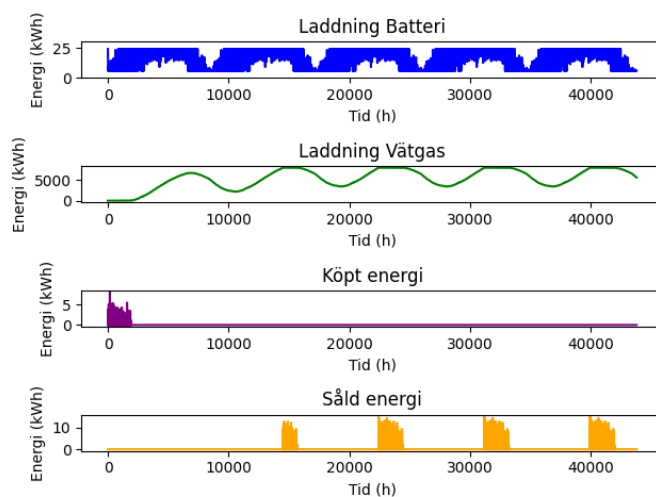
I graf 4 redovisas överskottsenergi som går att sälja. Alternativt behöver systemet stängas ner då eftersom det produceras mer el än vad konsumtion och lagring hanterar.

I figur 8 visas en simulering av ett system med tak- och markbaserade solceller samt ett batteri och en vätgastank.



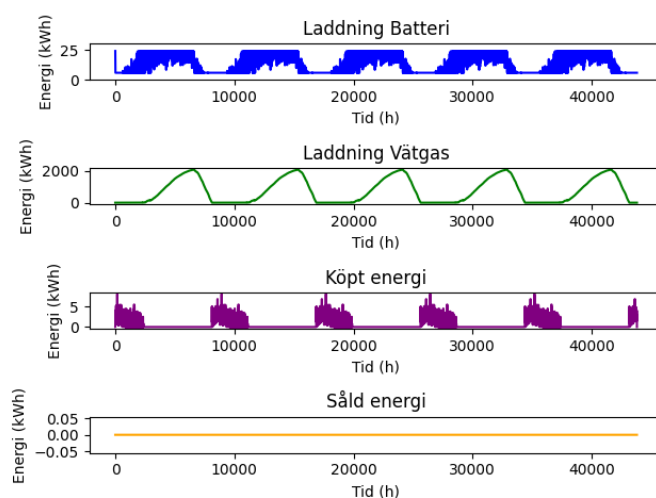
Figur 8 – Tak- och markbaserade solceller.

I figur 9 visas en simulering av ett system med tak- och markbaserade solceller, en vindsnurra samt ett batteri och en vätgastank.



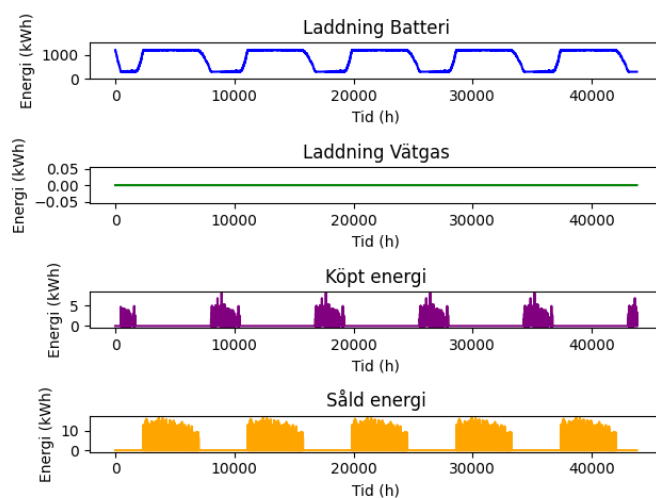
Figur 9 – Tak- och markbaserade solceller och vindsnurra.

I figur 10 visas en simulering av ett system med endast takbaserade solceller samt ett batteri och en vätgastank.



Figur 10 – Takbaserade solceller.

I figur 11 visas en simulering av ett system med tak- och markbaserade solceller, en vindsnurra samt 50 batterier och ingen vätgastank.



Figur 11 – 50 batterier med mark- och takbaserade solceller och vindsnurra.

