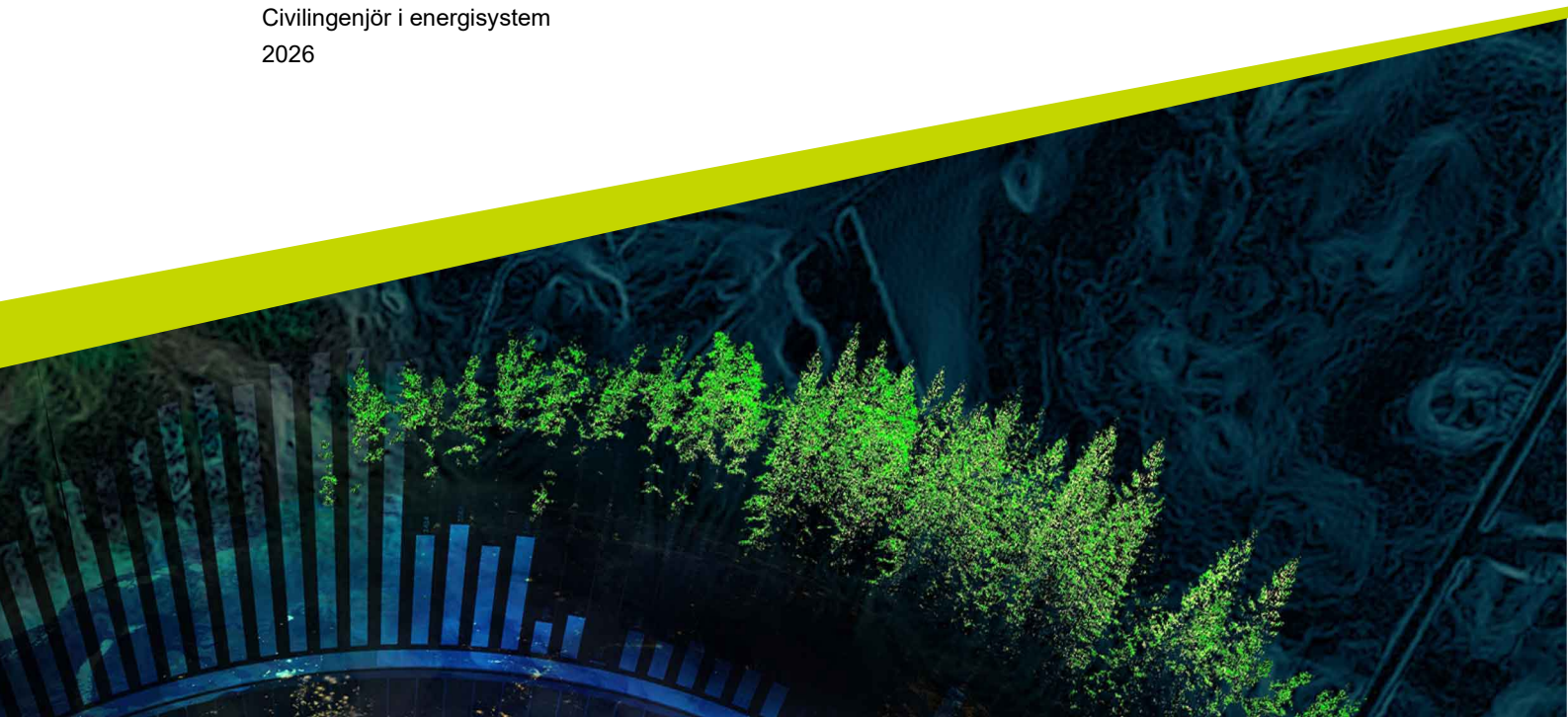
Modellering och optimering för ö-drift inom livsmedelsproducerande lantbruk

Utveckling av ett simulerings- och analysverktyg för ökad elberedskap

Ellen Nymo, Tilde Örn

Examensarbete • 30 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Civilingenjör i energisystem
2026



Modellering och optimering för ö-drift inom livsmedelsproducerande lantbruk. Utveckling av ett simulerings- och analysverktyg för ökad elberedskap

Modeling and optimization for island mode operation in food-producing agriculture. Development of a simulation and analysis tool for increased power resilience

Ellen Nymo, Tilde Örn

Handledare:	**Emma Hartvik, Sweco**
Bitr. handledare:	Magnus Lindén, Sweco
	José Soares, Sweco
Ämnes granskare:	Gunnar Larsson, SLU, Institutionen för energi och teknik
Examinator:	Åke Nordberg, SLU, Institutionen för energi och teknik

Omfattning:	30 hp
Nivå och fördjupning:	Avancerad nivå, A2E
Kurstitel:	Examensarbete i energisystem
Kurskod:	EX1032
Program/utbildning:	Civilingenjör i energisystem
Kursansvarig inst.:	Institutionen för energi och teknik
Utgivningsort:	Uppsala
Utgivningsår:	2026
Upphovsrätt:	Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.
Serietitel:	Examensarbete
Delnummer i serien:	2026:18
ISSN:	1654-9392
Nyckelord:	elberedskap, elavbrott, ödrift, energiresiliens, livsmedelsberedskap, energisystemmodellering, energilagring, lastoptimering, ödriftscenarier, lokal elproduktion, sektionering, reservkraft

Sveriges lantbruksuniversitet
Fakultetför naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Abstract

In today's society, characterized by increasing threats to critical infrastructure, a robust food supply has become a central security issue. The agricultural sector is highly vulnerable to power outages, as animal welfare and the stability of the food supply chain are strictly dependent on a continuous electricity supply. The purpose of this master's thesis is to develop a simulation and analysis tool to evaluate and strengthen the electricity resilience of food-producing farms, specifically within pig farming, through optimization and island mode operation. Furthermore, the model evaluates the potential for a farm to act as a net power producer to support a nearby "security spot" (trygghetspunkt) during island operation.

Through a case study of KH farm AB on Öland, the farm's energy system was modeled by integrating data from the inverter, historical biogas production records, and power flows from the local distribution grid to reconstruct a high-resolution load profile. This load profile was developed in Excel, and a simulation model was implemented in Python, integrated with a graphical user interface (GUI) to provide a user-friendly platform for simulating specific crisis scenarios. The farm's ability to sustain island operation was evaluated under two primary worst-case scenarios: "peak-hour" and "the toughest week."

The results demonstrate that the model successfully performs peak-shaving and generates technically feasible sizing proposals for hybrid backup power systems, combining battery storage with diesel generation. However, the simulations indicate that it is challenging for a single farm to maintain island operation over extended periods, particularly if the objective is to supply power to an external security spot, which would require significant battery capacity or massive fuel reserves for this specific farm.

In conclusion, the developed tool serves as a decision support system with the ability of adapting to a wide range of different scenarios. It provides guidance for system sizing and establishes a starting point for the technical conditions required for island mode operation on farms. The tool is designed for future development and can be adapted to accommodate a wider range of agricultural activities and operations.

Populärvetenskaplig sammanfattning

Tänk om det skulle bli strömavbrott i Sverige i flera dagar. Det innebär visserligen att ingen får ström, men konsekvenserna och hur hårt de slår skiljer sig stort åt. För svenska lantbruk innebär ett strömavbrott en akut kris. Detta gäller särskilt om lantbruket har djurhållning, som grisproduktion, där avstannad ventilation, uppvärmning och utfodring direkt hotar djurens mående.

I Sverige erbjuds gratis rådgivning till lantbrukare. Denna rådgivning innefattar bland annat ämnen rörande beredskap inför kris eller ytterst krig. En åtgärd som lantbrukare kan vidta för att öka sin beredskap är att rusta för att kunna upprätthålla en egen elproduktion och koppla bort sig från det överliggande nätet. Detta kallas för ö-drift och gör gården oberoende av strömavbrott i det allmänna nätet. Det är här vårt arbete kommer in i bilden! Det är tänkt att fungera som ett komplement till den befintliga rådgivningen, för att hjälpa lantbrukare att faktiskt kunna övergå i ö-drift.

I detta examensarbete har förutsättningarna och begränsningarna för ett svinproducerande lantbruk att gå i ö-drift undersökts. Arbetet innefattar även utvecklingen av ett digitalt simuleringsverktyg. Verktyget är byggt utifrån en referensgård på Öland som bedriver grisproduktion.

För att klara ö-drift behöver gården sitt eget lokala energisystem. Detta innebär oftast en kombination av solceller, batterier och reservkraft i form av dieselaggregat, där allt dirigeras av ett styrsystem som fungerar som anläggningens "hjärna". Referensgården har i nuläget egen elproduktion i form av biogas och solceller, men saknar idag batterier, reservkraft och ett övergripande styrsystem.

Med hjälp av vårt verktyg har vi simulerat hur referensgården skulle klara av att upprätthålla ö-drift. Vi testade bland annat hur gården skulle hantera den absolut tuffaste veckanpå året rent energimässigt. Verktyget räknar ut hur mycket utrustning (batterier och reservkraft) som krävs för att driften ska fungera. Simuleringarna visade att gården inte klarar den tuffaste veckan med sin nuvarande utrustning, men med rätt investeringar i batterier och reservkraft är det fullt möjligt.

Därefter undersöktes en ännu större fråga: Skulle en sådan här gård kunna rädda mer än bara sig själv? Vi testade om lantbruket kunde producera tillräckligt med överskottsel för att även driva en kommunal “trygghetspunkt” i närheten. En trygghetspunkt är en säker samlingsplats dit människor i området kan ta sig under en kris för att få till exempel värme, dricksvatten och information. Svaret är att det går, men att det är tufft. Att försörja både en gård och en trygghetspunkt kräver enorma batterier eller väldigt mycket bränsle till reservkraften.

Exekutiv sammanfattning

Svensk livsmedelsproduktion, särskilt den som innefattar djurhållning, är extremt sårbar för elavbrott. Flera kritiska funktioner, så som ventilation, uppvärmning och utfodringen kräver en kontinuerlig elförsörjning för att upprätthållas och kommer vid ett längre avbrott att hota både djurvälfärd och produktionen. I och med ett ökat fokus på frågor rörande krisberedskap finns en del rådgivning och resurser att tillgå – men ännu saknas ett konkret beslutsunderlag för att den enskilde lantbrukaren ska kunna investera rätt och kunna övergå i ö-drift.

Genom utvecklandet av ett simuleringsverktyg och en fallstudie utförd på KH Lantbruk AB framkommer några centrala insikter:

- **Ö-drift kräver specifika lösningar beroende på den befintliga tekniken:** Det finns ingen direkt universallösning för att gå i ö-drift på ett svenskt lantbruk eftersom befintlig teknik, typ av elproduktion och kritiska funktioner skiljer sig åt. Genom studien visar det sig att för ett svinproducerande lantbruk med sol- och biogasproduktion så är inte detta ensamt tillräckligt för att hantera ö-drift. Den befintliga infrastrukturen är avgörande för vilka tekniska implementationer som krävs. Om en gård till exempel har en synkrongenerator installerad så öppnas möjligheten att hantera tunga startströmmar utan att nödvändigtvis behöva investera i ett externt reservaggregat – även om det kan finnas andra skäl till att ändå göra det.
- **Lantbruk har potentialen att understödja andra samhällsviktiga funktioner med el:** Resultaten visar att ett elproducerande lantbruk även kan ha kapaciteten att försörja närbeliggande trygghetspunkter med el, utöver upprätthållandet av egna kritiska funktioner, givet att infrastruktur och elnätsbolaget har denna sektioneringsmöjlighet. Med rätt dimensionering av reservaggregat och batterier utgör gårdar en outnyttjad resurs i den civila beredskapen.

Genom det framtagna simuleringsverktyget kan lantbrukare, rådgivare eller andra aktörer inom krisberedskap designa specifika och gårdsunika scenarion för att förstå en gårds förutsättningar till ö-drift. Detta underlättar och möjliggör en högre elberedskap för lantbruken, samtidigt som det förhindrar över- och underdimensionering av utrustning.

Baserat på resultaten i denna studie rekommenderas det att alltid börja med att inventera en gårds befintliga infrastruktur (till exempel generatorer och styrsystem) och sedan komplettera med nödvändig utrustning efter det. Använd dimensioneringsverktyg och andra datadrivna verktyg för att optimera elanvändningen från början och på så sätt minska storlekskraven för eventuella framtida reservaggregat och batterier. Det är även lämpligt att inleda samtal med det lokala elnätsbolaget och andra beredskapssamordnare för att diskutera möjligheten för lantbruket att bidra till samhällets elberedskap.

Förord

Detta examensarbete har genomförts i samarbete med Sweco, gruppen Energi & Process, samt Sveriges lantbruksuniversitet (SLU). Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare på Sweco, Emma Hartvik (Gruppchef Energi & Process), för stöd och engagemang under arbetets gång. Vi vill även rikta ett varmt tack till Magnus Lindén (Sweco Energy & Industry Advisory) som möjliggjort kontakten med referensgården studien utgår ifrån och José Soares (Sweco Energi & Process) för goda samtal och vägledning. Ett särskilt tack riktas också till vår handledare på SLU, Gunnar Larsson, för värdefulla samtal och stöttning i vårt arbete. Ett stort tack riktas dessutom till Joakim Johansson med familj, lantbrukarna på KH Lantbruk AB. Ni har varit väldigt hjälpsamma, och att vi fick möjlighet att besöka gården har varit till stor nytta för vår studie. Slutligen vill vi tacka Borgholm Energi Elnät AB för ett givande platsbesök som bidrog med intressanta diskussioner och viktig information till vårt arbete.

Användning av AI

För detta arbete har AI använts som hjälp med strukturering och modellering i samband med uppbyggnaden av simuleringsverktyget. Det har även använts för att förbättra formuleringar och strukturen av vår egenskrivna text. AI har även använts för att generera en bild.

Ordlista

- **BESS (Battery Energy Storage System):** Ett batterilargringssystem.
- **BSP (Balancing Service Provider):** En marknadsaktör som tecknar avtal med Svenska kraftnät för att erbjuda balanstjänster.
- **EMS (Energy Management System):** Ett styrsystem som övervakar, styr och optimerar energiflöden.
- **Trygghetspunkt:** En kommunal samlingsplats för krisstöd vid höjd beredskap eller krig.
- **Ö-drift:** Ett driftläge där ett begränsat området frånskiljs från det överliggande elnätet och övergår till att fungera som ett självständigt system, drivet av egen elproduktion.

Innehåll

1 Introduktion **1**
1.1 Avgränsningar och systemgränser . . . 1

2 Syfte och frågeställningar **2**
2.1 Syfte . . . 2
2.2 Frågeställningar . . . 2

3 Bakgrund **2**
3.1 El som kritisk insatsvara i lantbruk . . . 2
3.1.1 Styrel . . . 3
3.1.2 Avbrott och konsekvenser för djurhållning . . . 3
3.2 Befintliga stöd, rådgivning och initiativ . . . 3
3.2.1 "Om krisen eller kriget kommer till Sveriges lantbruksföretagare" - SVA . 4
3.2.2 "Beredskapshandboken" - LRF . . . 4
3.2.3 "Greppa Näringen" - Greppa . . . 4
3.2.4 "Handbok om energieffektivisering" - HIR Skåne . . . 5
3.2.5 "Robusta gården" - Hushållningssällskapet . . . 5
3.3 Ekonomiska styrmedel, investeringsstöd och gröna avdrag . . . 5
3.3.1 Investeringsstöd för robust primärproduktion - Jordbruksverket . . . 5
3.3.2 Klimatklivet-naturvårdsverket . . . 6
3.3.3 Klimatpremie-energimyndigheten . . . 6
3.3.4 Bidrag för produktion av biogas . . . 7
3.3.5 Ekonomiska vinster . . . 7
3.3.5.1 Ekonomisk nytta från solcellsproduktion . . . 7
3.3.5.2 Ekonomisk nytta från produktion kombinerat med energilagring 7
3.3.5.3 Ekonomisk nytta genom att agera stödtjänst . . . 7
3.4 Drift av svinproducerande lantbruk och nyckeltal . . . 8
3.4.1 Temperaturkrav och uppvärmningsystem . . . 8
3.4.2 Utfodring . . . 8
3.4.3 Ventilation . . . 9
3.4.4 Energiförbrukning . . . 10
3.4.5 Energieffektivisering . . . 10
3.5 Referensgården KH Lantbruk AB . . . 10

4 Teknisk referensram **12**
4.1 Lokal elproduktion och självförsörjning . . . 12
4.1.1 Solceller . . . 12
4.1.2 Biogasproduktion . . . 13
4.1.3 Energilagring - batterier . . . 14
4.2 Reservkraft . . . 15
4.2.1 Funktion och driftprincip hos dieselaggregat . . . 15
4.2.2 Reservkraftens relevans för lantbruk . . . 16
4.2.3 Dimensionering av reservkraft - effektbehov och lastprioritering . . . 16
4.3 Ödrift - principer och krav . . . 17
4.3.1 Frekvens- och spänningsreglering . . . 18
4.3.2 Systemtröghet och rotationsenergi (Inertia) . . . 19
4.3.3 Kortslutningsnivåer och säkringsdimensionering i svaga nät . . . 19
4.4 Att möjliggöra ö-drift på gårdsnivå . . . 20

4.4.1 Grid-forming växelriktare . . . 20
4.4.2 Sektionering och lastprioritering . . . 21
4.4.3 Styrsystem . . . 22
4.4.4 Tekniska krav för etablering av ö-drift . . . 22
4.4.5 Komponenternas samspel vid nätbortfall på lantbruk . . . 23
4.5 Ett lantbruk som en lokal energiresurs . . . 24
4.5.1 KH Lantbruk AB och Borgholm Energi Elnät AB . . . 26
4.5.2 Exempel på mikronät i drift . . . 26

5 Metod **27**
5.1 Litteraturstudie . . . 27
5.1.1 Funktioner hos lantbruk . . . 27
5.1.2 Tekniska förutsättningar för ö-drift i stort . . . 27
5.1.3 Ö-drift hos lantbruk: . . . 27
5.1.4 Nulägesanalys . . . 28
5.1.5 Ekonomiska incitament och styrmedel . . . 28
5.2 Dialog med experter och sakkunniga aktörer . . . 28
5.2.1 Platsbesök hos två svinproducerande lantbruk . . . 28
5.2.2 Platsbesök Borgholm Energi Elnät AB . . . 28
5.2.3 Intervju Jordbruksverket - Greppa näringen . . . 29
5.2.4 Intervju Hushållningssällskapet . . . 29
5.2.5 Ödrift-kompetenspass . . . 29
5.3 Modellbygge . . . 29
5.3.1 Modellering Excel . . . 31
5.3.1.1 Datainhämtning och systemkonfiguration i Excel . . . 31
5.3.1.2 Datakonflikter och avgränsningar . . . 32
5.3.1.3 Databehandling och tidssynkronisering . . . 32
5.3.1.4 Beräkningsmodell för lastkurva . . . 33
5.3.1.5 Hantering av felkällor i biogasdata . . . 33
5.3.1.6 Dynamisk kompression av maxlaster . . . 34
5.3.1.7 Iterativ kalibrering och validering . . . 34
5.4 Simuleringsmodell i Python . . . 35
5.4.1 Identifiering av maskinkurva (Baseline) . . . 35
5.4.1.1 Tids- och säsongsindelning . . . 35
5.4.1.2 Fasta baslaster . . . 35
5.4.1.3 Optimeringsalgoritm för flexibla processer med Backtracking . . . 35
5.4.1.4 Dynamisk hantering av spannmålstork . . . 36
5.4.1.5 Reaktivt klimatsystem . . . 36
5.4.1.6 Brus och Overflow . . . 37
5.4.1.7 Krav på systemets indata . . . 37
5.4.2 Optimerad maskinkurva (Optimizer) . . . 37
5.4.3 Identifierad maskinkkurva samt optimerad maskinkurva omformatterade 38
5.4.4 Modellens träffsäkerhet . . . 39
5.4.5 Ö-driftsimulering . . . 40
5.4.5.1 Batteriklass (`class Battery`) . . . 40
5.4.5.2 Dimensionering av system . . . 41
5.4.5.2.1 Hantering av startströmmar och ideal generator . . . 41
5.4.5.2.2 Binärsökning för optimal storlek av batteri och reservkraft . . . 41

5.4.5.2.3 Tröskelbaserad hybriddimensionering (percentilmetoden) . . . 42
5.4.5.2.4 Teknisk realism med C-rate . . . 43
5.4.5.2.5 Simuleringsfunktionen och dimensioneringsfall vid ö-drift 43
5.4.6 Användargränssnitt via Streamlit (interface.py) . . . 44
5.4.6.1 Sessionshantering och konfigurationsstruktur . . . 45
5.4.6.2 Flikarnas innehåll och struktur . . . 45
5.4.6.3 Standardparametrar för simuleringen . . . 46
5.4.7 Nettopositiv drift – försörja trygghetspunkt . . . 47

6 Resultat **48**
6.1 Tekniska förutsättningar och begränsningar för ö-drift på ett givet lantbruk . . . 48
6.1.1 Referensgården KH Lantbruk AB . . . 49
6.2 Modellering av energisystem . . . 49
6.3 Modellering av maskindrift . . . 51
6.3.1 Maskindrift för olika dygn . . . 51
6.3.2 Maskindrift för olika veckor . . . 55
6.3.3 Lastfördelning över året . . . 59
6.3.4 Maskindriften träffsäkerhet . . . 60
6.3.5 Optimerad lastkurva och maskindrift . . . 61
6.4 Ödriftssimulering och optimerad dimensionering . . . 61
6.4.0.1 Scenario A: Inget batteri eller reservaggregat . . . 62
6.4.0.2 Scenario B: Med optimerad storlek för batteri och reservkraft . 65
6.4.0.3 Scenario C: Optimerade hybriddimensioneringens förmåga till ö-drift hela året . . . 67
6.5 Nettopositiv drift . . . 70
6.5.1 Nätsektionering . . . 70
6.5.2 Produktionskapacitet i förhållande till energibehov . . . 71
6.5.3 Simulering – nettopositiv drift och försörjning av trygghetspunkt . . . 73
6.6 Ekonomiska incitament . . . 81
6.6.1 Statliga investeringsstöd . . . 81
6.6.2 Löpande kostnadsbesparingar . . . 82
6.6.3 Löpande intäkter . . . 82

7 Diskussion **83**
7.1 Tekniska förutsättningar för ö-drift på lantbruk . . . 83
7.2 Modellering och optimering av energisystem . . . 83
7.2.1 Lastkurvan från Excel . . . 83
7.2.2 Maskinkurvor . . . 84
7.3 Ö-driftsimulering och dimensionering . . . 86
7.4 Möjlighet till nettopositiv drift (trygghetspunkt) . . . 87
7.5 Ekonomiska incitament . . . 88

8 Slutsats **89**

9 Bilagor **90**
9.1 Intervjufrågor om lantbrukets verksamhet och driftsmönster . . . 90
9.2 Bild på gränssnittet . . . 90

10 Referenser **91**

Arbetsfördelning

Sektion	Nr	Bidragande
Introduktion	1	Ellen & Tilde
Avgränsningar och systemgränser	1.1	Tilde
Syfte	2.1	Ellen & Tilde
Frågeställningar	2.2	Ellen & Tilde
Bakgrund	3	Ellen & Tilde
El som kritisk insatsvara i lantbruk	3.1	Ellen
Styrel	3.1.1	Ellen
Avbrott och konsekvenser för djurhållning	3.1.2	Ellen
Befintliga stöd, rådgivning och initiativ	3.2	Tilde
"Om krisen eller kriget kommer till Sveriges lantbruksföretagare" - SVA	3.2.1	Tilde
"Beredskapshandboken" - LRF	3.2.2	Tilde
"Greppa Näringen" - Greppa	3.2.3	Tilde
"Handbok om energieffektivisering" - HIR Skåne	3.2.4	Tilde
"Robusta gården" - Hushållningssällskapet	3.2.5	Tilde
Ekonomiska styrmedel, investeringsstöd och gröna avdrag	3.3	Tilde
Investeringsstöd för robust primärproduktion - Jordbruksverket	3.3.1	Ellen & Tilde
Klimatklivet-naturvårdsverket	3.3.2	Tilde
Klimatpremie-energimyndigheten	3.3.3	Tilde
Bidrag för produktion av biogas	3.3.4	Tilde
Ekonomiska vinster	3.3.5	Ellen & Tilde
Drift av svinproducerande lantbruk och nyckeltal	3.4	Ellen
Temperaturkrav och uppvärmningsystem	3.4.1	Ellen
Utfodring	3.4.2	Tilde
Ventilation	3.4.3	Ellen
Energiförbrukning	3.4.4	Tilde
Energieffektivisering	3.4.5	Tilde
Referensgården KH Lantbruk AB	6.1.1	Ellen & Tilde
Teknisk referensram	4	Ellen
Lokal elproduktion och självförsörjning	4.1	Tilde
Solceller	4.1.1	Ellen
Biogasproduktion	4.1.2	Ellen
Energilagring - batterier	4.1.3	Ellen
Reservkraft	4.2	Ellen
Funktion och driftprincip hos dieselaggregat	4.2.1	Ellen
Reservkraftens relevans för lantbruk	4.2.2	Ellen
Dimensionering av reservkraft - effektbehov och lastprioritering	4.2.3	Ellen
Ödrift - principer och krav	4.3	Ellen
Frekvens- och spänningsreglering	4.3.1	Ellen
Systemtröghet och rotationsenergi (Inertia)	4.3.2	Ellen
Kortslutningsnivåer och säkringsdimensionering i svaga nät	4.3.3	Ellen

Sektion	Nr	Bidragande (forts.)
Att möjliggöra ö-drift på gårdsnivå	4.4	Ellen & Tilde
Grid-forming växelriktare	4.4.1	Tilde
Sektionering och lastprioritering	4.4.2	Tilde
Styrsystem	4.4.3	Tilde
Tekniska krav för etablering av ö-drift	4.4.4	Tilde
Komponenternas samspel vid nätbortfall på lantbruk	4.4.5	Tilde
Ett lantbruk som en lokal energiresurs	4.5	Tilde
KH Lantbruk AB och Borgholm Energi Elnät AB	4.5.1	Tilde
Exempel på mikronät i drift	4.5.2	Tilde
Metod	5	Ellen & Tilde
Litteraturstudie	5.1	Tilde
Funktioner hos lantbruk	5.1.1	Tilde
Tekniska förutsättningar för ö-drift i stort	5.1.2	Tilde
Ö-drift hos lantbruk:	5.1.3	Tilde
Nulägesanalys	5.1.4	Tilde
Ekonomiska incitament och styrmedel	5.1.5	Tilde
Dialog med experter och sakkunniga aktörer	5.2	Tilde
Platsbesök hos två svinproducerande lantbruk	5.2.1	Tilde
Platsbesök Borgholm Energi Elnät AB	5.2.2	Tilde
Intervju Jordbruksverket - Greppa näringen	5.2.3	Tilde
Intervju Hushållningssällskapet	5.2.4	Tilde
Ödrift-kompetenspass	5.2.5	Tilde
Modellbygge	5.3	Ellen & Tilde
Modellering Excel	5.3.1	Ellen
Simuleringsmodell i Python	5.4	Tilde
Identifiering av maskinkurva (Baseline)	5.4.1	Tilde
Optimerad maskinkurva (Optimizer)	5.4.2	Tilde
Identifierad maskinkkurva samt optimerad maskinkurva omformatterade	5.4.3	Ellen & Tilde
Ö-driftsimulering	5.4.5	Ellen & Tilde
Användargränssnitt via Streamlit (interface.py)	5.4.6	Ellen
Nettopositiv drift – försörja trygghetspunkt	5.4.7	Ellen
Resultat	6	Ellen & Tilde
Tekniska förutsättningar och begränsningar för ö-drift på ett givet lantbruk	6.1	Tilde
Modellering av energisystem	6.2	Tilde
Optimerad lastkurva och maskindrift	6.3.5	Tilde
Ödriftssimulering och optimerad dimensionering	6.4	Tilde
Nettopositiv drift	6.5	Ellen & Tilde
Nätsektionering	6.5.1	Tilde
Produktionskapacitet i förhållande till energibehov	6.5.2	Ellen
Simulering – nettopositiv drift och försörjning av trygghetspunkt	6.5.3	Ellen
Ekonomiska incitament	6.6	Tilde

Sektion	**Nr**	**Bidragande** (forts.)
Statliga investeringsstöd	6.6.1	Tilde
Löpande kostnadsbesparingar	6.6.2	Tilde
Löpande intäkter	6.6.3	Ellen & Tilde
Diskussion	7	Ellen & Tilde
Tekniska förutsättningar för ö-drift på lantbruk	7.1	Tilde
Modellering och optimering av energisystem	7.2	Ellen & Tilde
Lastkurvan från Excel	7.2.1	Ellen
Maskinkurvor	7.2.2	Tilde
Ö-driftsimulering och dimensionering	7.3	Ellen
Möjlighet till nettopositiv drift (trygghets-punkt)	7.4	Ellen & Tilde
Ekonomiska incitament	7.5	Tilde

1 Introduktion

I ett föränderligt samhälle har energiresiliens och robust elförsörjning blivit alltmer centralt för att upprätthålla samhällsviktiga funktioner. Något som betraktas som en samhällsviktig funktion, enligt Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB), är en fungerande livsmedelsförsörjning [1]. Att trygga den inhemska försörjningen av livsmedelsproduktion kan därmed betraktas som en viktig försvars- och säkerhetspolitisk fråga [2]. Sektorn är samtidigt extremt beroende av en fungerande elförsörjning, då flera kritiska processer för djurhållning bygger på detta. Inom exempelvis svinproduktion är el en direkt förutsättning för ventilation, utfodring och värme och ett plötsligt avbrott utgör akuta direkta hot mot både djurvälfärd och livsmedelsproduktionen. För att garantera att nödvändiga funktioner fungerar även vid elavbrott ställs höga krav på lantbrukets energiresiliens och tekniska förmågor för ö-drift [2].

I syftet att stärka lantbrukens resiliens och stötta den enskilda lantbrukaren, erbjuds idag rådgivande insatser från bland annat Greppa Näringen via "Beredskapskollen". Dessa insatser har i uppgift att kunna ge en så bred rådgivning som möjligt och ger en översiktlig bild av den specifika gårdens sårbarheter [3].

Då rådgivningen täcker in flera stora områden som bland annat el, kritiska insatsvaror, bemanning och digital säkerhet är det inom ramen för rådgivningen idag inte möjligt att ge en djupgående analys av specifika frågor. För den enskilde lantbrukaren saknas det därför lättillgängliga verktyg för att kunna ta analysen gällande deras elförsörjning vidare. Om målet är att kunna bli mer självförsörjande på el och/eller kunna gå i ö-drift krävs det att man förstår den egna lastprofilen, kan kvantifiera energibalansen och utvärdera vilka tekniska åtgärder som behöver vidtas för att dimensionera lokal produktion, energilagring och reservkraft.

Med bakgrund mot detta har examensarbetet tagits fram och genomförts i samarbete med företaget Sweco. Inom ramen för arbetet har ett dynamiskt analysverktyg utvecklats för livsmedelsproducerande lantbruk, med svinproduktion som tillämpningsfall. Genom en simuleringsmodell i Python, integrerad med ett grafiskt användargränssnitt (GUI), tar verktyget fram en återskapad bild av verksamheten med specifika maskindriftsmönster för varje timme. Modellen utvärderar därefter gårdens energisystem i tre steg:

- **Maskinidentifiering och optimering:** Verktyget kartlägger, baserat på historisk data om lastkurvan och uppskattade driftsmönster för maskiner, när olika laster körs utifrån en optimerande algoritm. Användaren anger vilka laster som är fasta över hela året och vilka laster som är flexibla. Optimeringen flyttar sedan lasterna inom tillåtna tidsramar för att kapa effekttoppar och frigöra kapacitet.
- **Simulering av ö-drift:** Verktyget kopplar bort ordinarie elnätet och simulerar systemets förmåga att överleva med endast lokal produktion och eventuell lagring.
- **Dimensionering:** Vid val av önskat tidsfönster, startdatum och avbrottslängd, ger verktyget dimensioneringsförslag för batteri och reservkraft. Det går även att öka befintlig lokal produktion för att se hur det påverkar behovet av batteri/reservkraft.

1.1 Avgränsningar och systemgränser

Arbetet är avgränsat till el. Värme- och kylsystem inkluderas endast om de är eldrivna. Övriga beredskapsaspekter, såsom logistik, inköp , vatten- och bränsletillgång, ligger utanför studiens ramar. Vidare så är arbetet avgränsat till svinproducerande lantbruk.

2 Syfte och frågeställningar

2.1 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att undersöka hur ett svinproducerande lantbruks energisystem kan modelleras, och därefter utveckla en simuleringsmodell i Python för analys av elresiliens och ö-drift på livsmedelsproducerande lantbruk. Genom att mata in data för ett lantbruks förbrukning och produktion ska modellen kunna simulera olika ö-driftsscenarier och föreslå tekniska åtgärder för att uppnå önskad driftsäkerhet. Modellen avses fungera som ett beslutsunderlag vid dimensionering av lokal elproduktion, energilagring och reservkraft, samt belysa hur energieffektivisering påverkar dessa behov.

Arbetet syftar vidare till att genom en teoretisk analys undersöka de ekonomiska incitamenten för sådana investeringar samt utvärdera lantbrukets potential att fungera som en lokal trygghetspunkt genom sektionering av elnätet. Genom att tillämpa modellen på en referensgård för svinproduktion på Öland prövas verktygets förmåga att generera praktiska åtgärdsförslag med ambitionen att resultaten ska vara generaliserbara för liknande verksamheter.

2.2 Frågeställningar

- Vilka tekniska förutsättningar och begränsningar finns för ö-drift på ett givet lantbruk?
- Hur kan ett svinproducerande lantbruks last- och produktionskurva modelleras, givet import- och exportdata?
- Hur kan maskindrift för en gård simuleras givet en lastkurva, effektdata och generella driftsscheman?
- Hur kan ett svinproducerande lantbruks energisystem modelleras samt optimeras?
- Hur kan samma lantbruks energisystem, genom åtgärder som sektionering samt uttökad lokal produktion, energilagring och reservkraft, tekniskt möjliggöra och upprätthålla ödrift vid elavbrott?
- Hur kan modellen ge åtgärder samt dimensioneringsförslag för olika ödriftsscenarion?
- Hur ser möjligheten ut för samma lantbruk att genom sektionering försörja en lokal trygghetspunkt vid elavbrott?
- Vilka ekonomiska incitament finns för investering i åtgärder som möjliggör ökad självförsörjningsgrad och ö-drift hos lantbruk?

3 Bakgrund

3.1 El som kritisk insatsvara i lantbruk

I enlighet med den rapport som livsmedelsverket publicerade 2024, "Kartläggning av kritiska och strategiska varor", så är behovet av analyser över både livsmedelsbehov och de nationella tillgångarna nyckeln till att bygga upp en resilient försörjningskedja. Rapporten beskriver att långsiktiga åtgärder för högre flexibilitet i livsmedelsberedskapen bör ses som de mest relevanta åtgärderna över tid – snarare än riktade insatser för till exempel ökad lagring av en specifik

vara [4]. I en studie utförd av MSB har elberoendet för livsmedelsproduktionen undersökts. Där framgår det att även kortare elavbrott leder till konsekvenser för djurhållningen – även om omfattningen och graden av konsekvenserna varierar. I studien utförd av MSB framgår det att samtliga djurgårdar som deltog i undersökningen hade en dieseldriven elgenerator för att upprätthålla nödvändiga funktioner men att frågan kring hur länge det går att driva systemet på detta vis är oklart [5].

3.1.1 Styrel

Styrel betyder rakt av ”styrning av el till proriterade elanvändare vid bristsituationer” och är ett verktyg utvecklat av Energimyndigheten, Myndigheten för civilit försvar (MSB) och Svenska kraftnät (SVK). I fall där elbrist uppstår måste en prioriteringsordning med vilka funktioner som är mest kritiska att upprätthålla finnas. Då nätet kopplar bort elanvändare så ska en manuell förbrukningsfrånkoppling (MFK) se till att samhällsviktiga funktioner förblir brukliga även vid en krissituation. Prioriteringen av vad styrelen ska gå till är ett samarbete mellan både myndigheter och elnätsföretag tillsammans med länsstyrelser, kommuner och privata aktörer. Styrelen kan dock aldrig garanteras till 100 procent – det är snarare en metod som ska minska risken för allvarliga konsekvenser vid MFK [6].

Definitionen för vad som räknas till samhällsviktiga funktioner utgår från att det är enheter vars verksamhet på ett eller annat sätt kan anses vara absolut nödvändig vid en kris. Det är således inte endast vård och omsorg som räknas dit, utan även IT-leverantörer.[6]. På lokal och regional är det sjukhus, äldreomsorg, räddnings- och larmtjänster, vattenförsörjning och telekommunikation som innefattas av Styrel [7].

3.1.2 Avbrott och konsekvenser för djurhållning

Elavbrott är en direkt risk för djurhållningen och det är Jordbruksverkets föreskrifter som reglerar kraven gällande detta. Med anledning av detta finns det krav på att djuren ska kunna tas hand om även vid strömavbrott. Jordbruksverket skriver att man bör ha en “godtagbar plan” för hur djurskyddet inte ska bli lidande vid elavbrott. Vidare står det att grisar i ett stall med mekanisk ventilation ska ha ett larm som varnar vid övertemperatur, strömavbrott eller vid fel från frånluftsfläktar som upprätthåller minimiventilaion och gödselgasventilation. Larm ska även finnas som larmar för fel på larmanordningen [8].

Detta innebär att specifika krav för till exempel reservkraft inte finns för all typ av djurhållning. I rapporten “Livsmedelsproduktion ur ett beredskapsperspektiv” noteras det att, till skillnad från hos kycklingproducenter, finns det inte något branschkrav på att grisgårdar ska ha en elgenerator. Vissa lantbrukare har en generator, men denna har i vissa fall sällan eller aldrig testats [2].

Enligt en rapport baserad på intervjuer med 20 lantbrukare rörande livsmedelsförsörjning vid höjd beredskap, framgår det att grisproducenter bedömer det som omöjligt att upprätthålla nuvarande produktion vid ett långvarigt elavbrott. Respondenterna i studien förutsåg att behovet av att avliva, slakta eller sälja grisarna som livdjur skulle uppstå inom en tidsram på några dagar till några veckor vid ett plötsligt och ihållande strömavbrott [2].

3.2 Befintliga stöd, rådgivning och initiativ

Detta avsnitt redogör för befintliga projekt, både pågående och avslutade, samt informationsmaterial och andra initiativ som syftar till att stärka lantbrukens resiliens. Detta för att få en samlad bild av det stöd som i dagsläget finns tillgänglig.

3.2.1 "Om krisen eller kriget kommer till Sveriges lantbruksföretagare" - SVA

Broschyren "Om krisen eller kriget kommer till Sveriges lantbruksföretagare" är en sampublikation framtagen av Statens veterinärmedicinska anstalt (SVA), Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Lantbrukarnas Riksförbund (LRF), Hushållningssällskapet samt andra bransch- och rådgivningsorganisationer.

Broschyren utgavs hösten 2024 och riktar sig till lantbrukare för att hjälpa dem att planera för kris eller krig och innehåller bland annat en checklista för ökad beredskap. Denna ska fungera som inspiration och stöd för livsmedelsproducenter. Huvudsyftet är att hjälpa lantbrukare att förstå vad de kan göra för att bli mer robusta och fungera bra vid eventuella störningar [9].

År 2025 kom en ny och mer omfattande version under namnet "Rusta gården – om krisen eller kriget kommer", som bygger på feedback från 447 lantbrukare [10].

SVA har även publicerat checklistor som är anpassade efter olika typer av lantbruk, till exempel för växtodling samt gris-, fjäderfä-, mjölk- och köttproduktion. Tanken är att checklistorna ska hjälpa lantbrukaren att identifiera vad som är viktigast för just den egna verksamheten, som ett första steg mot en högre beredskap [11].

3.2.2 "Beredskapshandboken" - LRF

Lantbrukarnas riksförbund, LRF, har tagit fram en beredskapshandbok med information kring de frågor som rör lantbruksföretag i Sveriges kommuner. Handbokens huvudbudskap är framförallt att kommunerna bör inkludera LRF's kommunavdelningar i samtliga planeringsprocesser som kan beröra lantbruken, för att säkerställa att deras behov tas i beaktande. De menar att lantbruksföretagen och även andra aktörer i livsmedelskedjan ska inkluderas i planerna för den kommunala beredskapen och att detta till exempel är i frågor gällande kommunal måltidsverksamhet, livsmedelsbutiker eller reservkraft och styrel. Det är några områden som direkt relaterar till den enskilda lantbruksföretagaren utifrån ett energiförsörjningsperspektiv och det är till exempel frågan om reservkraft och styr-el. Under rubriken "Energi" i Beredskapshandboken beskrivs även att kommunens beredskap bör främja lokal energiproduktion som biogas, småskalig vattenkraft och lokala energigemenskaper [12].

3.2.3 "Greppa Näringen" - Greppa

Greppa Näringen är ett kunskapsprojekt som erbjuder kostnadsfri rådgivning till lantbrukare om vad som kan göras på gården för att bland annat bli mer robust mot störningar på elnätet, minska växtnäringsförluster och minska klimatpåverkan. Projektet tillämpar flera olika metoder för kunskapsspridning, däribland kurser, fältvandringar och individuell rådgivning på gården. Rådgivningen är uppdelad i specifika moduler som exempelvis hanterar klimatfrågor, biogas samt vattenförsörjning och beredskap. Bakom satsningen Greppa Näringenstår ett samarbete mellan Jordbruksverket, LRF, länsstyrelserna och flera olika rådgivningsorganisationer i Sverige, och ingår i det svenska miljöprogrammet som finansieras av Sverige och EU [13] [14].

En av Greppa Näringens rådgivningsmoduler är Beredskapskollen. Inom ramen för denna modul får lantbrukare hjälp att arbeta fram en plan för att kunna upprätthålla verksamhetens funktioner vid störningar, såsom elavbrott, cyberangrepp, transportavbrott eller brist på kritiska insatsvaror. Under rådgivningstillfället går rådgivaren och lantbrukaren gemensamt igenom verksamheten. Tillsammans identifierar de risker och sårbarheter, diskuterar möjliga åtgärder och sammanställer slutligen informationen i en konkret åtgärdsplan. Lantbrukaren får även vägledning kring vilka ekonomiska stöd som finns tillgängliga att söka samt rekommendationer om fortsatt rådgivning [3].

Eftersom krisberedskap är ett omfattande ämne kan dock detaljnivån på rådgivningen variera. Vid en intervju med en energirådgivare inom Beredskapskollen framkom det att djupet i analysen kan skilja sig åt beroende på vem som utför rådgivningen [15]. Denna bild bekräftas vid en intervju med Maria Källming [16], ansvarig för Beredskapskollen på Jordbruksverket. Hon förklarar att det är många delar inom beredskap som ska ses över, och på grund av att rådgivningen är tidsbergränsad hinner man inte göra en djupgående analys av samtliga områden under ett och samma besök. Hon betonar dock att rådgivningen fungerar som ett viktigt första steg mot vidare insatser: "Under besöket diskuteras även möjligheten att utnyttja investeringsstödet för robust primärproduktion och om Greppa Näringens övriga rådgivningsutbud kan hjälpa till att rusta företaget", säger Källming [16].

3.2.4 "Handbok om energieffektivisering" - HIR Skåne

Handboken om energieffektivisering är en praktisk guide och ett utbildningsmaterial som innehåller råd, nyckeltal och metoder för att minska energianvändningen. Rapporten är utgiven av Hushållningssällskapet (HIR: Hushållningssällskapets individuella rådgivning), och är en påbyggnad på LRF:s tidigare arbete "Underlag energieffektivisering". Den riktar sig till lantbrukare, rådgivare och andra aktörer i lantbrukssektorn. Handboken kombinerar teoretisk kunskap med praktiska åtgärder och är uppdelad i olika kapitel för olika typer av lantbruk, där den tar upp allt från uppvärmning och ventilation till belysning och maskiner [17].

3.2.5 "Robusta gården" - Hushållningssällskapet

Robusta Gården är ett utvecklingsprojekt som genomfördes för att stärka lantbrukets förmåga att klara av kriser. Projektet avslutades 2025 och var ett samarbete mellan Hushållningssällskapet och Vasen Lantbruk i Småland. Syftet med projektet var att ta fram ett koncept och en metod för lantbruk att genomgå en grön omställning, samtidigt som gårdens drift kan upprätthållas även vid elavbrott [18]. Resultaten har sammanställts i en slutrapport som beskriver praktiska lösningar för hur lantbruk kan bli mer självförsörjande på energi och därmed minska sitt beroende av det allmänna elnätet [19].