För att avgöra vad som skulle krävas för att kunna gå i ö-drift 24 timmar antogs det dygn på året då störst del el behövde köpas in till gården, vilket presenteras i tabell 1. För ett system med enbart takmonterade solceller skulle detta bli 100 kWh, vilket motsvarar 6 batterier.

För delmålen prioriterad ö-drift i tre veckor och långsiktig ö-drift ansågs den bästa lösningen vara installation av både tak- och markbaserade solceller, ett litiumjonbatteri och en vätgastank. Detta system presenteras i figur 8.

5 Resultatsanalys

5.1 Ö-drift i 24 timmar

I syfte att se över möjligheter gällande energilagring för att kunna garantera ö-drift i 24 timmar undersöks det dygn då energikonsumtionen är som högst. Under detta dygn hade Mälsta gård en energikonsumtion motsvarande 100 kWh. Detta motsvarar ca 6 stycken batteriers kapacitet då laddningen ska hållas mellan 20 och 80 procent, alltså kan 18 kWh per batteri förbrukas. Ö-drift under 24 timmar bedöms därav vara genomförbart. Under sommarmånaderna kan energiöverskottet från solceller utnyttjas för säkerställa att batteriernas laddningsnivå är tillräcklig för att kunna tillgodose konsumtionen under 24 timmar och under vintern kan det komma att krävas att energi köps in från nätet för hålla batterierna tillräckligt laddade.

5.2 Prioriterad Ö-drift i tre veckor

För att garantera att gårdens energibehov ska täckas under de tre veckor där energi-behovet är som störst krävs en enorm mängd batterier. Detta då det inte finns någon garanti för att en vindsnurra eller solceller kommer producera energi för att ladda upp batterierna igen under dessa tre veckor. Att installera den mängd batterier som krävs för att säkerställa ö-driften är inte en rimlig lösning varken tekniskt eller ekonomiskt. Alternativet är då installation av en vätgasanläggning. Denna lösning möjliggör ö-drift under ännu längre perioder vilket gör att det inte är aktuellt att modellera en lösning för att kunna gå i prioriterad ö-drift under endast 3 veckor.

5.3 Långsiktig Ö-drift

Enligt genomförda simulationer där olika kombinationer av energisystem undersöks över flera år är det bästa alternativet för fullständig ö-drift ett system med både tak- och markbaserade solceller samt ett litiumjon batteri och en vätgastank. Detta visas i figur 7 där det kan avläsas att systemet uppfyller det årliga energibehovet utan alltför stort överskott och i de fall det skapas ett överskott säljs energin till elnätet. För att göra systemet ännu mer stabilt kan en vindsnurra installeras, simuleringarna för detta visas i figur 9. Det leder dock till en större överproduktion vilket leder till att elen behöver säljas alternativt stänga ner delar av systemet. Eftersom syftet inte är att skapa överflödiga energi som kan säljas bedöms detta därför inte vara ett optimalt alternativ. Vindsnurran hade också en låg årlig effektutvinning. Den kan bidra till en mer balanserad eltillförsel under året, men enhetspriset för turbinen gör den olönsam då vindhastigheterna är så pass låga.

Även en simulation utan vindkraft och markbaserad solkraft genomfördes i syfte att undersöka möjligheten att endast utnyttja solceller på tak som energiproduktion. Detta resulterade i figur 10 vilken visar på ett tydligt energiunderskott. Energin lagrad i vätgastanken från sommarmånaderna tar slut alltför tidigt och är tom en stor del av varje år. Vätgastanken har kapacitet som beräknas räcka en hel vinter men energiöverskottet som uppstår under de varmare månaderna räcker endast till att lagra drygt en femtedel av tankens fulla kapacitet.

Det har även gjorts simuleringar där mer än ett batteri används. Dessa visar att den ökade lagringskapaciteten inte gör någon större skillnad för systemets helhet. Då fler batterier innebär både ökad kostnad och materialåtgång finns ingen anledning till att ha

fler än ett batteri. Det är inte heller möjligt att klara ö-drift med endast batterier vilket syns i figur [11](#). I denna simulering används 50 batterier för att visa en överdriven mängd batterier. Att endast utnyttja vätgasen bedömdes inte vara ett alternativ då vätgasen har signifikant lägre verkningsgrad och ej anpassad för kortsiktig energilagring.