3.3 Ekonomiska styrmedel, investeringsstöd och gröna avdrag

3.3.1 Investeringsstöd för robust primärproduktion - Jordbruksverket

Från och med den första april 2025 kan primärproducenter söka investeringsstöd för göra sitt företag mer robust. Stödet är endast riktat till producenter av råvaror som kommer att bli livsmedel. För att få stödet finns det krav på företagets storlek och omsättning, samt krav på hur länge företaget varit i verksamhet. Investeringsstödet vänder sig till flera olika typer av livsmedelsproducerande lantbruk och kan nyttjas till flera olika resiliensåtgärder. I enlighet med syftet för projektet kommer ett förtydligande kring begränsningar och möjligheter vad gäller specifikt energiresiliens och elförsörjning att beskrivas här. Grundprincipen för att kunna få stöd är att det tydligt måste framgå hur den tänkta investeringen kommer att bidra till företagets ökade förmåga att fortsätta bedrivs livsmedelsproduktion vid höjd beredskap och ytterst krig. Givet detta så kan primärproducenter få stöd för att öka motståndskraften mot:

- Strömavbrott eller långvariga avbrott i energiförsörjningen
- Långvariga avbrott i vattenförsörjning inom din animalieproduktion
- Långvariga avbrott i transporter som i sig leder till ett ökat behov av lagring eller bearbetning av råvaror

- Brist på kritiska insatsvaror

Det finns dock några viktiga begränsningar och installationer som inte går att få investeringsstöd för.

1. Investeringar som tar jordbruksmark i anspråk i syfte att producera förnybar energi genom solenergi **kan du inte** få stöd för.
2. Om du ska investera i infrastruktur för förnybar energi, som nya solceller eller batterilager som kopplas till befintliga solceller, så får den genomsnittliga produktionen av el inte överstiga företagets och det egna hushållets konsumtion av el per år.
3. Batterier måste kunna säkra ö-drift för att ha rätt till investeringsstöd. Det innebär att:
   (a) Elanläggningen ska kunna kopplas från elnätet och köras i ö-drift vid elavbrott. Det innebär att ett begränsat elnät kan isoleras från det stora elnätet och drivas helt självständigt.
   (b) Installerade batterier måste kunna laddas med el från solcellerna även vid elavbrott. Solcellerna måste därför vara integrerade i ö-driften.
   (c) Du behöver ha tillstånd av nätägaren för att få koppla ifrån din elanläggning vid elavbrott.
4. Stöd ges inte för investeringar som avser produktion eller användning av bioenergi (inklusive biobränsle) om bränslet är framställt av livsmedels- eller fodergrödor.
5. Investeringar i fordon som omfattas av Klimatklivet (Naturvårdsverket) eller Klimatpremie (Energimyndigheten) kan du ej få investeringsstöd för.
6. Investeringar som avser ersättning av en anläggning, utrustning eller en maskin med i huvudsak samma funktion, prestanda eller egenskap som den tidigare kan du ej få investeringsstöd för.

För att beviljas stödet krävs det att investeringen är stödberättigad och utgifter uppgår till minst 50 000 kronor. Jordbruksföretag kan få upp till 65 % av de stödberättigande utgifterna täckta, med ett maxbelopp på 5 miljoner kronor. Det finns även möjlighet att få halva stödbeloppet utbetalt i förskott [20].

3.3.2 Klimatklivet-naturvårdsverket

Klimatklivet är ett investeringsstöd som kan sökas av kommuner, regioner, företag och organisationer i hela Sverige. Naturvårdsverket har huvudansvaret för stödet, medan Länsstyrelsen innehar en strategisk roll genom att informera om stödet på regional nivå [21].

Syftet är att ge stöd till projekt och investeringar som på något sätt bidrar till den gröna omställningen. Stödet går till fysiska investeringen som verkar för att minska koldioxidutsälppen och för omställning till förnybar energi [22].

Hur stort belopp som beviljas skiljer sig åt beroende på flera faktorer, såsom typ av åtgärd, företagets storlek, geografisk placering samt investeringens ekonomiska resultat under dess livslängd. Som max kan stödet uppgå till 70 % av investeringens värde, men ligger vanligtvis i intervallet 20–65 % [23].

3.3.3 Klimatpremie-energimyndigheten

Energimyndigheten, på uppdrag utav regeringen, delar ut klimatpremier till företag, kommuner och regioner för investering i miljöfordon som till exempel elbussar, lätta ellastbilar eller

miljöarbetsmaskiner. Hur mycket stöd som beviljas avgörs av hur mycket dyrare miljöfordonet är i inköp jämfört med ett likvärdigt standardfordon [24].

Energimyndigheten definerar miljöarbetsmaskin som "*ett motorredskap eller en traktor som har en kontinuerlig motoreffekt på minst 10 kW och som är avsedd att drivas enbart av el eller ett annat biodrivmedel som inte kan användas i motorer som kan drivas av fossila bränslen.*"

Syftet med stödet är att öka användningen av miljöfordon, vilket bidrar till minskade växthusgasutsläpp och en bättre miljö [25].

3.3.4 Bidrag för produktion av biogas

För att minska jordbruksföretagens fossilberoende, öka lokal elproduktionen och därmed öka resiliensen mot höga energipriser finns det nu ett driftstöd för produktion av biogas. [26] Stödet riktar sig till aktörer som producerar biogas från stallgödsel eller som uppgraderar biogas till biometan i gas- eller vätskeform [27]. Stödet förvaltas av Energimyndigheten och uppgår till högst 40 öre per producerad kWh. [26]

3.3.5 Ekonomiska vinster

Genom att utöka lantbruket med egen elproduktion och lagringssystem minskar beroendet av externa aktörer. Ett stabilare elpris och en ökad självförsörjandegrad kan uppnås, vilket sammantaget talar för tydliga ekonomiska vinster. [28]

3.3.5.1 Ekonomisk nytta från solcellsproduktion

För en solcellsanläggning finns flera löpande ekonomiska incitament. Dels skapas värde genom den egenanvända elen, vilket innebär att man undviker de kostnader som annars tillkommer vid inköpt el. Denna besparing inkluderar själva elpriset, energiskatt, elcertifikatsavgift, rörlig elöverföringsavgift och moms. För anläggningar under 500 kW gäller dessutom ett undantag från energiskatt på den egenproducerade elen.

Därtill kan överskottsel som inte används matas ut på nätet och säljas, vanligtvis till den nordiska elbörsens spotpris. Vid inmatning betalar elnätsföretaget även ut en ersättning för så kallad nätnytta. Om anläggningen är större än 50 kW tilldelas man dessutom ursprungsgarantier per producerad MWh, vilket utgör ytterligare en inkomstkälla [29] [30].

3.3.5.2 Ekonomisk nytta från produktion kombinerat med energilagring

Genom att integrera ett batterilager i systemet kan de ekonomiska vinsterna optimeras ytterligare på lokal nivå. Som en expert uttrycker det i ATL kan lagrad ström i batteriet användas för att kapa effekttoppar: "På det sättet kan det gå att ha en mindre huvudsäkring med lägre avgift. Om gården har solceller eller elproduktion från biogas kan man öka sin självförsörjningsgrad genom att lagra ström vid överflöd och använda senare"[28].

3.3.5.3 Ekonomisk nytta genom att agera stödtjänst

Utöver den lokala nyttan går det även att ansluta energilagret till en stödtjänstmarknad för att hjälpa till att balansera elnätet, vilket samtidigt ger ekonomisk ersättning [31].

För att kunna hålla balansen på elnätet köper Svenska kraftnät stödtjänster från marknadens aktörer. Behovet av stödtjänster kommer att öka då fler intermittenta krafter ansluts till nätet [32]. Själva handeln med stödtjänster sker mellan BSP-aktörer och Svenska kraftnät. Detta

medför att den ekonomiska ersättningen först går till BSP-aktören, som sedan betalar underleverantörerna, vilka slutligen ersätter resursägaren. För att man som resursägare ska kunna delta och leverera stödtjänster krävs därför att ett avtal tecknas med en BSP-aktör, en underleverantör och/eller en aggregator (som aggregerar en mängd resurser för att gemensamt leverera stödtjänster) [33]. Exempel på BSP-aktörer är E.ON Sverige AB, Fortum Sverige AB och Stockholm Exergi AB [34].

3.4 Drift av svinproducerande lantbruk och nyckeltal

Svin- eller grisproduktion omfattar både smågrisproduktion och slaktsvinproduktion. Tidigare har det varit vanligt att produktionen var uppdelad med flera aktörer i kedjan. Nu går trenden allt mer mot helintegrerade system, där samma gård har grisarna från födsel till slaktmogen ålder [17].

Tabell 1: Kopia av tabell ur handboken om energieffektivisering som visar den procentuella fördelningen av energianvändare för ett integrerat svinproducerande lantbruk [35]

Energianvändare	kWh/kg slaktvikt	Fördelning %
Utfodring el	0,11	4
Utfodring drivm.	0,01	0
Ventilation	0,12	54
Utgödsling el	0,01	1
Utgödsling drivmedel	0,01	0
Belysning	0,03	4
Uppvärmning el	0,03	36
Uppvärmnin. olja, gasol	0,04	0
Uppvärmnin. biobränsle	0,01	0
Övrigt el	0,01	2
Övrigt drivmedel	0,00	0

I tabell 1 finns värden för hur energin används på ett svinproducerande lantbruk med integrerat system. Fördelningen är ett genomsnitt baserat på 25 lantbruk. Det framgår att ventilation tillsammans med eluppvärmning är de största lasterna följt av utfodringen och utgödslingen [17].

3.4.1 Temperaturkrav och uppvärmningsystem

Vid djurhållning har uppvärmningen en viktig roll i att bibehålla komfort för djuren och det är även nödvändigt för grisarnas foderupptagningsförmåga. Beroende på ålder hos djuret varierar temperaturbehovet mycket – vilket innebär att ett lantbruk med integrerad produktion måste kunna hålla olika temperaturer i olika delar av verksamheten. Dräktighetsavdelningar ska hålla temperaturen mellan 15 och 20 grader och några dagar före grisning ska suggorna ha en temperatur närmre 20 grader. Nyfödda kultingar behöver upp till 33 grader och ca 5 veckor senare ska samma kultingar istället ha 24 grader. För att hålla kraven behöver värmesystemet vara anpassat efter detta och bestå av flera olika delar så som värmepanna, värmeslingor, värmelampor, värmefläktar och ventilation [17].

3.4.2 Utfodring

Elåtgången för utfodring varierar beroende på typ av svinproduktion. Inom smågrisproduktion ses en stor variation i elanvändning, eftersom utfodringen kan ske på många olika sätt. För

slaktsvinsgårdar är variationen mindre, då alternativen främst är torr- eller blötutfodring. Den största skillnaden i elanvändning inom slaktsvinsproduktion avgörs av hur foderberedningen är organiserad. Vissa lantbruk köper spannmål eller använder eget spannmål som mals internt, medan andra köper färdigt foder [17]. För att mala fodret används vanligen en hammarkvarn eller skivkvarn. Fördelningen av partikelstorlekar i fodret är viktig för grisarnas foderutnyttjande. Ju högre malfinhet partiklarna har desto högre blir elförbrukningen. I handboken "Handbok om energieffektivisering" (beskriven i avsnitt 3.2.4) redovisas medelvärden från sex kvarnar vid malning av vete och korn med en vattenhalt på 14%. Där visas att en partikelstorleksfördelning där 80% av fodret är finare än 1 mm motsvarar en elförbrukning på cirka 15 kWh per ton vete eller korn, medan 65% under 1 mm ger en elförbrukning på cirka 10 kWh per ton och 50% under 1 mm cirka 9 kWh per ton. Det är dock viktigt att beakta att avvägingen mellan fin- och grovmalet foder inte endast är en energifråga utan malningsgraden påverkar foderupptagningsförmågan där ett mer grovmalt foder sänker foderupptagningen [17].

Det är även skillnad i elförbrukningen beroende på typ av utfodringssystem, där fodret antingen tillhandahålls i torr eller flytande form. Vid torrutfodring så används skruvar eller kedjesystem med medbringare i rör för att transportera fodret. Torrutfodringen har en kortare och mindre energikrävande process jämfört med blötutfodring där det behövs blandartank och foderpump. Blandartanken utgör den mest energikrävande delen av systemet. Blötutfodring delas upp i två olika system kallade rundpumpningsystem eller restlöst system. Det som skiljer de åt är att det restlösa systemet inkluderar renspolning mellan utfodringstillfällena, vilket innebär att inga foderrester blir kvar i systemet och därmed ger något mer energieffektiv drift. Trots att elförbrukningen generellt är högre för blötutfodring än torrutfodring är blötutfodring det vanligast förekommande systemet. Detta beror bland annat på dess flexibilitet samt att det underlättar transport av foder från ett centralt foderkök till andra delar av lantbruket [17].

3.4.3 Ventilation

Ventilation för djurstallar är svårbedömt då mätningen är svår att genomföra. Detta är delvis på grund av att data över driftstid, märkeffekt och belastning inte alltid noteras.

De tre olika typerna av stallventilation som beskrivs i handboken "Handbok om energieffektivisering" (beskriven i avsnitt 3.2.4) är naturlig ventilation, neutraltrycksventilation och undertrycksventilation. Naturlig ventilation drivs av vinddrag eller skorstenseffekten och kräver således inga fläktar. Som en "Nivå 3-åtgärd" för att minska energibehovet så beskrivs bland annat naturlig ventilation på en punkt. Det står dock även att denna åtgärd ej kan vidtas för djurslag med höga krav på jämnt klimat och temperatur [17].

I en rapport från SLU [36] så står det ordagrant att "Grisar är mycket värmekänsliga och beroende av välfungerande ventilation i stängda stallar". En av styrkorna hos ekologiska lantbruk är att i de fall där djuren har tillgång till utevistelse, så finns en högre resiliens mot elavbrott. Djuren har oftare tillgång till att gå ut i hallar där ventilationen till exempel är naturlig och inte energiberoende. Naturlig ventilation förekommer även i konventionella system [36].

I handboken "Handbok om energieffektivisering" (beskriven i avsnitt 3.2.4) beskrivs det att grisstallar och framförallt slaktsvinstallar är i behov av kraftig ventilation för borttransportering av fukt och gaser. På grund av detta finns det även stor risk för att en betydande andel av värmetillförsel blir värmeförluster genom ventilationen. Handboken anger att under vintertid kan värmeförlusten i ett slaktsvinstall variera mellan 50-75 % vilket kan jämföras med en vanlig villas förluster på cirka 15 %. Det är därför av betydande vikt att eventuell tilläggsvärme samregleras med ventilationen och endast är på då ventilationen är på minimikapacitet [17].

Energifördelningen anger att ventilationen i genomsnitt står för 35 % av energiåtgången i

slaktsvinproduktion och blir således den enskilt största kategorin [17].

3.4.4 Energiförbrukning

Enligt statistik framställt av Energimyndigheten uppgick jordbrukssektorns elanvändning till 1 493 GWh år 2024 [37]. Jordbrukssektorn står för den största andelen av energianvändingen när man kartlagt och jämfört sektorerna jordbruk, skogsbruk, fiske och rennäring. Siffror från 2008 visar på att jordbrukssektorns energianvädningen uppgick till 4 410 GWh, där energi inkluderar el, diesel och bränsle för uppvärmning. Inom energikartläggningen har jordbruket därefter delats upp i grupperna djurhållning, växtodling av jordbruksgrödor samt trädgårdsodling/växthus. Resulatet av energikartläggningens visar på att djurhållningen står för majoriteten av elanvädningen inom sektorn jordbruk [8].

Elanvändningen skiljer sig beroende på typ av djurproduktion då det finns olika systemtyper samt skillnader i behov. De huvudsakliga energikrävande momenten på gården är uppvärmning, utfodring, utgödsling, belysning, ventiliation och mjölkning. Det skiljer sig även vilket moment inom djurhållningen som svarar för den största delen av elanvädningen. För grisproduktion så står uppvärmningen för den största andelen [8].

I en rapport publicerad av jordbruksverket presenteras nyckeltal för olika djurproduktioninriktningar. Där anges nyckeltalet 0,59 kWh/kg kött för slaktsvin och 85,94 kWh/smågris [8].

Förutom antalet djur så påverkar även yttre faktorer energiförbrukningen. Förutsättningarna mellan gårdarna kan skilja sig mycket där faktorer som tekniska lösningar, geografiskt läge pch anläggningens byggår kan ha en betydande faktor [8].

3.4.5 Energieffektivisering

I handboken "Handbok om energieffektivisering" (beskriven i avsnitt 3.2.4) presenteras olika åtgärder för energieffektiviseirng inom lantbruk med grisproduktion. Åtgärderna delas upp i tre olika prioriteringsnivåer baserat på kostnad, komplexitet och genomförandetid. Nivå 1 omfattar enklare åtgärder som kan genomföras snabbt och ofta utan kostnad. Några exempel som nämns är att inte mala fodret för fint, regelbundet underhåll av torrutfodring och ventilationssystem samt optimera foderblandningen, som är direkt kopplat till blandningstiden. Nivå 2 innefattar åtgärder som tar längre tid och där en mindre kostnad förekommer. Ett exempel på en sådan åtgärd är att samordna styrningen av värme och ventilation, så att uppvärmningen endast sker när ventilationsflödet är lågt. I nivå 3 så inkluderas åtgärder som kräver större ingrepp och kostnad. Det kan vara att ersätta en oljepanna eller direkt elvärme med en biobränslepanna eller en värmepump. Något annat som nämns är att förbättra isoleringen i stallet [17]. Genom att energieffektivisera kan elbehovet minska vilket då i sin tur minskar påverkan av externa faktorer som till exempel variationer i pris [17].

3.5 Referensgården KH Lantbruk AB

Detta arbete baseras på en referensgård vid namn KH Lantbruk AB på Öland. KH Lantbruk AB bedriver en kombinerad verksamhet bestående av smågrisproduktion och uppfödning av nötkreatur (köttdjur). Enligt information från lantbrukarna som driver gården så är nötköttsproduktionens elbehov försumbart i jämförelse med svinproduktionens, därmed har en avgränsning gjorts där nötkreaturen exkluderas för att helt fokusera på svinproduktionen.

Utifrån uppgifter från Joakim [38], en av lantbrukarna på KH Lantbruk AB, förfogar gården i dagsläget över lokal elproduktion i form av solceller och biogasanläggning, där biogasen fungerar som basproduktion. Trots denna lokala produktion är lantbruket i dagsläget inte helt

självförsörjande på el. Den årliga totala elförbrukningen uppgår till cirka 433 190 kWh. Till detta bidrog biogasanläggningen med en produktion på 260 899 kWh och solcellsanläggningen med 233 722 kWh år 2025. Egenanvändningen samma år uppgick till 192 546 kWh av biogaselen och 74 000 kWh av solelen. Eftersom elproduktionen och gårdens effektbehov inte alltid infaller samtidigt, uppstår i perioder ett överskott som exporteras ut på det allmänna elnätet (cirka 159 722 kWh år 2025). Under de timmar då den egna produktionen inte räcker till är gården omvänt beroende av elimport, som under år 2025 totalt uppgick till 166 164 kWh.

Det finns ett uttalat intresse från ägarnas sida att bygga ett smart elsystem för ökad robusthet och för att i framtiden möjliggöra ö-drift.

Gårdens största elektriska laster, som därmed inkluderas i studien, utgörs av utfodringssystem, värmepanna, värmefläktar, värmelampor, ventilation, tryckutgödsling, gödselpump samt system för tvätt och blötläggning. Samtliga av dessa laster styrs manuellt via handpåläggning, med undantag för ventilationen som är temperaturstyrd.

I dialog med Joakim [38] framkom det att det finns möjlighet att optimera maskindriften på gården genom att förändra driftstiderna för de flexibla maskinerna. På KH Lantbruk AB bedömer Joakim [38] att detta är genomförbart för i princip samtliga maskiner, med undantag för utfodringen som måste ske vid specifika, tidsbestämda timmar. Därmed klassificeras utfodringen som en tidskritisk last.

Vid ett eventuellt nätbortfall och övergång till ö-drift är de kritiska funktioner som måste upprätthållas på gården ventilation, uppvärmning, vattenförsörjning och utfodring. Gårdens kritiska behov varierar beroende på säsong. Under vintern är uppvärmningen avgörande för smågrisarnas överlevnad, medan vattenförsörjningen är det mest kritiska under sommaren. Då denna studie är strikt avgränsad till elsystemet kommer vattenförsörjningen inte att beaktas i den vidare analysen.

Tabell 2: Sammanställning av gårdens maskiner, deras effektbehov samt generella driftsmönster.

Maskin / Last	Effekt (kW)	Driftstimmar
Värmelampa	10,0	Konstant dygnet runt
Spannmålstork	21,0 / 42,0	Dagtid (11:00–19:00) under aktiva veckor
Värmefläkt 1	18,0	Konstant under vintertid
Värmefläkt 2	18,0	Konstant under vintertid
Värmepanna	26,5	Konstant under vintertid
Ventilation	okänd	Konstant men varierar med temperatur och säsong
Utfodring 1	2,0	Start 07:00, ca 1h
Utfodring 2	2,0	Start 08:00 & 17:00, ca 1h
Utfodring 3	4,0	Start mellan 10:00 & 12:00 samt mellan 22:00 & 00:00, ca 1h
Gödselpump 1	3,75	Start mellan 06:00 & 09:00, ca 10 – 20 min
Gödselpump 2	5,0	Start mellan 06:00 & 07:00. ca 10 – 20 min
Tryckutgödsling	5,5	Start mellan 07:30 & 10:30, ca 30 min
Blötläggning 1	8,5	Start morgon samt 16:00, ca 1h
Blötläggning 2	8,5	Start 14:00, ca 2 – 3h
Tvätt	8,5	Start mellan 06:00 & 12:00, ca 1h

I tabell 2 visas samtliga stora laster och tillhörande driftschema angivet av lantbrukaren Joakim [38]. Samtliga maskiner genererar en gemensam lastkurva och i vilken del av anläggningen som en aktivitet sker är inte specificerat.