6 Slutsats

För att uppnå självförsörjning och ö-drift på Mälsta gård rekommenderas en kombination av solceller, batterier och vätgasanläggning. För kortsiktig energilagring är ett litiumjonbatteri med kapacitet på 30 kWh den mest effektiva lösningen, vilket möjliggör ö-drift i 24 timmar genom att tillgodose gårdens omedelbara energibehov. Detta system kan säkerställa att kritiska funktioner upprätthålls kontinuerligt.

För längre perioder, som prioriterad ö-drift under tre veckor och fullständig ö-drift över ett helt år, är en vätgasanläggning med kapacitet på 8000 kWh nödvändig. Genom att lagra överskottsenergi från solcellerna under sommarmånaderna i en vätgastank, kan gården tillgodose sitt energibehov även under de kallare och mörkare vintermånaderna. Simulationerna visar att detta system är det mest hållbara och tekniskt genomförbara för att uppnå långsiktig ö-drift.

Sammanfattningsvis bedöms Mälsta gård ha potential till att kunna gå i ö-drift både under 24 timmar, under majoriteten av årets dagar, och även på längre sikt. Detta som resultat av följande åtgärder; utbyggnad av mark- och takbaserade solceller samt konstruktion av ett energilager bestående av ett litiumjonbatteri och en vätgasanläggning. Detta skulle göra gården energimässigt självförsörjande under de olika angivna tidshållningarna. För tre veckor finns det ingen lösning som skiljer sig från den för ett helt år, vilket gör att de har identiska lösningar.

7 Referenser

- Energy, Technology. Lotus (2024). *Konversation om produktionsdata för Aeolos V-3000 [e-post]*. Personlig kommunikation 19 april 2024.
- Energy select (u.å). *Ground-mount solar panels*. URL: <https://www.energyselectllc.com/article/Ground-Mount-Solar-Panels-4-pros-and-2-cons> (hämtad 2024-05-02).
- Gerhardt, N. (2024). *Here's what you need to know about ground mounted solar panels*. URL: <https://www.forbes.com/home-improvement/solar/ground-mounted-solar-panels/> (hämtad 2024-05-02).
- Hemming, S (2024). *Solceller På Marken: Pris Info för Markställning med Solceller*. URL: <https://hemsol.se/solceller/montera-sjalv/pa-marken-b/> (hämtad 2024-05-17).
- Hemming, S (2023). *Solcellspaneler för villa eller sommarstuga (50-500W)*. URL: <https://hemsol.se/solceller/solcellspanel/> (hämtad 2024-04-28).
- IRENA (2017). "Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030". I: *International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi*. URL: <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets> (hämtad 2024-04-19).
- Johari, F. (2020-12-10). *Uppsala Urban Building Energy Model: A systematic evaluation of modeling and simulation approaches*. (Hämtad 2024-06-14).
- Möllerström, E. (2017). *Noise, eigenfrequencies and turbulence behavior of a 200 kW H-rotor vertical axis wind turbine*. URL: <https://uu.diva-portal.org/smash/get/uu2:1077749/FULLTEXT01.pdf> (hämtad 2024-05-16).
- Nationalencyklopedin (2024). *Vind*. URL: <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/vind> (hämtad 2024-05-10).
- Ragheb, M. (2021). *Wind energy conversion theory, Betz's equation*. URL: <http://ragheb.co/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Wind%20Energy%20Conversion%20Theory%20Betz%20Equation..pdf> (hämtad 2024-05-10).
- SGU (2020). *Kritiska råvaror: Kisel*. URL: <https://www.sgu.se/mineralnaring/kritiska-ravaror/kisel/> (hämtad 2024-04-10).

8 Delrapporter

Delrapport 1
Simuleringskod för System
Oskar Andersson

Delrapport 2
Batterilagring - Jämförelse av flödesbatterier och litiumjon batterier.
Vendela Hallgren

Delrapport 3
Vind
Nilo Javani, Josefin Landgren

Delrapport 4
Alternativa lagringsmetoder
Ida Johnsson

Delrapport 5
Vätgas
Kalle Lindell

Delrapport 6
Monokristallina eller polykristallina solceller?
Amanda Terlinder

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. Du hittar en länk till SLU:s publiceringsavtal på den här sidan:

- <https://libanswers.slu.se/sv/faq/228316>.

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.