Vid fastställandet av gränserna för de referensvärden som används i arbetet har samtliga nämnda data beaktats samt den summerade importen och exporten av el från gårdens växelriktare.

4 Teknisk referensram

Ett lantbruks resiliens och robusthet kan stärkas genom möjligheten till ödrift och en högre grad av självförsörjning. Med ödrift avses att energisystemet kan fungera utan koppling till externa energisystem [17]. För lantbruk finns flera tekniska lösningar för lokal elproduktion, däribland vindkraft, solkraft, elprodoktion från biogas samt elproduktion baserad på pyrolys- och ORC-tekniker [17].

Egen elproduktion, till exempel från solceller, kan bidra till att stärka lantbrukets ekonomiska robusthet. Detta beror på att gårdens elkostnader i lägre utsträckning blir beroende av oförutsägbara marknadspriser, givet att el inte längre köps in, till att istället baseras på de egna interna produktionskostnaderna [17].

4.1 Lokal elproduktion och självförsörjning

Statistik presenterad av energimyndigheten visar på en stigande trend där solkraftproduktionen och antalet jordbruk med installerat solceller har ökat. Enligt energimyndighetens databas för energirelaterad statistik var rikets totala elproduktion från solceller 52 706 MWh år 2018. År 2021 steg det till 130 953 MWh och 2024 var motsvarande värde 246 389 MWh [39].

4.1.1 Solceller

Solceller är små enheter som kopplas ihop till större moduler, även kallat paneler. I vardagligt språk brukar dessa begrepp användas synonymt med varandra och så även i denna rapport för enkelhetens skull.

Grundprincipen för en solcell är att omvandla solljusets energi direkt till elektrisk energi. När solcellen belyses träffas materialet av fotoner. Om fotonerna har rätt energinivå slår de loss elektroner och via ett inbyggt elektriskt fält tvingas de lösslagna elektronerna att röra sig mot cellens ena sida, vilket gör ena sidan negativt laddad och den andra positivt laddad. På så vis byggs en spänningsskillnad upp över solcellen. Genom att koppla en yttre krets mellan solcellens båda sidor tillåts elektronerna att vandra tillbaka till den elektronfattiga sidan. Detta är precis det som ger upphov till den elektriska likström (DC) som solcellen genererar [40].

Eftersom elnätet är uppbyggt med växelström (AC) och elapparater använder det för att fungera måste solanläggningen ha en växelriktare för att göra om likströmmen till växelström. Växelriktaren justerar även belastningen av solcellerna för att optimera systemet och generera maximal effekt [30].

För att producera el från solen krävs det en viss mängd instrålning på panelerna. Ju mer instrålning, desto mer effekt går att ta ut. Hur stor instrålningen är beror framförallt på solens position relativt panelerna – detta varierar både över dygnet och över året. Under sommaren har stora delar av Sverige sol nästan dygnet runt medan det vid vintertid på de nordligaste platserna råder total polarnatt, där solen aldrig rör sig över horisonten. Förutom solens rörelse över himlen påverkas solinstrålningen även av meteorologiska faktorer, såsom molnighet. Vid stora, täta moln kan instrålningen begränsas kraftigt. För att optimera instrålningen behöver hänsyn tas till både lokala och meteorologiska faktorer. Panelernas vinkel bör anpassas för att maximera effektuttaget under så stor del av året som möjligt [41]. Här spelar även skuggning från omgivande terräng in, liksom möjligheten att få plats med ett maximalt antal paneler

på takytan. Genom att installera fler paneler kan i regel mer effekt tas ut, men beroende på panelernas optimala vinkel kan en tät placering leda till att panelerna skuggar varandra [42].

Den el som solcellerna producerar kan användas på olika sätt beroende på anläggningens behov och systemets utformning. Det centrala problemet med solproducerad el är att den endast produceras under timmar med tillräckligt hög instrålning, vilket innebär att den högsta produktionen är mitt på dagen. Detta sammanfaller inte nödvändigtvis med när verksamheten har sitt högsta effektbehov, men för att kvantifiera hur den producerade elen nyttjas så används två begrepp, nämligen självförsörjningsgrad (self-sufficiency) och egenanvändning (self-consumption) [43].

Det centrala problemet med solproducerad el är att den endast produceras under timmar med tillräckligt hög instrålning, vilket innebär att den högsta produktionen är mitt på dagen. Detta sammanfaller inte nödvändigtvis med när verksamheten har sitt högsta effektbehov, men för att kvantifiera hur den producerade elen nyttjas så används två begrepp, nämligen självförsörjningsgrad (self-sufficiency) och egenanvändning (self-consumption) [43].

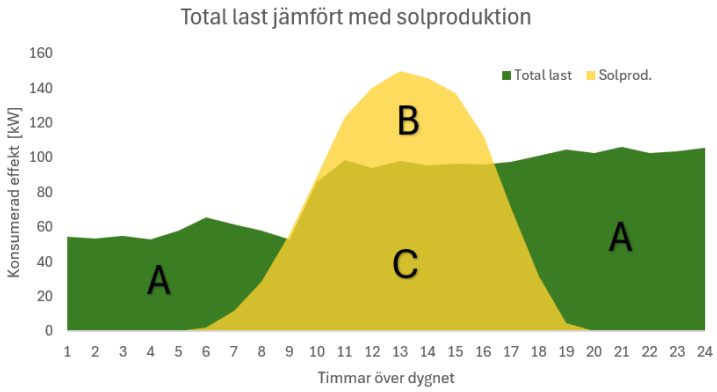
I Figur 1 representeras egenanvändningen av C och egenanvändningsgraden kan beräknas enligt:

$$\text{Egenanvändningsgrad} = \frac{C}{B+C}$$

[44]

På samma sätt kan självförsörjningsgraden beräknas som:

$$\text{Självförsörjningsgrad} = \frac{C}{A+C}$$ [44]



Figur 1: Grafik över det totala elbehovet (A+C), solproduktionen (B+C) samt den egenanvända solelen (C)

Egenanvändningen anger den andel av den totalt producerade solelen som konsumeras direkt inom fastigheten. En hög egenanvändning innebär att en liten del av produktionen exporteras till elnätet. Enligt Luthander et al. är egenanvändning per definition ett så kallat "load matching metric", vilket kvantifierar överlappet mellan last och produktion [43].

Självförsörjningsgraden anger hur stor andel av fastighetens totala elbehov (last) som täcks av den egenproducerade elen [43].

Skillnaden mellan begreppen ligger i vad den egenanvända elen ställs i relation till. Medan egenanvändningen är intressant utifrån att det ger en bild av hur väl produktion och behov matchar mot varandra [43], så handlar självförsörjningsgraden om hur väl fastigheten klarar sitt behov utan extern elimport. Det måttet är särskilt intressant ur ett resiliensperspektiv, eftersom en hög självförsörjningsgrad innebär ett lågt beroende av elnätet och således en lägre känslighet för strömavbrott [45].

4.1.2 Biogasproduktion

För lantbruk med djurproduktion finns möjligheten att producera biogas. Den biogas som produceras kan användas för elproduktion och på så vis bidra till en ökad självförsörjning av el [17].

Produktion av biogas kan ske på väldigt många olika sätt. Biogas är en mix av metan och koldioxid tillsammans med små mängder av andra gaser. Grunden för produktionen är en rötprocess, där organiskt material bryts ned i en anaerob (syrefattig) miljö. Det organiska materialet kan bestå av allt från olika sädesslag till matrester, gödsel eller slaktavfall. Enligt International Energy Agency (IEA) består biogasproduktionen idag främst av grödor och gödsel [46]. Enligt Lantbrukarnas riksförbund produceras biogasen i Sverige främst av restprodukter (bland annat gödsel) och avfall. Det gör gårdsbaserad biogasproduktion möjlig och för mindre anläggningar är det vanligast att använda gasen för elproduktion [17].

Enligt siffror från 2016 som Energiforsk hänvisat till i en artikel blir 60 % av producerad biogas i Sverige fordonsbränsle och resten el och/eller värme via gasmotorer/gaspannor/gasturbiner [47]. Motsvarande siffror finns att tillgå från Energimyndigheten för 2024, där de anger att en allt minskade mängd av totala biogasproduktionen går till el [48].

För biogasanläggningar som ligger en bit utanför stamnätet är möjligheten till elkonvertering lämplig. Energiutvinningen av biogasen via en stationär förbränningsmotor (CHP) sker på samma sätt som för ett diesel- eller bensindrivet fordon. Biogasen sprutas in i motorns cylindrar tillsammans med luft under högt tryck och tänds på med hjäp av en gnista. Då gasen brinner inuti cylindern trycks kolvar ned i tur och ordning, vilket genererar ett mekaniskt vridmoment i en vevaxel. Efter motorn sitter sedan generatorn som tar vara på det mekaniska arbetet i motorn och omvandlar det till el via elektromagnetisk induktion. Då magneterna inuti generatorn rör sig så kommer elektronerna inuti kopparledningarna att byta riktning - vilket ger upphov till den växelström (AC) som extraheras.

För att kör en biogagenerator i ö-drift krävs särskilda tekniska förutsättningar på plats. Beroende på om generatorn är asynkron eller synkron kommer kraven variera.

En asynkrongenerator kommer att stanna av då elnätet försvinner. Om ö-drift ska bli möjlig kräver det att frekvens- och spänningshållningen har en extern elkälla, så som BESS eller dieselaggregat. För att klara av dödnätstart kan dieselaggregatat eller BESS starta upp nätet. Om det är dieselaggregatet som upprätthåller detta går det åt mycket diesel, så en hybridlösning med BESS kan hålla nere förbrukningen. Efter att biogasgeneratorn startas upp igen kommer det kräva att antingen aggregatet eller BESS håller uppe frekvensen åt biogasanläggningen för att den ska kunna fortsätta att köra [19].

En synkrongenerator klarar av att upprätthålla frekvensen och spänningen under ödrift ensam. Det kan vara nödvändigt att ha någon batterilösning eller dieselaggregat för att reglera effektbehoet beroden på hur snabbt effekten går upp / ner. Det är också nödvändigt att ha BESS eller dieselaggregat vid dödstarten, men i övrigt kan generatorn hålla nätet uppe själv [19].

Asynkrongeneratorer har fördelen av att vara enklare att driva och billigare att investera i men de har fler begränsningar än synkrongeneratorn när det gäller ödrift. Det som Robusta Gården beskriver i avsnittet om ödrift för biogasanläggningar är att beroende på syfte och hur verksamheten drivs så kan en kombination av biogas, dieselaggregat och BESS vara den bästa lösningen eftersom att dieselaggregatet bidrar med robust försörjning medan BESS kan ta snabba variationer [19].

4.1.3 Energilagring - batterier

Ett batteri lagrar kemisk energi, vilken går att frigöra som elektrisk energi genom två reaktioner: oxidation och reduktion. För att kunna kontrollera energiutvinningen hålls dessa processer isär via två separata elektroder och en mellanliggande separator. Den ena elektroden (anoden) blir negativt laddad då reaktionen skapar ett överskott av elektroner medan den andra (katoden) är positivt laddad och elektronfattig. Laddningsobalansen skapar en spänningsskillnad mellan

batteriets poler och utgör grunden för elektrisk energiutvinning. Då polerna kopplas samman via en yttre krets, så tillåts elektronerna att vandra för att utjämna balansen. Denna enkelriktade elektronvandring är den elektriska likström (DC) som batteriet levererar [49].

Batteriets totala verkningsgrad bestäms av en kvot mellan hur många elektroner som laddas i batteriet jämfört med hur många som går att extrahera, den så kallade coulomb-verkningsgraden. Den andra verkningsgraden som batteriet beror på är spänningsskillnaden mellan uppladdning och urladdning [49].

Vidare är det viktigt att skilja på batteriets energiinnehåll (Wh eller Ah) som beskriver batteriets "uthållighet" och dess maximala effekt (kW) som begränsar hur tunga laster som batteriet kan driva momentant [49].

Förhållandet mellan kapacitet och effekt kan beskrivas av parametern "C-rate", vilken är hastigheten för hur snabbt ett batteri laddas ur. Enheten är given som urladdningshastighet per timme - så att 1C beskriver ett batteri som tömt på 1 timme och 0.5C ett batteri som laddas ur på 2 timmar. Eftersom att kapaciteten sjunker ju högre urladdningshastigheten är blir denna parameter viktig vid storleksdimensionering [49].

Batteriets aktuella energinivå, det vill säga hur mycket laddning det innehåller vid ett givet tillfälle, beskrivs av dess laddningsgrad, "Battery state of charge" (SOC). För att kunna nyttja 100 % av batteriets nominella kapacitet måste SOC gå från 100 % till 0 %. I praktiken kan dock inte ett batteri laddas ur helt. Det tillåtna urladdningsdjupet kallas "Depth of discharge" (DOD). Ett batteri med kapacitet på 500 Ahm och DOD = 20% bör endast ladda ur de "översta" 20 procenten, vilket i detta fall betyder att 100 Ah är OK att nyttja. Denna begränsning sätts av tillverkaren för att öka livslängden hos batterier och varierar mellan olika batterityper [49].

Förutom detta är faktorer som hur batteriet används, laddnings/urladdnings-mönster och temperatur alla saker som försämra batteriets sanna kapacitet. Med tiden kommer batteriet även att åldras och degraderas, vilket har en enorm inverkan på dess funktion [49].

4.2 Reservkraft

Begreppet reservkraft avser i denna kontext någon typ av reservelverk vars funktion är att agera back-up i händelse att det ordinarie elnätet ligger nere.

4.2.1 Funktion och driftprincip hos dieselaggregat

Ett dieselaggregat består av en motor och en generator. Generatorn är monterad på dieselmotorns axel och hela systemet monteras ihop med vibrationsdämpande plattor för att skydda och minimera ljud som uppkommer från de roterande delarna. Beroende på hur aggregatet ska användas så anpassas motorns bränslesystem efter hur driften kommer att se ut och hur länge den körs på full last. Eftersom aggregatet producerar stora mängder värme, som behöver kylas bort, är utformningen av kylning och ventilation också viktig att den fungerar som det ska [50].

Storleken hos ett aggregat beror helt och hållet på hur stor last som reservkraften ska kunna svara upp mot. Fysiskt större motorer har vanligen ett lägre varvtal för att begränsa rörelsehastigheten och det mekaniska slitaget. Ett mindre aggregat (under 100 kVA) har ofta ett varvtal på cirka 3000 r/min, medan ett större aggregat (över 100 kVA) vanligen ligger omkring 1500 r/min. För att ändå kunna få ut rätt nätfrekvens (50 Hz) oberoende av motorns storlek och varvtal, anpassas generatorns poltal därefter [50].

Styrsystemet hos dieselaggregatet är en samling av flera olika komponenter som behöver samordnas för att kunna hålla koll på det och se till att allt fungerar som det ska. Manöversystemet består av skyddsutrustning, manöverutrustning och automatikutrustning. Automatiksystemet

övervakar och styr anläggningen bland annat genom att ta in signaler från en extern nätvakt för att starta upp systemet vid bortfall av el. Detta tar upp mot 15 sekunder och kan ibland ta längre tid om flera system är sammankopplade, eftersom de då måste synkronisera med varandra först. Den spänning som uppkommer vid start av aggregatet matas in till det nät som ligger nere och samtidigt kopplas eventuella brytare som används för ordinarie matning bort. Manöversystemet är det manuella system som finns för att kunna styra systemet vid behov och är oftast bestående av start- och stoppknappar, brytare, fasningsutrustning och kontaktorer [50].

För att reglera spänningen hos en generator, som används som reservkraft och alltså i ödrift, så är det magnetiseringsströmmen som justeras upp eller ner. För att styra vridmomentet (varvtalet) så är det bränsletillförseln som regleras. arken spänningen eller varvtalet kan påverkas nämnvärt om generatorn är inkopplad mot ett starkt yttre nät, varför denna typ av reglering endast avser det fall där nätet ligger nere och aggregatet agerar ensam spänningskälla [50].

Bränslet till ett dieselaggregat kan lagras länge utan att förlora kvalité. Detta gäller för bränslet HVO100 som är gjort på förnybar biomassa [51].

4.2.2 Reservkraftens relevans för lantbruk

För ett modernt lantbruk är tillgången på en stabil spänningskälla en direkt förutsättning för att kunna garantera god djurvälfärd och driftsäkerhet även när det sker elavbrott. Reservkraftens roll blir att på ett snabbt och säkert sätt kunna upprätthålla både spänningsnivå och frekvens mot tunga, induktiva laster.

Det är möjligt att ersätta dieselagregaten med andra tekniska lösningar som batterilagring, elproduktion baserad på biogas, vätgaslösningar eller verticle-to-grid. Även solceller utrustade med växelriktare som möjliggör ö-drift kan bidra till att minska sårbarheten, men de kan inte ersätta dieselaggregat fullt ut, de fungerar mest som komplement [17].

4.2.3 Dimensionering av reservkraft - effektbehov och lastprioritering

Dimensioneringen av reservkraftverket bör, enligt faktaboken skriven av Kent Mayer, typiskt vara dubbelt så stor som den normala lasten [51].

Enligt en rapport publicerad av SVK bör dieselaggregatet dimensioneras på ett sådant sätt att belastningen för aggregatet aldrig är lägre än 25 % och aldrig större än 80 % av aggregatets märkeffekt. Förutom det beskriver rapporten att överlastskydden kan behöva anpassas till följd av stora startströmmar. Vidare listas de faktorer som behöver analyseras vid aggregatets dimensionering, vilka är: maxlast, sammanlagringsfaktorer av lasten, tillslag av last, motorlaster, olinjära laster samt spännings- och frekvensstabilitet [52].

Enligt Stockholm Marin- & Industrimotor AB (SMIM) finns det flera kritiska faktorer som avgör om ett reservkraftaggregat blir korrekt dimensionerat. Om analysen brister gällande parametrar som effektfaktor, startströmmar, lastprioritering och bränslebehov finns det en risk att verksamheten installerar ett system som antingen blir underdimensionerat eller överdimensionerat. Ett för litet aggregat kan leda till systemkollaps vid uppstart av tunga motorlaster, medan ett för stort aggregat blir en onödigt kostsam investering vars kapacitet sällan eller aldrig nyttjas fullt ut [53].

För att undvika felaktig dimensionering har SMIM publicerat en prioriteringslista med alla steg som krävs i en systematisk dimensioneringsprocess. Denna lista innefattar följande grundläggande delar:

1. **Lastprioritering:** Första steget är att bestämma vilka som är kritiska laster. Detta

bör exkludera komfort i ett första stadie och endast ta hänsyn till säkerhet samt den verksamhet som är driftkritisk.

2. **Lastkartläggning:** I nästa steg ska en lista med lasterna tas fram. Listan ska specificera vilken typ av last det handlar om och om den är resistiv, elektronisk, en frekvensomriktare eller dylikt. Att specificera detta är avgörande eftersom olika typer av utrustning belastar generatorn på olika sätt. En resistiv last (som värmeelement exempelvis) drar en jämn ström, medan elektroniska laster och frekvensomriktare drar ström stötvis. Ett "stötvis" effektuttag skapar störningar (övertoner) vilket ställer högre krav på generatorn så att den ofta behöver överdimensioneras. I listan ska det även anges vilken effekt (kW) som lasten drar och hur driftsmönstret för den ser ut. Efter att den kritiska, kontinuerliga, effekten har beräknats fram bör en säkerhetsmarginal på mellan 10-25 % läggas till som inkluderar osäkerheter i beräkningen och framtida reserv för eventuell utbyggnad av anläggningen.
3. **Hantering av startströmmar:** Sedan tas hantering av startströmmar och motorlaster upp. Det kan skilja väldigt mycket i vilket behov av startström en last har beroende på typ. Motorer kan i vissa fall kräva startströmmar mycket större än deras egen märkström för att starta, vilket kan vara upphov till problem om det inte tas med i beräkningarna. Om det finns stora motorlaster så bör reservaggregatet dimensioneras efter behovet som maskinerna har vid start och inte endast den kontinuerliga driftlasten. För att kunna minimera behovet av stora startströmmar är en vanlig strategi att lastprioritera och starta lasterna i turordning. En annan metod är att mjukstarta eller använda annan typ av begränsning för starten som frekvensomriktare.
4. **Effektfaktorn:** Det fjärde steget handlar om effektfaktorn och det förhållande som den anger. Aggregat är oftast märkta med volt-ampere, vilket anger den skenbara effekten och både innefattar aktiv och reaktiv effekt. Effektfaktorn, förhållandet mellan aktiv och reaktiv effekt, påverkas av lasttypen.
5. **Övergång till nät:** Femte steget täcker in överföring och återgången till vanliga nätet. För detta krävs en automatisk överföringsomkopplare som ger anläggningen möjlighet att växla mellan reservkraft och nätet när det är stabilit igen.
6. **Bränsle och uthållighet:** Det sista steget behandlar bränsleåtgång och driftstiden för aggregatet. Beroende på hur lång tid reservkraften måste klara av lasten så kommer det att påverka volymen för tank, servicebehov och val av bränsle. Vid låg användningsfrekvens kan även mindre vanliga bränsletyper vara aktuella, medan långvarig eller återkommande drift ställer krav på ett bränsle med god tillgänglighet.

4.3 Ödrift - principer och krav

För att kunna driva ett system i ö-drift så krävs en mycket högre förmåga till reglering och balansering än vad som behövs vid normal drift. Dessutom kommer ansvaret för att bibehålla frekvensen i ö-driftnätet att hamna utanför Svenska Kraftnät, vilket komplicerar fallet ytterligare. Grunden till att ett elnät fungerar utan störningar är för att frekvensen alltid ligger runt Sveriges standard på 50 Hz, samt att spänningen hålls på en jämn nivå. Den grundläggande förmågan som måste finnas i ödrift är öns egen förmåga att hålla en jämn balans mellan effektproduktion och effektuttag. I Sveriges elnät så styrs detta och planeras av SVK, där tillgången på resurser för att balansera är hela landets produktion- och konsumtionsenheter. I ett ödriftscenarie ska detta fungera lika bra, men endast med tillgång till ödriftsnätets egna enheter. Detta innebär i förlängningen att det måste finnas förutsättningar till dödnätsstart - och beroende på vilken typ av verksamhet som ligger inom ödriftsnätet ställs olika höga krav på hur snabbt detta måste ske. Det går dock aldrig att driva ett ödriftsnät utan egen produktion

eller utan egen förmåga till frekvens- och spänningsreglering [54]. Det finns även andra saker som måste fungera för att en mindre sektionering av nätet ska kunna fungera. Det handlar om andra problem som kan uppstå när ödriften är i ett svagt nät, och relaterar bland annat till kortslutningsströmmarna. Vid ö-drift i svaga nät är kortslutningsströmmarna ofta mycket lägre än vad de är inkopplade till elnätet - vilket kan skapa problem med bland annat utlösningen av skydd. Generellt sett så sjunker kortslutningsströmmen ju längre ut i nätet man befinner sig och då måste skydden vara anpassade för detta. I det allmänna starka nätet finns synkrongeneratorer vars felströmmar kan vara mellan 6 och 8 gånger märkströmmen vilket i jämförelse med ett mindre nät med växelriktare typiskt ligger omkring 1.2 till 2 gånger av märkströmmen. Eftersom att system utan ödriftförmåga utgår från att felströmmen som utlöser skydd är väldigt hög, så är det alltså detta som kan orsaka problem när en kortslutning inte bryts korrekt [55]. I en artikel från Elinstallatören tas just frågan kring allmänhetens okunskap gällande för låga felströmmar upp. Där trycker Ola Carlsson på vikten av att faktiskt veta att ens installerade anläggning faktiskt möter utlösningskraven och dimensionerar utefter detta. Vidare beskriver Bengt Assarsson att mätning av kortslutningseffekten är en av de första mätningar han gör på en plats. Han beskriver även att det inte brukar vara ett problem i villaområden, men att det på landsbygden kan vara ett svagare nät som kräver specifik dimensionering efter det. Ett exempel på just detta beskrivs av Cristofer Lundin, som själv gjort en ödriftsanpassning på sitt lantbruk. I artikeln berättar han att vid inkoppling till det starka nätet kan han uppmäta en kortslutningsström på 302 A och då han går i ödrift visar instrumentet istället 49 A [56].

Om det tilltänkta ödriftsnätet ska kunna kopplas tillbaka på nätet så finns det flera krav att uppfylla. Dieselaggregatet måste anpassa sig efter stamnätet före infasningen. Både spänningen och fasläget behöver matcha mellan generatorn och nätet innan det kopplas på igen och för att undvika spänningsfall bör generatorns frekvens vara något högre än nätets vid påkopplingstillfället vilket beskrivs i en sammanställning av dieselaggregat [50].

4.3.1 Frekvens- och spänningsreglering

Bortsett från att det måste finnas lokal elproduktion och förmågan till dödnätsstart så är det frekvens- och spänningsregleringen som måste lösas även när verksamheten är bortkopplad från nätet. Grundregeln är att produktion och konsumtion av el är i balans inom det nya ö-driftsområdet [54].

För att ett elnät ska fungera måste det nationellt sett produceras eller importeras lika mycket el som det konsumeras. Detta villkor gäller för varje ögonblick och är det som kallas momentanbalans. Skulle detta inte uppfyllas så kommer frekvensen på nätet att påverkas. I det svenska elnätet ska det alltid ligga på 50 Hz, med ett godkänt intervall mellan 49,9 och 50,1 Hz. Om produktionen momentärt är större än konsumtionen, kommer nätfrekvensen öka och alltså gå över 50 Hz. Detsamma gäller det omvända. Frekvensavvikelser hanteras om frekvensen antingen går under 49,8 eller över 50,3 genom primär eller sekundär balansreglering. Primär reglering innebär att några utvalda, stora vattenkraftstationers ledskenor antingen öppnas eller stängs mer. I sekundär balansreglering är det reglermarknaden som tar över, där SVK upphandlar reglerkraft av elhandelsföretag för att kompensera frekvensavvikelser [51].

För att upprätthålla spänningsstabilitet i nätet är det framförallt balansering av reaktiv effekt som är avgörande för att förhindra spänningsfall [51]. Medan frekvensen i det nationella elnätet är samma i hela Sverige (samt Norge, Finland och delar av Danmark) så är spänningen lokal. SVK styr detta genom att justera magneriseringen i de stora kraftverksgeneratorerna eller genom att koppla in reaktorer och kondensatorbatterier i ställverken. Eftersom att den reaktiva effekten påverkas av mängden induktiva laster så är det en balans av mängden komponenter som förbrukar reaktiv effekt (magnetfält i motorer och transformatorer) och de som skapar reaktiv

effekt (kondensatorer, kablar och övermagnetisering av generatorer) som ska balanseras. På grund av att spänningen är lokal så måste den reaktiva effekten produceras och konsumeras på rätt ställen i elnätet. Skulle detta inte upprätthållas finns det risk för spänningskollaps vilket kan innebära elavbrott för hela eller delar av systemet [57].

Denna princip gäller även om ett nät ska tas i ö-drift och kopplas bort från det nationella elnätet. Samma krav på en frekvens- och spänningsbalansering behövs för att inte riskera att maskiner går sönder, men nu finns inte samma stora reglerande krafter där för att hjälpa till.

Ansvaret på vem som ska upprätta systembalans i ö-drift förflyttas från SVK till det lokala elnätsbolaget som agerar ö-driftsledare och ansvarar för regleringen [54].

4.3.2 Systemtröghet och rotationsenergi (Inertia)

Tröghetsmoment är definierat som resistensförmågan till förändring av rörelse hos ett objekt och innefattar både hastighet och riktning [58]. För att applicera detta i kontexten av ett modernt elnät så är detta stora, roterande maskiner som synkrongeneratorer, turbiner och generatorer. Med mer förnybara energikällor i elnätet så kommer den nya elektroniken i allt högre utsträckning innebära att generatorn blir elektriskt frikopplad från elnätet. Det innebär att systemfrekvensen och rotationshastigheten inte längre är sammanlänkade och de kraftelektroniska omvandlarna har inte en inneboende förmåga att bidra med något tröghetsmoment till systemet. En annan nackdel hos förnybara, intermittenta, energikällor, som till exempel solproduktion, är att det inte finns någon lagrad energi hos dem då endast en liten mängd kan lagras i kondensatorerna jämfört med system som har roterande delar. Det som går att göra för att öka tröghetsmomentet är genom att spara energi i något typ av lager (exempelvis batterier) [59].

Som nämnts tidigare så kommer en ökad produktion jämfört med konsumtion momentärt att öka nätfrekvensen. Hastigheten på denna förändring begränsas av nätets samlade rotationsenergi, alltså trögheten, hos alla stora roterande generatorer. Det är det som ger kontrollsystemen tid att reagera på förändringen. Tekniskt sett sitter hela det nordiska elsystemet ihop vilket innebär att rotationsenergin som finns att tillgå för det nationella elnätet är stort. Vattenkraftverken kan reagera och förse nätet med nödvändig extra energi inom 3 sekunder, vilket är avgörande för att ge andra långsammare effektkällor möjligheten att starta upp och kunna reglera frekvensen [51].

Vid ö-drift finns inte den samlade kraften av hela nordens rotationsenergin och beroende på hur känslig utrustningen är och vad kraven på uppstartstiderna är behöver valet av reservkraft noggrannt ses över. Mer detaljer kring det inneboende momentet hos olika effektkällor behandlas i avsnitt 4.2 [51].

4.3.3 Kortslutningsnivåer och säkringsdimensionering i svaga nät

För att förstå mekanismerna bakom elsäkerhet och dimensionering i ett svagt nät är det viktigt att förstå sambandet mellan kortslutningsström, effektuttag och säkringarnas utlösningsvillkor. För detta kommer framförallt två matematiska samband att betraktas. Följande ekvationer beskriver sambandet mellan impedans, kortslutningsström och effektuttag. Den kortslutningsström som går att uppnå bestäms i grunden av nätets totala förimpedans (Z_{tot}) och spänningen (U). Föremklat kan detta förklaras med Ohms lag för växelström [60]:

$$I_k = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{tot}}} \text{(Ekvation 1) [60]} \tag{1}$$

Anläggningens maximala effektuttag (P) begränsas även av den valda huvudsäkringens märkström (I_n) enligt:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_n \cdot \cos\varphi \quad \text{(Ekvation 2) [60]} \tag{2}$$

Utifrån dessa samband kan den fysiska dimensioneringskonflikten vid ödrift sammanfattas enligt följande punkter:

- **Avståndet från stamnätet sänker felströmmen:** När en anslutningspunkt befinner sig långt ut från stamnätet leder det till en ökad resistens och reaktans i ledningarna. Detta kommer i förlängningen, enligt Ohms lag, leda till högre förluster och resulterar i att den möjliga kortslutningsströmmen som kan uppnås är mycket lägre än i områden som har nära till stora ställverk [61].
- **Säkringsdimensionering och utlösningsvillkoret:** Den primära uppgiften hos en säkring är att skydda mot brand och personskador genom att bryta strömmen vid fel. Detta sker genom att sökringen smälter till följd av den höga strömmen och på så vis bryter ett fel - normalt redan inom 0,4 sekunder. Om nätets kortslutningsström är lägre än den felström som krävs för att säkringen ska hinna lösa ut i tid så uppfylls inte utlösningsvillkoret. Detta resulterar i att felströmmen kommer fortsätta flyta i ledningarna och leda till överhettade kablar, brand och livsfara [62].
- **Ödriftens paradox: Kraftelektronik vs. stamnät:** Vid normal drift har anslutnignspunkten hela det nordiska kraftsystemet i ryggen, vilket är beskrivet i avsnitt 4.3.1. Då nätet kopplas bort, vid ödrift, kommer alltså den maximala felströmmen begränsas av lantbrukets egna, lokala produktionskällor. Kraftelektroniken i dessa enheter, t.ex. batterier, är värmekänsliga och smälter omedelbart vid stora strömmar (närmre beskrivet i avsnitt 4.1.3. Därför är tekniken programmerad att strypa utgående ström till ett maximalt värde av 1,1 - 1,5 gånger märkströmmen vilket är avsevärt lägre än den felström som hade uppstått vid inkoppling mot elnätet.
- **Minskad kapacitet som konsekvens:** Då anläggningen under ödrift endast kan leverera en bråkdel av den kortslutnignsström som stamnätet levererar är de befintliga, större säkringarna, en säkerhetsrisk. För att kunna uppfylla utlösningsvillkoret och undvika brand måste man dimensioenra ner säkringarna till en känsliga nivå som löses ut vid ödriftens felströmsnivåer. Det problem som finns i att minska säkringens märkström är att det sätter ett nytt tak för hur stor aktiv effekt som kan tas ut av anläggningen. Konsekvensen är ett lägre effektutnyttjande - vilket kan innebära att anläggningen inte längre kan täcka den last som det är planerat för att täcka eller att lantbruket står med ett överdimensionerat system som aldrig kan nyttjas fullt ut.

4.4 Att möjliggöra ö-drift på gårdsnivå

I detta avsnitt följer en genomgång över den teknik som krävs för att möjliggöra ö-drift.

4.4.1 Grid-forming växelriktare

En grid-forming växelriktare behöver inte ett externt nät att följa utan kan själv etablera en referens för frekvens och spänning. Den kan fungerar både nätansluten och i ö-drift. I microgrids kan både grid-forming och grid-following växelriktare användas. En grid-following växelriktare behöver en phase-locked loop (PLL) för att låsa sig till en extern referens, vanligtvis huvudnätet. En grid-forming växelriktare kan däremot själv agera som denna referens, vilket möjliggör ö-drift och autonom microgrid-drift. I kombination med bägge typerna så kan grid-following

växelriktaren låsa sig till gird-forming växelriktarens referensfrekvens och spänning [63].

Grid-forming växelriktare kan ha olika typer av styrning. Det kan antingen ske genom central styrning, där flera växelrikare ingår i systemet och centrala systemet/överordnade systemet mäter upp total last och sedan skickar styrsignaler genom et kommunikationsystem till växelriktarna. Det andra sättet är decentraliserad styrning, exempelvis droop-reglering. I detta fall finns ingen central styrenhet. Varje växelriktare mäter sin egen effekt, reagerar på förändringar och justerar lokalt frekvens och spänning. Denna metod anses mer robust ur säkerhetsperspektiv eftersom den inte är beroende av kommunikation och därmed är mindre sårbar för cyberattacker eller kommunikationsfördröjningar [63].

Den decentraliserade styrningen är avgörande för att växelriktaren ska kunna fungera utan externt nät. Det som görs är att styrstrategin/styrmetoden ger grid-forming växelriktaren en refernspunkt för spänning och frekvens. Det finns olika typer av kontrollstrategier, dessa innefattar droop-reglering och virtuella synkronmaksiner.Droop-reglering är en metod som bygger på en synkronmaskins beteende i stationär drift. Den baseras på två linjära samband: ett mellan aktiv effekt och frekvens (P–f) samt ett mellan reaktiv effekt och spänning (Q–V). Enligt P–f-sambandet medför en ökning av levererad aktiv effekt en liten sänkning av frekvensreferensen. På motsvarande sätt innebär Q–V-sambandet att en ökning av levererad reaktiv effekt leder till en liten sänkning av spänningsreferensen. Dessa avsiktliga avvikelser fungerar som styrsignaler i systemet. Om frekvensen sjunker indikerar detta då att den totala lasten har ökat, vilket gör att varje grid-forming-enhet ökar sin effektproduktion i enlighet med sin droop-karakteristik. Droop-karakteristiken/förstärkningen för en enhet beskriver/bestämmer hur mycket en enhet tar vid en viss frekvensändring [63].

Virtuella synkronmaskiner (VSM) är en mer avancerad metod som får växelriktaren att bete sig som en synkronmaskin. Eftersom en växelriktare saknar fysisk, som en synkronmaskin har, simuleras denna i mjukvara i reglersystemet, den skapar virtuell svängmassa. Det gör att systemet blir stabilare då frekvensförändringar blir mindre snabba [63].

Växelriktaren fungerar i sin tur som en spänningskälla som genom styrmetoderna kan anpassa sig momentant utefter lastens behov. Den kan då reglera lokal spänning, frekvensen samt producerad effekt utefter behovet. På grund av styrmetoderna som skickar in signaler så behövs därmed inget externt nät utan växelriktaren kan själv anpassa frekevns och spänning [63].

4.4.2 Sektionering och lastprioritering

Beroende på om anläggningen som ska gå i ö-drift ska kunna hålla alla funktioner levande, eller om det finns laster som kan kopplas bort vid ett strömavbrott, ser den fysiska kopplingen och kraven på systemets kapacitet olika ut. Exempelvis kan en anläggning välja ut kritiska laster som behöver prioriteras. Den önskade drifttiden (hur länge ön ska upprätthållas) påverkar också systemets dimensionering.

Full backup: Om ambitionen är att hela anläggningen ska drivas i ö-drift krävs ett fullt backup-system. Det innebär att anläggningens huvudcentral spänningssätts av växelriktaren. Detta ställer krav på utrustningen. Enligt Senergia är det vanligaste att växelriktaren i ö-drift kan mata ut asymmetriskt för att på så sätt kunna ta hand om trefaslaster. För att driva en hel anläggning vid strömavbrott krävs det att växelriktaren kan tillföra tillräcklig effekt för att klara tunga uppstarter (s.k. dödnätsstart) samt hantera höga startströmmar. Batteriet behöver också kunna tillföra tillräcklig effekt (kW) samt ha tillräcklig kapacitet (kWh).

Partiell backup: Om anläggningen i stället kan koppla bort vissa laster och enbart prioritera de mest kritiska funktionerna, räcker det med ett partiellt backup-system. Tekniskt löses detta genom att de valda lasterna separeras från huvudcentralen och kopplas om till en egen under-

central som matas av växelriktaren. Den stora fördelen med en partiell backup är att den totala lasten minskar, vilket innebär att batterikapaciteten räcker under en längre tid.

Vilken typ av växelriktare som krävs styrs av de prioriterade lasternas karaktär. Om undercentralen enbart innehåller enfaslaster räcker det med en växelriktare som levererar ström på en fas. Om man prioriterar trefaslaster finns det hybridväxelriktare som klarar av asymmetrisk trefasmatning i ö-drift, exempelvis produktserien Huawei MAP0 [64].

Vad som bör prioriteras inom lantbruket skiljer sig åt beroende på typ av verksamhet samt huruvida det rör sig om animalieproduktion. I stort sett alla lantbruk är beroende av el för funktioner som ventilation, utfodring, vattenpumpar samt mjölkning. Ventilation, vatten och utfodring definieras som de system som direkt påverkar djurens hälsa och överlevnad [12].

Ventilation prioriteras högt då djur i konventionella grisgårdar och storskalig produktion ofta hålls inomhus. En fungerande ventilation är därmed kritisk för att bibehålla ett bra inomhusklimat [12].

4.4.3 Styrsystem

Ett typ av styrsystem som är Energy Management System (EMS). EMS agerar som det överordnade styrsystemet, hjärnan, i en anläggnings energisystem. Dess primära uppgift är att övervaka, planera och optimera hur energin flödar genom verksamheten. I praktiken kan detta innebära aktiv laststyrning, såsom att lagra ett tillfälligt överskott av solel i batterier för att sedan frigöra denna energi för att kapa effekttoppar eller under timmar med högt elpris. EMS-systemet kommunicerar i realtid med växelriktarna för att samla in aktuell driftdata från gårdens elproduktion, förbrukning och lagring. Baserat på denna status tar systemet sedan beslut om exempelvis när ett batterilager bör laddas upp respektive laddas ur [65].

4.4.4 Tekniska krav för etablering av ö-drift

För att en anläggning ska godkännas för övergång till ö-driftställer ställer elnätsägaren elsäkerhets- och funktionskrav som hur från- och omkopplingen från det allmänna elnätet ska utföras. Detaljerna på kraven kan variera mellan olika nätägare, därav bör det lokala elnätsbolaget kontaktas för att säkerställa kraven. Nedan följer kraven som behöver uppfyllas presenterat av Senergia:

Sektionering och skydd mot återmatning:
Ett krav för ö-drift är att anläggningen kan sektioneras och elektriskt kopplas bort helt från det allmänna elnätet. Denna frånskiljning hanteras av en nätelkopplare (brytare). Denna komponent ska förhindra och säkerställa att återmatning mot nätet inte kan ske, i syfte att skydda både personal och elnätets kraftelektronik [64].

Reservkraftsomkopplare
Själva övergången mellan nätanslutet läge och ö-drift måste utföras på ett säkert sätt och säkerställa att frånkoppling sker innan den lokala produktionen fasas in samt säkerställa så att jordningen fungerar både innan och efter. Detta sköts av en reservkraftsomkopplare, vilken kan vara antingen manuell eller automatisk [64].

- En manuell reservkraftsomkopplare kräver handpåläggning, vilket innebär att man manuellt vrider om en brytare för att koppla till eller från distributionsnätet.
- En automatisk omkopplare, en ATS (Automatic Transfer Switch), kopplar om per automatik när den känner av spänningsbortfallet från nätet.

Jordning och skydd
Vid bortkoppling från elnätet förlorar anläggningen sin förbindelse med nätets jordningssystem.

Därför krävs det att anläggningen är utrustad med ett eget lokalt jordtag. Syftet är att garantera att anläggningens skyddsjordning fungerar oberoende av vilket driftsläge som är aktivt. Jordtaget ska dimensioneras enligt krav på jordresistansens storlek, vilket enligt Senergia ofta är max 100 Ohm [64].

Vid TN-S-system (där skyddsjord, PE, och neutralledare, N, är separerade) tillkommer ytterligare krav, att skyddsjorden inte får föra belastningsström. För att säkerställa att detta aldrig sker används fyrpoliga brytare på bägge sidorna om omkopplingen. Dessa brytare är konstruerade så att de bryter neutralledaren samtidigt som faserna och vid inkoppling är brytarna utformade så att neutralledaren sluts före faserna, vilket säkerställer korrekt skyddsjordning då strömmen inte kan gå via skyddsjorden (PE-ledaren) [64].

Dokumentation och kontroller
Det finns även administrativa krav för att få gå i ö-drift. Detta innefattar krav på dokumentation och kontroller.

- Elnätsägaren kräver ofta att ett kopplingsschema med faserna utritade (enlinjeschema) upprättas över installationen.
- Mätning av jordtagets resistans: Enligt Senergia krävs det att jordtagsresistansen mäts och dokumenteras både vid installationen och därefter minst vart åttonde år. Dokumentationen ska senare kunna visas upp för elnätsägaren eller en installatör [64].

4.4.5 Komponenternas samspel vid nätbortfall på lantbruk

För att ett lantbruk ska kunna övergå till och upprätthålla ö-drift vid ett nätbortfall krävs ett välfungerande samspel mellan gårdens produktion, konsumtion, energilagring, reservkraft. Som beskrivs under rubriken 4.3 i denna rapport och i avsnitt "5.2 Ödrift" i Hushållningssällskapets rapport, övergår ansvaret för att upprätthålla spänning och frekvens när anslutningen till det överliggande elnätet försvinner. För att upprätthålla effektbalansen krävs teknik som ersätter det externa nätets roll.

Detta kan ske genom att biogasanläggningen är utrustad med en synkrongenerator, då kan denna upprätthålla spänning och frekvens. Beroende på gårdens lastkurva och hur varierande effektbehovet är kan det även behöva kompletteras med batterisystem och/eller dieselaggregat [19]. Om biogasanläggningen är utrustad med en asynkrongenerator kan den därmed inte upprätthålla spänning och frekvens. Denna nätbildning kan då skapas av ett dieselaggregat eller BESS, närmre beskrivet i avsnitt 4.1.2 [19].

Dieselaggregatet kan snabbt upprätthålla både spänningsnivå och frekvens enligt beskrivningen i avsnitt 4.2.2. För att reglera spänningen hos en dieselgenerator så är det magnetiseringsströmmen som justeras upp eller ner. För att styra vridmomentet (varvtalet) så är det bränsletillförseln som regleras (se rubrik 4.2.1).

Upprätthållandet av nätet kan även ske med ett batterisystem, BESS (Battery Energy Storage System), utrustat med en grid-forming inverter [19]. Grid-forming växelriktaren är då den enhet som sätter en egen referens för spänning och frekvens och upprätthåller den. Detta kan kombineras med grid-following växelriktare som följer grid-forming växelriktarens referens. De andra enheterna synkroniserar då mot grid-forming växelriktaren (se avsnitt 4.4.1). Ett annat alternativ är en kombination av BESS och synkrongenerator [19].

Egenproduktionen från solel och biogas utgör basen i elförsörjningen, men båda kraftslagen har tekniska krav för att fungera i ö-drift. För att solcellerna ska kunna vara aktiva och producera el under ett strömavbrott krävs det att de är utrustade med hybridväxelriktare, och ska ha funktion för "back up power" eller "standalone mode". Gör den inte det kan vare sig solcellerna

eller batteriet leverera el vid elavbrott [66]. Biogasanläggningen har också krav på sig för att vara aktiv i ö-drift. Enligt avsnitt "6.2.1 Gastryck och stabil gasleverans"i Hushållningssällskapets rapport krävs en hög och jämn gasleverans och ett specifikt gastryck för att kraftvärmeenheten inte ska stanna under ö-drift, vilket kan kräva en extra gasfläkt [19].

Kommunikationen och styrningen mellan enheterna kan skötas av ett överordnat system kallat EMS. EMS-systemet kommunicerar med anläggningens växelriktare, såsom grid-forming växelriktare, och styr samverkan mellan produktion, konsumtion, lagring, reservkraft osv (se rubrik 4.4.3). Som beskrivs under avsnitt 4.1.1 så produceras solel endast under timmar med tillräcklig instrålning, med en topp mitt på dagen. Detta matchar inte nödvändigtvis gårdens konsumtionsmönster, där effektbehovet kan vara som störst vid andra tider på dygnet. Biogasanläggningen kan däremot fungera som en jämn basproducent [19]. Om biogasen och solcellerna sammantaget producerar ett överskott, kan det överordnade styrsystemet se till att detta laddas in i batteriet istället för att överbelasta nätet i ö-drift.

Som förklaras under rubriken 5.4.5.2.1 är dieselaggregatet ofta avgörande för att kunna hantera stora startströmmar. Detta bekräftas i Hushållningssällskapets avsnitt "6.2 Ödrift av biogasanläggning"[19], där det framgår att en igångkörning av kraftvärmeproduktionen vid en dödstart kan kräva upp till 5-7 gånger mer effekt än vad kraftvärmeenheten drar vid normaldrift [19]. Det överordnade styrsystemet kan känna av när batteriets kapacitet inte räcker till och aktiverar då dieselaggregatet för att säkra driften.

4.5 Ett lantbruk som en lokal energiresurs

Ö-drift kan tillämpas över varierande geografiska områden och omfattningar, där en ö kan utgöra en ort, en stad, en kommun eller delar av dessa. Svenska kraftnät definierar fyra storleksordningar av detta:

- Transmissionsnätsbaserad ö-drift.
- Lokal eller regional ö-drift, vilket omfattar ett samhälle, en stad eller en kommun.
- Ö-drift i en enskild fastighet.
- Ö-drift i en enstaka verksamhet eller inom ett litet område. Denna typ av drift kan möjliggöras genom att ett avtal upprättas med en småskalig elproducent gällande användning av anläggningen för ö-drift.

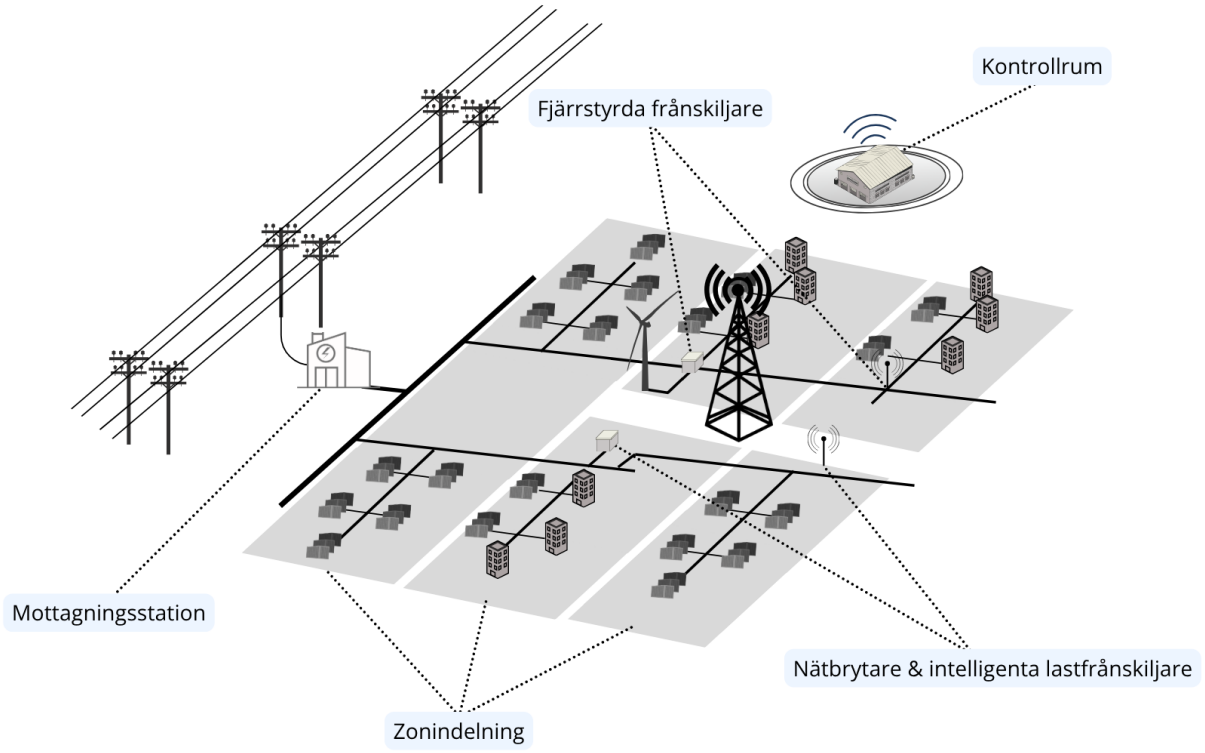
Ansvarsfördelningen för driften varierar beroende öns omfattning. För transmissionsnätsbaserad ö-drift är Svenska kraftnät ansvarig aktör i enlighet med EU:s regelverk. Vid ö-drift som begränsas till en enskild fastighet, en enstaka verksamhet eller ett mindre område hänvisar Svenska kraftnät i stället till det aktuella elnätsbolaget. I dessa fall övergår ansvaret till det lokala elnätsbolaget som antar rollen som ö-driftsledare, vilket innebär att de bär huvudansvaret för spännings- och frekvensregleringen inom den frånkopplade nätsektionen [54].

Under ett kompetenspass om ö-drift, genomfört av Simon Lindroth (kraftsystemanalytiker på Sweco) [67], diskuterades ett scenario där ett lantbruk skulle kunna försörja en lokal trygghetspunkt eller ett närliggande område. Lindroth poängterade att lantbruket och trygghetspunkten i ett sådant fall måste behandlas som en och samma elektriska ö. Vidare förtydligade Lindroth att för att detta ska vara praktiskt genomförbart krävs det att det lokala elnätet sektioneras fysiskt, vilket isolerar området från det överliggande elnätet.

Sektioneringen innebär att anläggningar som är sammankopplade i elnätet kopplas isär. Detta görs genom att titta på elnätets topologi och sedan omfördelar effektflödena [68]. Det finns ingen universallösning för hur detta utförs för exempelvis mikronät. Utformningen av systemet är

beroende av det specifika elnätets topologi och vilken typ av lokal generering som finns tillgänglig. Det som definerar ett mikronäts topologi är elementen så som brytare och lastfrånskiljare (som tas upp i avsnittet 4.4.4 [69].

För att dela in elnätet i sektioner kan man använda fjärrstyrda lastfrånskiljare och nätbrytare [70]. Nedan visar en illustration framtagen av ABB som modifierats av författaren. Figuren illustrerar ett modellnät utrustat med mottagarstation, frånskiljare, zonindelning, nätbrytare och kontrollrum [71].



Figur 2: Illustration baserad på ABB's zonkocept [71]

Genom elnätsautomation finns det etablerade ramverk för att strukturera om och sektionera lokalnätet i zoner. Ett exempel på detta är ABB:s Zon-koncept, som visas i figur 2 . Kärnan i detta koncept är att begränsa påverkan av nätfel genom att dela in nätet i avgränsade kontroll- och skyddszoner. Detta kan göras genom att placera ut ställverksapparater, såsom nätbrytare och fjärrstyrda lastfrånskiljare. Denna typ av sektionering är särskilt relevant för dagens föränderliga elsystem. I takt med att lokalnätet växer och topologin blir alltmer komplex och förgrenad, uppstår nya sektioner som naturligt kan utgöra separata zoner Ett exempel på detta är att anläggningar med lokal elproduktion kan separeras från det övriga nätet för att bilda en helt fristående zon. Detta kan genomföras genom att installera en zonbrytare försedd med frånkopplingsautomatik [70].

Denna zonindelning och sektionering fungerar genom ett samspel mellan elnätets komponenter och kommunikationsystem.

Mottagningsstation Mottagningsstationen utgör nätets centrala knutpunkt. Dess uppgift är att ta emot el från det överliggande nätet, ofta regionnätet och transformera den till en lägre spänning för att mata det lokala distributionsnätet [72] Normalt sett innebär ett fel ofta att huvudbrytaren i mottagningsstationen löser ut, vilket slår ut hela den efterföljande linjen [71]. Zon-konceptet bygger på att avlasta mottagningsstationen genom att flytta ned brytförmågan längre ned i nätet så att felet kan brytas närmare felstället [70].

Lastfrånskiljare Lastfrånskiljare används för att utföra omkopplingar ute i nätets olika avgreningar. Den är konstruerad för att kunna öppna och stänga elledningen under normal last [73]. Många av dessa frånskiljare finns redan utplacerade i nätet, och genom att utrusta dem med fjärrstyrning kan de styras på distans för att hantera frånkoppling och dirigera om strömmen [71].

Nätbrytare Nätbrytare kan även kallas zon-brytare och är apparater som placeras för att skärma av zoner [70]. De används för att stänga och öppna elledningar vid omkoppling. Men till skillnad från en frånskiljare fungerar nätbrytaren även vid fel, vilket innebär att den kan öppna kretsen även när det går väldigt höga felströmmar genom nätet [73].

Kontrollrum Kontrollrummet är den centrala knutpunkten där alla dessa apparater knyts samman. Det är i kontrollrummet som driftsövervakning sker, där operatören kontinuerligt får information om statusen på elnätet samt där driftåtgärder initieras [70].

4.5.1 KH Lantbruk AB och Borgholm Energi Elnät AB

Vid platsbesöket på Borgholm Energi Elnät AB, det lokala elnätsbolaget som KH Lantbruk AB (referensgården) är ansluten till så diskuterades möjligheten för lantbruket att agera som elförsörjningskälla för lokala trygghetspunkter.

Under mötet diskuterades elnätets topologi där man kom fram till att lantbruket är fördelaktigt positionerat, vilket innebär att en sektionering är möjlig utan krav på stora ombyggnationer av infrastrukturen.

Elnätet har en gemensam mottagningsstation och ett antal nätstationer, varav en är fördelaktigt placerat sett till lantbruket. Genom att montera fjärrstyrda nätbrytare vid de resterande, icke-prioriterade nätstationerna kan dessa isoleras och kopplas bort vid ett avbrott. När detta är gjort kan lantbruket isoleras tillsammans med sin nätstation och mata sin elproduktion uppströms till den gemensamma mottagningsstationen. Från mottagningsstationen behöver nätet därefter sektioneras vidare för att rikta elmatningen direkt mot trygghetspunkten.

4.5.2 Exempel på mikronät i drift

I Stockholms skärgård på ön Arholma har Vattenfall sommaren 2023 installerat ett mikronät. Anläggningen bygger på:

- Batterilager
- Solceller
- Ett kontrollsystem

Konstruktionen och samspelet ser ut så att de har två litiumjonbaserade batterilager,varav det ena är integrerat med en takmonterad solcellsanläggning. För att upprätthålla nätets stabilitet används ett kontrollsystem. Detta system sköter kontinuerligt styrningen och effektbalansen mellan den produktionen, konsumtionen och energilagringen. Systemet säkerställer även att gällande krav på elsäkerhet uppfylls.

Mikronätet är integrerat med elnätet, detta innebär att det kan både vara aktivt parallellt med distributionsnätet men kan även fungera frånkopplat "I ö-drift". Då mikronätet är aktivt men inte frånkopplat agerar solcellerna och batterilagrena för att kapa effekttoppar [74] [75].

I en rapport utgiven av Energiforsk [69] beskrivs det att mikronätet kan både gå i planerat ö-drifts-läge och oplanerat om det skulle uppstå fel. Vid fel menas obefogade utlösningar, spännings-och frekvensskydd samt fel i matande kabeln som bortkopplas efter reläskyddsutlösning. När nätet på Arholma drivs som en ö (frånkopplat från huvudnätet) måste jordningen

fungera enligt normala principer (som nämns närmre under avsnittet 4.4.4). Av den anledningen har man valt att installera en Petersenspole i öns mellanspänningsnät, en spole som används för att begränsa jordfelsströmmar. [69].

5 Metod

Studien har genomförts genom en kombination av litteraturstudier, kartläggning av tidigare och pågående arbeten inom beredskap för livsmedelproducerande lantbruk, dialog med sakkunniga aktörer, platsbesök på lantbruk samt utveckling av en simuleringsmodell i Python. Metodiken syftar till att både skapa en teoretisk förståelse för lantbrukets energisystem, behov och utmaningar som råder samt att utveckla ett praktiskt verktyg för analys av energiresiliens och ö-drift på gårdsnivå.

5.1 Litteraturstudie

Syftet med litteraturstudien var att erhålla en djupare förståelse för området samt skapa en helhetsbild av ämnet. Litteraturstudien har utgjort basen för att besvara arbetets frågeställningar genom att systematiskt gå igenom tidigare studier, nuläget, framtida planer samt tekniska aspekter för att förstå funktioner och krav för ö-drift. Arbetet har strukturerats utifrån följande fokusområden:

5.1.1 Funktioner hos lantbruk

För att förstå förutsättningarna för ö-drift krävdes en förståelse för lantbrukets funktionalitet. Därmed undersöktes vilka laster och vilken produktion lantbruken har. Information om vad lasterna utgörs av var av stor vikt, då detta är centralt för att modellera driftsmönster och möjliggöra sektionering. Fokus var initialt brett på livsmedelsproducerande lantbruk, men avgränsades mot svinproduktion då det under arbetets gång framkom att behov av el och elkvalitet skiljer sig avsevärt mellan olika typer av lantbruk. Fokus lades på att förstå hur ett svinproducerande lantbruk är uppbyggt, vilka maskiner som används, skillnader mellan olika produktionsformer samt befintliga krav och utvecklingsområden.

5.1.2 Tekniska förutsättningar för ö-drift i stort

Information söktes gällande vad ö-drift innebär i praktiken samt vilka tekniska förutsättningar och begränsningar som finns generellt. För att besvara frågor rörande svaga landsbygdsnät och tekniska krav har litteratur rörande kortslutningsnivåer, felströmmar och frekvensreglering studerats. Särskilt fokus har lagts på skillnaden i felströmmar mellan det starka elnätets synkrongeneratorer och växelriktarbaserade system i ö-drift. Vidare har teknisk dokumentation kring grid-forming växelriktare och kontrollstrategier såsom droop-reglering och virtuella synkronmaskiner (VSM) analyserats för att förstå hur stabilitet kan upprätthållas.

5.1.3 Ö-drift hos lantbruk:

För att förstå hur ö-drift kan realiseras på ett lantbruk hämtades litteratur rörande tekniska lösningar för lokal produktion, såsom solceller och biogas, energilagring i form av batterier samt reservkraft. Även energieffektiviseringsåtgärder har undersökts för lantbruk för att beakta detta som en möjlig åtgärd för att öka förutsättningarna för ö-drift .

5.1.4 Nulägesanalys

Det var av stor vikt att undersöka vad som hittills gjorts inom området energiresiliens och beredskap för livsmedelsproducerande lantbruk. Detta gjordes genom att hämta litteratur utfärdad av Jordbruksverket, SLU, Greppa Näringen, Hushållningssällskapet och MSB. Syftet var att öka förståelsen för området, kartlägga befintlig rådgivning och rekommendationer samt se hur prioriterat området är. Analysen syftade även till att identifiera kunskapsluckan för att se var det utvecklade analysverktyget kan komplettera befintliga arbeten.

5.1.5 Ekonomiska incitament och styrmedel

För att besvara frågan om ekonomisk nytta och investeringsnivåer har aktuella regelverk för investeringsstöd för robust primärproduktion analyserats.

5.2 Dialog med experter och sakkunniga aktörer

För att skapa oss en bild utav vad som har gjorts hitills inom området beredskap hos lantbruk och vilka utmaningar och behov som kvarstår så har både möten och intervjuer genomförts.

5.2.1 Platsbesök hos två svinproducerande lantbruk

För att skapa en realistisk simuleringsmodell genomfördes platsbesök på KH Lantbruk AB och en annan svinproducerande gård. Syftet med besöken var att kartlägga gårdarnas specifika förutsättningar för att identifiera likheter och skillnader, samt för att samla in den information som krävs för att konstruera projektets modellgård. Båda verksamheterna är inriktade på svinproduktion.

Vid besöken identifierades gårdarnas laster och produktionsenheter, med särskilt fokus på kritiska funktioner samt en prioriteringsordning av lasterna. Även den befintliga elinfrastrukturen inspekterades för att bedöma möjligheterna för framtida sektionering och installation av lokal produktion eller energilagring.

För KH Lantbruk AB, som är referensgården som utgör utgångspunkten för uppbyggnaden av modellgården, har både digitala intervjuer via Teams och fysiska platsbesök genomförts. Dessa möten möjliggjorde insamling av detaljerad data rörande produktions- och konsumtionsmönster samt specifika driftmönster. Detta underlag är en förutsättning för att kunna skapa en verklighetstrogen modell av energisystemet i Python.

5.2.2 Platsbesök Borgholm Energi Elnät AB

Borgholm Energi Elnät AB är det lokala elnätsbolaget på Öland som KH Lantbruk AB är anslutet till. Vid mötet med Borgholm Energi Elnät diskuterades möjligheterna för lantbruket att agera som en elförsörjningskälla för en trygghetspunkt vid kris eller krig. Under samtalet berördes bolagets nuvarande beredskapsstatus, befintlig reservkraft och deras planer framåt.

Diskussionen omfattade även identifierade trygghetspunkter i området. Genomgång av nätkartor, producerande enheter och reservkraft gav insikter i hur lantbruket är positionerat i förhållande till nätstationer, mottagarstationer och de aktuella trygghetspunkterna. Denna information är viktig för att besvara frågeställningen om huruvida lantbruket kan försörja en lokal trygghetspunkt genom sektionering av elnätet. Mötet resulterade även i värdefull data rörande trygghetspunkternas energibehov, vilket krävs för att undersöka om lantbrukets kapacitet är tillräcklig för ändamålet. Möjligheten till ö-drift samt fallande ansvar för frekvens- och spänningsreglering diskuterades också.

5.2.3 Intervju Jordbruksverket - Greppa näringen

En intervju genomfördes med Maria Källming [16], ansvarig för rådgivningsinsatsen Beredskapskollen inom Greppa Näringen. Syftet med intervjun var att undersöka hur Greppa Näringen arbetar med beredskaps- och energifrågor samt att identifiera var den framtagna simuleringsmodellen kan fungera som ett komplement för att uppfylla ett syfte inom rådgivningen.

Intervjun gav en tydlig genomgång av hur rådgivningen genomförs, vilka möjligheter och begränsningar som finns samt gav tillgång till Greppa Näringens rådgivningsmaterial. Även ekonomiska investeringsstöd för robusthetshöjande åtgärder diskuterades.

5.2.4 Intervju Hushållningssällskapet

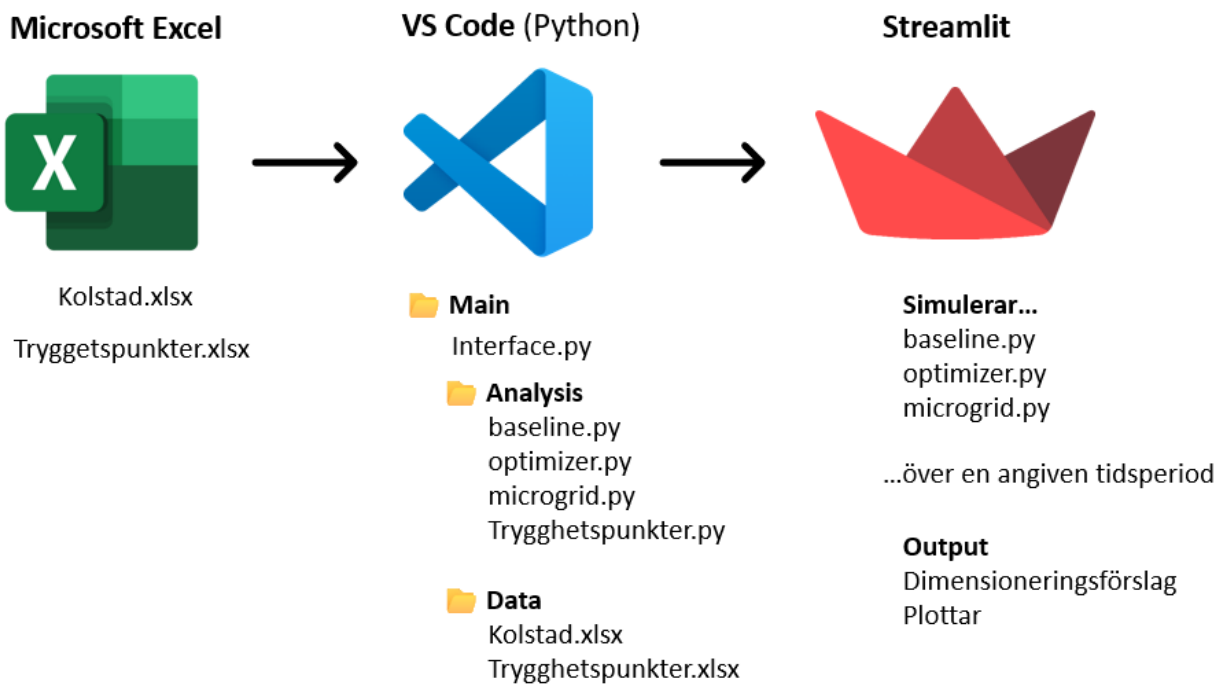
En intervju genomfördes med en projektledare och energirådgivare vid Hushållningssällskapet i Halland. Eftersom rådgivningen inom Greppa Näringen täcker många beredskapsaspekter, och detta arbete är avgränsat mot energi, var syftet att undersöka hur stor del av rådgivningen som viger åt just energifrågor. Fokus låg på att förstå energirådgivarens roll och hur omfattande dessa insatser är inom ramen för beredskapsarbetet, samt hur rådgivningen kan variera mellan olika fall. Vidare diskuterades i vilken utsträckning lantbrukare har kännedom om sin egen elförsörjning och specifika driftsmönster.

5.2.5 Ödrift-kompetenspass

Simon Lindroth [67], kraftsystemanalytiker på Sweco, genomförde ett kompetenspass röranде ö-drift för anställda på Sweco. Passet gav insikt i vad ö-drift innebär, vad som krävs för ö-drift samt vilka funktioner som måste upprätthållas. Bland annat behandlades primärreglering (FCR), sekundärreglering (FRR) och dessas funktionalitet.Vidare diskuterades frekvensderivataskydd, tröghetsmoment, batterier samt ansvar för spännings- och frekvensreglering. Deltagandet gav en ökad förståelse för ämnet och insikt i vilka områden som krävde en mer djupgående analys i det fortsatta arbetet.

5.3 Modellbygge

Metoden för modellen innefattar flera olika delar. I figur 3 presenteras en översiktsbild över i vilken ordning respektive del skapades samt vilket verktyg som användes för att simulera det. Från Excel har data för både lantbruket och respektive trygghetspunkt hämtats in till Python – där den huvudsakliga modelleringen skapats. I Streamlit, där det användarvänliga gränssnittet byggts, simuleras “baseline.py”, “optimizer.py” samt “microgrid.py”. Precis som bilden anger kommer “Trygghetspunkter.py” simuleras för sig och endast i VS Code.



Figur 3: Översiktsbild för metoden av modellbyggandet med alla ingående delar

Innan de enskilda delstegen beskrivs i detalj ges här en övergripande introduktion till det utvecklade simulerings- och analysverktygets logik och kapacitet. Modellen är uppbyggd som en sammanhängande beräkningskedja som stegvis analyserar, optimerar och utvärderar gårdens energisystem.

Modellen tar emot indata bestående av gårdens historiska lastkurva, maskinernas effekter, bundenhet till specifika scheman samt information om vilka maskiner som besitter en inneboende flexibilitet. Utifrån detta startar verktyget med att återskapa en historisk baslinje (baseline.py) av maskindriften. Detta görs genom en itererande algoritm som pusslar in och matchar de enskilda maskinstorlekarna under den totala lastkurvan för att identifiera exakt när olika processer har körts.

Därefter övergår modellen till ett optimeringssteg (optimizer.py). Här omplaneras och flyttas de flexibla maskiniseringarna, samtidigt som en algoritmisk effektvakt reglerar termiska laster. Syftet i detta steg är att kapa gårdens effekttoppar (peak-shaving) och sprida ut energibehovet mer jämnt över dygnet.

När den optimerade driften är fastställd görs en övergång till verktygets kärna, vilken är simuleringsfunktionen för ö-drift. Här kan användaren välja ett valfritt tidsfönster och startdatum för att simulera ett totalt strömavbrott där elnätet kopplas bort. Modellen sorterar då bort alla icke-kritiska laster (prio 3) för att skydda djurhållningen och se hur väl gården klarar att försörja de resterande kritiska systemen med sin egenproduktion.

Beroende på vilken utrustning som fanns på gården från början utvärderar algoritmen energibalansen timme för timme. Oavsett om systemet klarar det valda avbrottet eller drabbas av en systemkrasch, avslutas processen med att kalkylatorn beräknar ett tekniskt och ekonomiskt optimerat förslag på batterikapacitet och reservkraftsaggregat som krävs för att säkra driften. Slutligen har modellen kapacitet att skala upp detta scenario för att utvärdera om gårdens energisystem även kan bära lasten från en extern, kommunal trygghetspunkt.

5.3.1 Modellering Excel

Första delen av modellbyggandet ämnar till att på ett så realistiskt sätt som möjligt återskapa lastkurvan för lantbruket. Stegen för denna databehandlingen redovisas i avsnitt 5.3.1.1 till och med avsnitt 5.3.1.7.

5.3.1.1 Datainhämtning och systemkonfiguration i Excel

För att skapa förutsättningar för en realistisk modell har omfattande data inhämtats från det studerade lantbruket, KH Lantbruk AB. Syftet har varit att konstruera en representativ lastkurva med timupplösning över ett helt kalenderår.

KH Lantbruk AB har egen elproduktion i form av solenergi samt en biogasanläggning med en gasmotor för elkonvertering. I dagsläget saknas både energilagring och reservkraft på gården.

En exakt kartläggning av anläggningens effektuttag hade det krävts elmätare på varje enskild maskin, vilket inte fanns att tillgå. Modellen bygger istället på mätdata från lantbrukets elnätsbolag, växelriktaren och en kombination av referensvärden från lantbrukaren och Hushållningssällskapet. Då exakt information kring specifika laster saknades, har både kvalitativa och kvantitativa metoder använts, för att kartlägga gårdens övergripande verksamhetsmönster och därmed kunna härleda vilka aktiviteter som genererade olika effektuttag.

Kvalitativ data
Den kvalitativa datainsamligen syftade till att ge en djupare förståelse för gårdens specifika driftmönster. Detta genomfördes via intervjuer och ett frågeformulär som besvarades av lant-

brukaren. Formuläret berörde verksamhetens olika delprocesser, körtider och effektbehov för de mest krävande maskinerna. Samtliga intervjufrågor återfinns under bilagor 9.

Kvantitativ data
Den kvantitativa datan utgjorde grunden för den mätbaserade modelleringen. Följande data fanns att tillgå:

- **Elnätsbolag - Borgholm energi Elnät AB:** Importerad och exporterad effekt från KH Lantbruk AB med 15 minuters upplösning. Ingen data om specifika laster ingick.
- **Växelriktare:** Data med 5 minuters upplösning innehållande total solproduktion, solel för egenanvändning, import och export samt en dataserie vid namn "konsumtion" ($P_{konsumtion}$). Datan erhölls fån levrantörens IT-system där växelriktarens konsumtionsdata består av solel och import, vilket innebär att effekten från biogasen är exkluderad.
- **Biogasanläggning:** Datan för biogasproduktionen är avläst manuellt via loggbok tillhandahållen av lantbruket. Datan kommer direkt från biogasanläggningens elmätare i teknikhuset och angav den ackumulerade totalproduktionen av biogas som omvandlats till el. Datan är angiven med ojämna tidsintervall från 13 till 35,5 timmar i upplösning.
- **Årsdata - Totalförbrukning och maxlast:** Totalvärden för produktion och egenanvändning uppgavs av både lantbruket och Hushållningssällskapet. Vidare angav lantbruket ett uppskattat värde för anläggningens normala effektuttag (det mest vanligt förekommande effektuttaget över ett typiskt år) samt vad maxeffektuttaget kan vara.

5.3.1.2 Datakonflikter och avgränsningar

Vid en första analys konstaterades det att de olika datakällorna delvis motsade varandra. Till exempel stämde inte lantbrukets egna uppgivna egenanvändning av solel överens med växelriktarens data. Vidare fanns även diskrepanser mellan den information som lantbruket och Hushållningssällskapet uppgav gällande biogasens årliga totalproduktion och egenanvändning.

Som styrande data valdes i dessa fall de faktiska mätdataserierna framför muntliga/manuella uppgifter i de fall som det fanns. Hushållningssällskapets årliga data ansågs mer tillförlitlig än lantbrukets egna uppskattningar vid validering av biogasproduktionen.

5.3.1.3 Databehandling och tidssynkronisering

All databearbertning, sammanfogning av serier och efterföljande analys för att ta fram lastkurvan genomfördes i Microsoft Excel för att enkelt kunna visualisera dataserierna under processen. Då rådatan hämtades från skilda källor med varierande tidsupplösning krävdes en iterativ process och ett pusselarbete baserat på en rad antaganden för att kunna synkronisera serierna med varandra. En central del i valideringsarbetet var att den slutgiltliga lastkurvan måste överensstämma med anläggningens faktiskta totala produktion och konsumtion över året. Det första steget var att interpolera all data till en gemensam tidsupplösning. Eftersom en lastkurva kräver att upplösningen är på dygnsnivå för att kunna analysera lastmönster så valdes timupplösning som standard. Den mesta av datan fanns tillgänglig med högre upplösning, men eftersom biogasproduktionen har en uppslösning som varierar mellan 13 och 35,5 timmar så ansågs det olämpligt att behandla den som mer exakt än timupplösning. Dessutom skiljer det sig markant i antalet datapunkter som ska processas om en högre upplösning väljs och den relativa vinsten av att se variationer i last ansågs inte vara tillräckligt hög. Detta innebar att biogasdatan behövde approximeras. En genomsnittlig produktion per timme beräknades fram mellan varje mätpunkt enligt:

$$P_{biogas,egen} = \frac{E_2 - E_1}{t_2 - t_1} \tag{3}$$

Där:

- $P_{biogas,egen}$ = Genomsnittlig effekt för tidsintervallet (kW)
- E_2 = Ackumulerad energi vid det senare mättillfället (kWh)
- E_1 = Ackumulerad energi vid det föregående mättillfället (kWh)
- t_2 = Tidpunkt för det senare mättillfället (h)
- t_1 = Tidpunkt för det föregående mättillfället (h)

Detta utgör en känd felkälla, då den faktiska fluktuationen inom dessa tidsspann förloras.

5.3.1.4 Beräkningsmodell för lastkurva

Teoretiskt kan lantbrukets totala last, P_{last}, uttryckas genom energibalansen:

$$P_{\text{last}} = P_{\text{sol}} + P_{\text{biogas}} + P_{\text{import}} - P_{\text{export}} \tag{4}$$

Vilket även går att formulera om utifrån egenanvändningen:

$$P_{\text{last}} = P_{\text{sol, egen}} + P_{\text{biogas, egen}} + P_{\text{import}} \tag{5}$$

Genom att kombinera dessa samband kan biogasens egenanvändning approximeras fram som:

$$P_{\text{biogas, egen}} = P_{\text{last}} - P_{\text{konsumtion}} \tag{6}$$

5.3.1.5 Hantering av felkällor i biogasdata

För att uppskatta timvärden på biogasproduktionen approximerades effekten genom att beräkna skillnaden i ackumulerad energi (kWh) mellan två på varandra följande mättillfällen (det senare värdet minus det föregående), vilket sedan dividerades med antalet timmar mellan de två mätpunkterna. På detta sätt erhölls en genomsnittlig effekt i kW för respektive tidsintervall. På grund av denna approximation så uppstod orimliga värden för $P_{biogas,egen}$ för vissa timmar. Dessa korrigeringarna implementerades i Excel-logiken för att hantera det:

1. **Nollställning av negativa värden:** $P_{\text{biogas, egen}}$ kan endast anta värden ≥ 0.
2. **Produktionstak:** $P_{\text{biogas, egen}}$ begränsades till att aldrig kunna överstiga den antagna biogasproduktionen för samma timme.

Eftersom att $P_{\text{konsumtion}}$ kommer direkt från växelriktaren så kan detta användas som en känd "minimilast". De toppar som minimilasten uppnår vet vi att lantbruket någon gång kommer behöva hantera och detta utgjorde grunden för inom vilket spann lastkurvan kommer att befinna sig även när biogasen adderas.

En inital lastkurva kunde därefter sammantställas som $P_{\text{konsumtion}} + P_{\text{biogas, egen}}$.

5.3.1.6 Dynamisk kompression av maxlaster

Efter att biogasantagandena hade korrigerats så var det fortfarande orealistiskt höga toppeffekter i lastkurvan som översteg systemets kända maxlaster. Lantbruket angav 120 kW som maximala effektuttaget, men konsumtionskurvan från växelriktaren uppgick till 130,5 kW och fick utgöra referensen för systemets sanna maxlast. Men toppeffekterna från den intiala totala lastkurvan hamnade vid flera tillfällen upp mot 160 kW.

För att hantera detta applicerades en dynamisk kompression på lastkurvan. Syftet var att trycka ihop topparna, men endast påverka den andel av lastkurvan som bestod av biogasen. Eftersom denna del bygger på uppskattningar utgör den sannolikt den största felkällan, och framför allt den enda felkälla som är möjlig att i efterhand kompensera för. Kompressionen rörde endast lastvärden över ett förutbestämt tröskelvärde som kallades M3. Minimilasten (sol + import) bevarades intakt medan kompressionen fick justera ner det inbyggda felet i $P_{\text{biogas, egen}}$.

Den dynamiska kompressionen beräknades enligt:

$$P_{\text{last, ny}} = M_3 + \frac{P_{\text{tak}} - M_3}{P_{last,max} - M_3} * P_{\text{last}} - M_3$$

Där:

- $P_{\text{last, ny}}$ är det korrigerade lastvärdet efter kompressionen.
- P_{tak} är det fastställda taket för maxlasten.
- M_3 är gränsvärdet för när kompressionen ska appliceras.
- $P_{\text{last, max}}$ är det orealistiska maxvärdet i den okomprimerade serien.

Efter detta uppdaterades $P_{biogas,egen}$ genom att subtrahera differensen mellan den gamla och nya, komprimerade lastkurvan. Detta eftersom det är egenanvändningen av biogasen som ska påverkas utav kompressionen.

5.3.1.7 Iterativ kalibrering och validering

Eftersom de initiala datakällorna angav olika värden var det inte möjligt att kalibrera lastkurvan mot ett enskilt, exakt referensvärde. För att hantera denna osäkerhet konsekvent definierades i stället acceptansintervall för anläggningens nyckelparametrar, baserade på det spann som datakällorna gemensamt utgjorde. Om en källa angav att ett parametervärde var "10" och en annan "12" blev acceptansintervallet således mellan 10 och 12. Syftet med kalibreringen var inte att beräkna fram en specifik optimal punkt, utan snarare att iterativt justera variabeln M_3 tills kurvans resulterande värden samtidigt uppfyllde de uppställda gränsvillkoren för samtliga parametrar. De parametrar som undersöktes var:

- **Total årlig energianvändning:** Summan av lastkurvan över hela året skulle rymmas inom intervallet mellan de lägsta och högsta angivna årstotalerna från Hushållningssällskapet och lantbruket.
- **Egenanvändningsgrad av biogas:** Andelen egenanvänd biogas av den totala producerade biogasen ska falla inom spannet som de olika källorna angivit.
- **Momentant effektuttag från biogas:** Biogasens bidrag till lastkurvan fick inte överskrida rimliga nivåer i förhållande till anläggningens faktiska maxkapacitet.

5.4 Simuleringsmodell i Python

Efter att lastkurvan skapats i Excel importerades datan till Python, där själva simuleringsmodellen har byggts upp. Nedan beskrivs simuleringsmodellens olika delar. För att kunna identifiera och återskapa realistiska maskindrifter genomfördes inledningsvis intervjuer med referensgården KH Lantbruk AB, sammanställt i avsnitt 6.1.1. Utifrån den inhämtade informationen gällande maskineffekter, körtider, baslaster, säsongsberoenden och interna maskinberoenden har koden därefter utformats.

5.4.1 Identifiering av maskinkurva (Baseline)

Det första som gjordes var att identifiera och separera lantbrukets enkilda laster inuti lastkurvan som tagits fram i Excel. Den lastkurvan kommer hädanefter benämnas som "referenskurvan". Detta är en förutsättning för att därefter kunna utvärdera olika driftsfall och ö-driftsscenarion.

Metoden bygger på en iterativ bottom-up-ansats där kända driftmönster och effektspecifikationer pusslas ihop för att förklara gårdens totala energibehov timme för timme. Modellen utgår från att maskiner inte bara ska placeras där det finns utrymme, utan simulerar de faktiska driftbesluten baserat på tidsfönster och logiska beroenden. Logiken och antaganden är baserat på det tillhandahållna specifikationerna över maskinernas effekt och driftsbeteenden. För fall där körtiden är under en timme har effekten räknats om till genomsnittlig effekt per timme. Modellens struktur och beräkningslogik kan delas in i sex huvudkomponenter, vilka beskrivs nedan.

5.4.1.1 Tids- och säsongsindelning

För att spegla KH Lantbruk ABs säsongsberoende verksamhet ,baserat på intervjuer, delades året in i veckobaserade driftsäsonger. Vinterperioden definierades som vecka 1–14 och 44–54, med fokus på uppvärmning, medan sommarperioden (vecka 20–35) fokuserar på ventilation. Övriga veckor kategoriserades som övergångsperioder (vår/höst). Utöver detta definierades specifika skördeveckor för spannmålstorken (full drift v. 31–39, halvfart v. 22–26 och 40–43), där drift endast tillåts mellan kl. 10:00 och 18:00 (motsvarande timme 11–19 i datan p.g.a. tidsförskjutning i Excel).

5.4.1.2 Fasta baslaster

Grunden i modellen utgörs av de laster som är konstanta dygnet runt, vilket för KH Lantbruk AB representeras av värmelampor. Värmelampor modelleras som en fast baslast på 10,0 kW under årets alla 8 760 timmar. Denna last utgör det absoluta "golvet" i gårdens elförbrukning och placeras innan några flexibla processer beräknas.

5.4.1.3 Optimeringsalgoritm för flexibla processer med Backtracking

För att i ett senare skede kunna optimera och simulera för ö-drift är det helt avgörande att veta hur maskinernas driftsschema ser ut. Som tidigare nämnt har intervjuer genomförts med KH Lantbruk AB. Utifrån information om maskinernas effekter, möjliga tidsspann för drift och hur länge de körs utformades en itererande algoritm. Denna algoritm har som syfte att identifiera vilken eller vilka maskiner som utgör den uppmätta elförbrukningen i Excel-kurvan, även kallad referenskurvan". Algoritmen itererar för att hitta vilken maskin som mest sannolikt kördes vid en viss tidpunkt, och detta görs för varje enskild timme under hela året 2025.

Optimeringsalgoritmen är baserad på backtracking (kombinatorisk sökning) med funktionen (*itertools.product*). Algoritmen hanterar de flexibla lasterna (utfodring, utgödsling, tvätt och

blötläggning) och genererar alla teoretiskt möjliga scheman för en given dag utifrån definierade tidsfönster och drifttider för varje process.

Målet för algoritmen är att minimera antalet tillfällen då den simulerade totala lasten överstiger den uppmätta förbrukningen (referenskurvan). För att hantera osäkerheter i datan sattes en toleransnivå (tak) definierad som 110% av mätvärdet. Det sattes även en miniminivå motsvarande baslastens effekt. Vid tillfällen då referenskurvans värde understeg miniminivån antogs det som mätfel och timman blev tillgänlig för algoritmen att nyttja. Algoritmen itererar och väljer den kombination av maskinkörningar som minimerar den totala effekten som överstiger referenskurvan. Den effekt som överstiger loggas och kallas overflow.

De flexibla lasterna har processpecifika regler skapade för att efterlikna verkligheten. Nedan beskrivs hur detta hanterades för respektive process.

- **Utfodring:** Består av fem separata moment över dygnet. Vissa är strikt tidslåsta (exempelvis morgonutfodring kl. 08:00), medan andra har flexibilitet över två timmar.
- **Tvätt och Blötläggning av stall:** Koden identifierar först tvättdagar (lördag till måndag). Dagen före en tvättdag definieras som blötläggningsdag. Maskineffekten för tvätt (8,5 kW) pusslades in optimalt under förmiddagarna, medan blötläggningen delades upp i både fasta och flexibla tidsfönster beroende på avdelning (sugg- eller tillväxtavdelning).
- **Utgödsling och Beroenden:** Effekten för utgödsling räknades om till genomsnittlig effekt per timme utifrån körtiden. Ett strikt logiskt beroende implementerades där tryckutgödslingen (5,5 kW) måste köras under samma timme, eller en timme senare, än de två gödselpumparna. Algoritmen kastar automatiskt de scheman som bryter mot denna regel.

5.4.1.4 Dynamisk hantering av spannmålstork

Spannmålstorken modelleras med en "av/Halv/Hel"-logik för att undvika orealistiska effektsvängningar. Under de definierade skördetimmarna (kl. 10:00–18:00) analyserar modellen det genomsnittliga tillgängliga utrymmet upp till referenskurvan. Om det genomsnittliga utrymmet under fönstret överstiger 1,5 gånger effekten för en tork (21,0 kW), aktiveras båda torkarna (42,0 kW) spikrakt över hela perioden. Om utrymmet endast medger mellan 0,5 och 1,5 torkars effekt, körs torken på halvfart (21,0 kW). I annat fall förblir torken avstängd.

5.4.1.5 Reaktivt klimatsystem

Ventilation och värme modelleras som reaktiva laster som anpassar sig efter det kvarvarande utrymmet mellan de pusslade maskinerna och referenskurvan.

- **Ventilation:** Baserat på intervjuer med KH Lantbruk AB framkom att ventilationens drift uppvisar ett tydligt säsongs- och dygnsberoende mönster; effektbehovet är högre under sommarmånaderna och dagtid, och lägre under vinterhalvåret och nattetid. Eftersom mer detaljerade mätdata för ventilationssystemet saknades, utformades en approximationsmetod för att återskapa detta dynamiska beteende utifrån procentsatser av gårdens medellast och den specifika timlasten.

  Ventilationen beräknas initialt genom en basfunktion som kombinerar 25 % av gårdens totala årsmedellast med 20 % av den aktuella timmens uppmätta last. Detta värde multipliceras därefter med säsongsfaktorer (ex. 1,6 på sommaren, 0,5 på vintern) och dygnsfaktorer (ökning dagtid, minskning nattetid). Ventilationen klipps vid referenskurvan automatiskt för att aldrig skapa overflow.
- **Värmesystem:** Värmesystemet innefattar här värmefläktar och värmepanna. Värmesystemet modelleras under vinterveckor som gårdens sista reaktiva last. Värmefläktar tillåts

först fylla ut resterande marginal upp till 36 kW. Om mätvärdet fortfarande är högre aktiveras värmepannan. Pannans maxtak regleras till 26,5 kW på nätterna och 18,5 kW på dagarna för att avspegla ett högre uppvärmningsbehov under kalla nätter. Under sommartid begränsas värmefläktarna till maximalt 2,0 kW för att representera en underhållsdrift, och värmepannan är helt avstängd.

5.4.1.6 Brus och Overflow

Efter att samtliga laster modellerats identifieras två typer av avvikelser för att validera modellens träffsäkerhet. Differensen där referenskurvan är högre än den simulerade lasten kategoriseras som "Ospecifierat brus", vilket representerar okända förbrukare. Den energi som modellen tvingats placera över referenskurvan för att uppfylla maskinernas driftregler benämns som "Overflow". Den slutgiltiga identifierade lastkurvan definieras som summan av simulerad maskinlast och ospecifierat brus.

5.4.1.7 Krav på systemets indata

För att simuleringsmodellen ska kunna identifiera lastkurvan och optimera maskinscheman korrekt krävs specifik indata från användaren. Denna data samlas in via ett grafiskt användargränssnitt (GUI) samt via uppladdning av historiska mätdata enligt följande kategorier:

- **Uppmätt förbrukningsdata (Referenskurvan):** En tidsserie i Excel- som utgör referensramen för algoritmens optimering. Datat bör ha timupplösning och omfatta en tidsperiod som täcker relevanta säsongsvariationer.
- **Kontinuerliga baslaster:** Identifiering av processer med konstant effektbehov dygnet runt, oberoende av tid eller säsong, vilket definierar lastkurvans bottennivå.
- **Flexibla och schemalagda maskiner:** Tekniska specifikationer för laster, inkluderat maxeffekt (kW), körtid per driftsenhet, tillåtna tidsfönster för drift samt körfrekvens över veckans dagar.
- **Processberoenden:** Definition av verksamhetslogiska regler, såsom sekventiella beroenden (maskin B får endast starta efter maskin A) eller dagliga beroenden (exempelvis att blötläggning föregår tvätt).
- **Säsongs- och väderberoende maskiner:** Parametrar för laster som styrs av skörd eller utomhustemperatur. Detta inkluderar torkkapacitet, aktiva veckoperioder under året samt eventuella begränsningar i drifttid över dygnet.

5.4.2 Optimerad maskinkurva (Optimizer)

Efter att koden för identifierad maskinkurva färdigställts utvecklades en andra delmodell med syftet att undersöka huruvida det går att optimera maskinkurvan och på så sätt peak-shavea. Syftet med detta är att effektivisera lantbrukets energianvändning samt att skapa bättre förutsättningar för kommande steg: ö-drift, där dimensioneringen är starkt beroende av maxpeaken i konsumtionen. Detta kommer genomföras genom att kombinera beteendeförändringar (optimerad schemaläggning) med teknisk styrning (en simulerad effektvakt).

Efter dialog med KH Lantbruk AB identifierades maskiner som kunde flyttas på i tid (flexibla) samt maskiner/funktioner som inte går att flytta på.

Från den tidigare identifierade lastkurvan subtraherades gårdens värmepanna samt alla flexibla maskiner (utgödsling, tvätt och blötläggning). Kvar blev en statisk lastkurva bestående av fast baslast, ventilation, värmefläktar, ospecificerat brus och utfodring. Denna statiska profil utgör

ett omanipulerbart golv, det är “fryst”.

För att platta ut effektkurvan gavs de flexibla maskinerna bredare alternativt helt andra tidsfönster jämfört med orginal-driftmönstret. Genom kombinatorisk sökning (itertools.product) utvärderar algoritmen samtliga möjliga starttider för dessa flexibla maskiner under en given dag, summerar dem med den statiska baslasten och sparar det schema som genererar den lägsta dagliga maxeffekten. (Detta har samma iterativa logik som för det tidigare scriptet).

Som en extra åtgärd för energieffektvisering och kapning av peakar applicerades även en “Effektvakt”. När det optimerade maskinschemat har fastställts, appliceras en simulerad effektvakt över hela årets 8 760 timmar. Effektvakten sattes till en gräns på 110,0 kW. Om den totala effekten (statisk baslast + optimerade maskiner + önskad panna) en given timme överstiger 110,0 kW, stryper effektvakten värmepannan så att totalen landar på exakt 110,0 kW. För att simulera detta introducerades en algoritmisk “komfortspärr”:

Effektvakten har en minnesfunktion som räknar antalet sammanhängande timmar värmepannan har varit strypt. Om värmepannan har varit begränsad under max tillåten tid i sträck (i detta fall 2 timmar), aktiveras komfortspärren. Den åsidosätter omedelbart effektvaktens gräns på 110,0 kW och tillåter pannan att gå på full effekt under nästkommande timme, varpå varningsräknaren nollställs.

För att kunna utvärdera effekten av åtgärderna genererar modellen tre separata utfallskurvor:

- Original/referenskurvan som visar lantbrukets historiska förbrukning.
- En lastkurva där endast maskinschemat har optimerats, men utan effektvakt (värmepannan är orörd)
- En lastkurva där endast maskinschemat har optimerats och aktiverad effektvakt.

Skriptet returnerar även en jämförelse mot den identifierade maskinkurvan beskriven i avsnitt 5.4.1 (utan optimering) över total konsumerad energi över året samt maxtoppen i kW.

5.4.3 Identifierad maskinkkurva samt optimerad maskinkurva omformatterade

För att modellen ska vara dynamisk och flexibel är den uppbyggd för att styras helt via en konfigurationsfil, vilket beskrivs närmare i avsnitt 5.4.6. Koden består av två huvudsakliga delar som hanterar beräkningarna för den identifierade maskinkurvan (5.4.1) respektive den optimerade maskinkurvan (5.4.2).

Beräkningslogiken för dessa kurvor följer de principer som redogjorts för i respektive avsnitt, men istället för att förlita sig på hårdkodade värden (såsom specifika maskineffekter och schemalagda starttider) är koden strukturerad i funktioner. Vid körning anropar dessa funktioner skriptet interface.py, vilket i sin tur returnerar en dictionary (datastruktur) innehållande de parametrar som definierats i konfigurationsfilen. Denna struktur innebär att funktionerna initialt är tomma på data och endast exekverar logiken baserat på de dynamiska indata de tilldelas.

Datan som hämtas från Interface omfattar:

- Fasta baslaster
- Flexibla laster
- Tidsfönster för respektive flexibel last
- Lasternas maxeffektm (kW)
- Beroenderegler mellan laster
- Säsonger som vinter, sommar, höst, vår och specifika säsongslaster

Samt för optimeringen:

- Effekvakt (kW)
- Komfortspärr (h)
- Definera ej flyttbara laster och flexibla laster
- Uttökade tidsfönster för flexibla laster

Istället för att skripten själva läser in historiska mätfiler från hårddisken och sparar ned sina egna slutresultat, tar de nu enbart emot rådata i form av dataobjekt (Pandas DataFrames) direkt via funktionens parametrar. När Baseline eller Optimizer har slutfört sina respektive beräkningar returneras den färdiga datan tillbaka till den anropande filen. I praktiken agerar skripten som flexibla beräkningsmotorer och styrs exklusivt av instruktionerna och datan de tilldelas från "Interface".

5.4.4 Modellens träffsäkerhet

För att verifiera modellens precision och se hur väl algoritmen lyckas identifiera maskindriften beräknades träffsäkerhetet i skriptet genom två separata kvantifieringar. Båda stegen utgår från lantbrukets totala årsförbrukning (referenskurvan).

Det första steget utvärderar modellens förmåga att återskapa verkligheten (referenskurvan), exklusive det ospecificerade bruset. Detta mått visar hur stor andel av gårdens faktiska energianvändning som algoritmen kan identifiera som specifika laster:

$$\text{Träffsäkerhet (exkl. brus)} = \frac{\text{Total identifierad maskinlast (kWh)}}{\text{Total last referenskurva (kWh)}} \times 100\,\% \tag{7}$$

Modellens träffsäkerhet utvärderades därefter genom att ställa den totala identifierade lastkurvan, det vill säga inklusive brus, mot den totala referenskurvan:

$$\text{Träffsäkerhet (inkl. brus)} = \frac{\text{Total identifierad maskinlast (kWh)} + \text{Brus (kWh)}}{\text{Total last referenskurvan (kWh)}} \times 100\,\% \tag{8}$$

Den totala mängden overflow beräknas genom att utvärdera differensen mellan den identifierade maskinlasten och referenskurvan för varje enskild timme över hela året. För de timmar där den simulerade lasten är högre än den uppmätta förbrukningen adderas differensen till den totala overflow-volymen. Den matematiska formeln kan därmed beskrivas som summan av alla dessa överskjutande differenser:

$$\text{Overflow (kWh)} = \sum(\text{Total lastkurva (inklusive brus)}_t - \text{referenskurvan}_t) \tag{9}$$

För att säkerställa att modellen framgångrikt kapade effekttoppar vid optimering (5.4.2) så gjordes även en jämförelse av årets maxttopp innan och efter optimering. Maxtoppens effektreduktion beräknades genom att identifiera och jämföra årets enskilt högsta timvärde (kW) före och efter algoritmens om-schemaläggning och effektvakt. Differensen mellan maxeffekten för den ursprungliga identifierade lastkurvan och den optimerade lastkurvan utgör den totala kapade effekten.

$$\begin{aligned}\text{Maxtoppens effektreduktion (kW)} = \max(&\text{Identifierad lastkurva (kW)}) \\ &- \max(\text{Optimerad lastkurva (kW)})\end{aligned} \tag{10}$$

Effektkapningen uttryckt i procent:

$$\text{Effektreduktion (\%)} = \frac{\text{Maxtoppens effektreduktion (kW)}}{\max(\text{Identifierad lastkurva (kW)})} \times 100 \tag{11}$$

5.4.5 Ö-driftsimulering

Simuleringen gör det möjligt att testa ett lantbruks förmåga att gå ö-drift utifrån konsumtions- och produktionsdata samt vetskap om maskinernas drift från föregående delmodeller som kallas "Idenifiering av maskinkurva" och "Optimerad maskinkurva". Dessutom kan parametrar för batteri och reservkraft adderas till modellen. Modellen är dynamisk och tillåter användaren att konfigurera systemets utrustning och på så sätt utvärdera systemets nuvarande sårbarhet och alternativa scenarier. Det som kommande beskrivs som "angivna" innebär att det har matats in i konfigurationsscriptet "Interface". En närmare beskrivning av det scriptet kommer i avsnittet "Interface via Streamlit".

Simuleringen ger svar på om systemet klarar av det angivna avbrottet och i så fall hur många timmar av den totala avbrottstiden som systemet klarar sig. Vid otillräcklig kapacitet för att hantera hela avbrottet så ges dimensioneringsförslag för batteri och reservkraft. Dessutom kan användaren simulera en framtida utbyggnad av elproduktionen genom att procentuellt skala upp egenproduktionen, i detta fall sol- och biogasproduktionen. Modellen är uppdelad i tre huvudsakliga delar: en batteriklass, en dimensioneringsmodul vars syfte är att ge storleksförslag på batteri och dieselaggregat.

5.4.5.1 Batteriklass (`class Battery`)

Skriptet skapar ett virtuellt batteri i form av en Python-klass. Batteriklassen innehåller två huvudfunktioner för att hantera energilagringens dynamik.

Den första funktionen initierar batteriet med tekniska förutsättningar angivna i konfigurationsfilen (*Interface*):

- **Maxkapacitet (kWh):** Anger batteriets totala energilagringsförmåga.
- **Maximal i- och urladdningseffekt (kW):** Definerar hur mycket effekt batteriet kan leverera eller ta emot under en enskild timme.
- **Initial laddningsgrad-SOC (decimalform):** Anger batteriets laddningsnivå (*State of Charge*) vid simuleringens start. För att efterlikna ett realistiskt och konservativt avbrottsscenario startar simuleringen som standard med en laddningsgrad på 0,9 (90 %) eftersom det är svårt att förutsätta att batteriet är helt laddat då ett avbrott sker.
- **Verkningsgrad (decimalform):** Anger batteriets effektivitet vid i- och urladdning. En verkningsgrad på exempelvis 0,90 innebär att 10 % av energin går förlorad vid varje i- respektive urladdningscykel.
- **Minimi-SOC (decimalform):** En undre säkerhetsgräns för urladdning.
- **Maximi-SOC (decimalform):** En övre gräns för uppladdning.

Funktionen med maximal i- och urladdningseffekt hanterar batteriets drift timme för timme och beräknar nettoeffekten som skillnaden mellan produktion och konsumtion. Vid överskott beräknas tillgängligt utrymme ut mot den maximala SOC-nivån och om det finns plats så kommer batteriet att laddas med hänsyn till befintlig laddningsnivå och den angivna verkningsgraden. Vid effektunderskott matar batteriet ut effekt för att täcka gårdens behov tills dess att minsta tillåtna laddningsnivå nås (minimi-SOC) och därefter uppdateras SOC. Om minimigränsen nås

innan effektbristen hinner täckas så returnerar simuleringsslingan den utlevererade effekten och registrerar skillnaden som effektbrist. Batteriklassen självt returnerar den faktiska effekten.

Batteriets effektuttag per tidsenhet begränsas av den angivna maxeffekten. Förhållandet mellan kapacitet och effekt definierar systemets C-rate, vilket beskriver tiden det tar att ladda ur eller ladda upp batteriet fullt.

5.4.5.2 Dimensionering av system

Dimensioneringen har som uppgift att presentera dimensioneringsförslag på reservaggregat och batteri anpassade efter användarens befintliga utrustning oavsett om det angivna systemet klarar avbrottet eller inte. Dessa beräkningar genomförs med tre algoritmer (avsnitt 5.4.5.2.2, 5.4.5.2.3 och 5.4.5.2.4) vilka tillsammans samverkar för att ge tekniskt genomförbara förslag. I avsnitt 5.4.5.2.5 beskrivs algoritmernas tillämpning för fyra olika typer av scenarier beroende på hur den befintliga utrustningen ser ut.

5.4.5.2.1 Hantering av startströmmar och ideal generator

Modellen beräknar alltid den minsta möjliga dieselgenerator-storleken som ensam klarar av ett givet avbrottsscenarie som referensfall. Denna beräkning utgår från två huvudkriterier där det högsta (svåraste) värdet styr utfallet.

Det första kriteriet handlar om det momentana effektbehovet i det ögonblick som elnätet går ner (dödnätsstart). För att täcka behovet av all kritisk utrustning summeras effekten för alla maskiner som definierats som "Prio 1"- och "Prio 2"-laster. Effekten hos maskiner vars motorer är elektriska multipliceras med den angivna startströmsfaktorn och modellerar där efter den effekttoppen som kommer att uppstå i samband med uppstart. Övrig baslast adderas utan startströmsfaktor. Uttrycket för den dimensionerade starteffekten ges av:

$$P_{\text{start}} = P_{\text{baslast}} + P_{\text{motorer}} \cdot f_{\text{start}}$$

där f_{start} anger startströmsfaktorn (standardinställning 1,5).

Det andra kriteriet handlar om kontinuerlig drift där den timme under angivet avbrott vars total last är den högsta kommer att identifieras för att sedan addera en säkerhetsmarginal enligt:

$$P_{\text{kontinuerlig}} = max(P_{\text{last}}) \cdot (1 + m/100)$$

där m anger säkerhetsmarginalen i procent (standardinställning 20 %).

Den dimensionerade effekten för den ensamma generatorn sätts sedan till det av dessa värden som är högst, för att säkerställa kraven. För att omvandla aktiv effekt (kW) till det mått som generatorer är märkt med, d.v.s. skenbar effekt (kVA), så används effektfaktorn cos φ.

5.4.5.2.2 Binärsökning för optimal storlek av batteri och reservkraft

Den minsta möjliga storleken hos respektive komponent bestäms matematiskt genom en binärsökningsalgoritm. Detta för att effektivisera och öka mängden beräkningsmöjliga scenarier

eftersom en linjär sökning (testa sig fram stegvis) skulle innebära att scenarier med långa lasttidsserier tar orimligt lång tid att beräkna fram.

Rent praktiskt fungerar algoritmen så att den initierar ett sökfönster med ett minimi- och maximivärde för storleken av batteriet (kWh) respektive reservkraften (kW). Där efter testas varje utfall mot en tidsstegssimulering, vilken är en exakt reproduktion av den driftstrategi som den fullständiga simuleringen också gör. Det första värdet som stoppas in för batteriet och reservkraften är mittenvärdet (mid) av sökfönstret. Beräkningsmässigt kan det beskrivas som:

$$mid = (lo + hi)/2$$

där "lo" är noll och "hi" är 2000 kW eller kWh beroende på om det är batteriet eller reservkraften som avses.

Om systemet klarar av att hantera hela avbrottstiden utan att batteriet når SOC_min så sänks det övre gränsvärdet "hi" till "mid". Om systemet inte klarar av att hantera hela avbrottstiden utan att batteriet når SOC_min så höjs det undregränsvärdet "lo" till "mid" istället. För att reducera antalet beräkningar kommer processen att itereras ett förbestämt antal gånger och är i denna algoritm satt till 14 iterationer. Detta reducerar sökintervallet med en faktor 2^{14} och kommer samtidigt att ha en hög precision med en avvikelse på några få millisekunder. Principen tillämpar oavsett om systemet har en förbestämd generatorstorlek och söker ett lämpligt batteri eller om det är ett fast batteri och det är generatorstorleken som beräknas.

5.4.5.2.3 Tröskelbaserad hybriddimensionering (percentilmetoden)

Optimeringen av batterilager och reservkraft i ett hybridsystem kräver några regler för vilket energislag som ska hantera vilken del av lasten. För att samspelet ska följa logiken kring hur en önskvärd drift bör se ut och maximera användningen av redan egenproducerad el så har en tröskel tagits fram. Istället för att dimensionera dieselgeneratorn mot den absoluta maxlasten, vilket krävs om inget batteri finns att tillgå, så delas lastprofilen upp i två delar. Den första zonen är en baslastzon och den andra är en topplastzon. Vad som definieras som bas- respektive topplastzon styrs av användarens egen vilja med en statistisk percentil. Genom att ange ett tröskelvärde på till exempel 0.8 så kommer baslastzonen bestå av de 80 % lägst belastade timmarna inom det angivna tidsintervallet. På samma sätt blir topplastzonen sedermera att utgöras av de 20 % högst belastade timmarna. Effekttröskeln definieras matematiskt som:

$$P_{\text{tröskel}} = Quantile(P_{\text{netto}}, \alpha)$$

där α är den angivna percentilgränsen (standardinställning 0,95). Rent praktiskt innebär detta att algoritmen utvärderar hela tidsserien för nettolasten (P_{netto}) och returnerar det specifika effektvärdet (i kW) där andelen α av värdena understiger denna nivå. Detta returnerade värde blir därmed den fasta fysiska gränsen som delar upp anläggningens behov i baslast respektive topplast. Logiken blir att batteriet dimensioneras ensamt för att täcka all "baslast", medan generatorn dimensioneras för att hantera topplastens timmar. En högre percentil innebär att batteriet tar en större andel av lasten och att generatorn kan vara mindre, och vice versa. För kontinuerlig drift beräknas generatorns rekommenderade effekt genom att subtrahera effekttröskeln från nettolastseriens absoluta maxpeak och därefter applicera den valda säkerhetsmarginalen. Generatorn dimensioneras alltså enbart för de toppar som överstiger batteriets förmåga:

$$P_{\text{hybrid_kontinuerlig}} = max(0, P_{\text{netto}} - P_{\text{tröskel}} \cdot (1 + m/100)$$

För att säkerställa att systemet förblir tekniskt robust jämförs $P_{\text{hybrid_kontinuerlig}}$ med det momentana startströmsbehovet under avbrottets tyngsta time. Av säkerhetsskäl samt för att skydda batteriets växelriktare från stora strömmar antas batteriet inte hjälpa till vid dödnätsstart av motorer enligt avsnitt 4.1.3 och 4.4.5. Generatorns slutgiltliga storleksrekommendation sätts därmed till det svåraste (hösta) värdet av konstinuerligt toppbehov och isolerat startströmsbehov. Batteriet dimensioneras via binärsökning (avsnitt 5.4.5.2.3) med hänsyn till generatorns kapacitet.

I de fall där en systemkrasch uppstår innan det angivna ödriftsscenarie har simulerats färdigt kommer alltid det optimerade hybridförslaget att beräknas och presenteras som ett alternativ till befintlig dimensionering av den tekniska utrustningen.

5.4.5.2.4 Teknisk realism med C-rate

Algoritmen kommer inte själv att veta hur realistiska de framräknade parametrarna för ett batteri är. Det som föreslås är bara en optimal lagringskapacitet (kWh) och maxeffektuttag (kW) - men algoritmen tar inte hänsyn till om ett sådant batteri kan existera. För att hantera detta och inte hantera dessa parametrar som frikopplade från varandra så integrerades en korrigeringsfunktion som utgår från batteriets C-rate. Eftersom att C-rate håller i relationen mellan maxeffekten och kapaciteten hos ett batteri så kommer förslagen som algoritmen levererar på detta vis säkerställa att de är tekniskt genomförbara. C-rate definieras som:

$$C_{\text{rate}} = P_{\text{nettomax}} / E_{\text{kapacitet}}$$

där C-rate är 0.5 som standardinställning och innebär att batteriet kan leverera full effekt under två timmar. Vid C-rate = 1 betyder det att full effekt kan levereras under exakt 1 timme. Funktionen tar de framsökta värdena från binärberäkningen för kW och kWh samt det angivna C-rate-värdet som indata för att beräkna de två dimensionerade kraven mot varandra:

$$P_{\text{frånenergi}} = E_{\text{behov}} \cdot C_{\text{rate}}$$
$$E_{\text{fråneffekt}} = P_{\text{behov}} / C_{\text{rate}}$$

För att hitta den slutgiltliga dimensioneringen väljer algoritmen det som klarar av det högsta och svåraste kravet:

$$P_{\text{slutgiltlig}} = max(P_{\text{behov}}, P_{\text{från energi}})$$
$$E_{\text{slutgiltlig}} = max(E_{\text{behov}}, E_{\text{från effekt}})$$

Utgångspunkten blir alltså att resultatet utgår från det svåraste av de två kraven och där efter justerar batteriet så att det ska följa logiken av C-rate. Förslagen som ges och har en batteriintegration passerar denna funktion innan det presenteras för användaren för att se till att de fysikaliska egenskaperna stämmer överens med batterissystem som finns i verkligheten.

5.4.5.2.5 Simuleringsfunktionen och dimensioneringsfall vid ö-drift

Den övergripande funktionen som har till uppgift att stega igenom simuleringen timme för timme är funktionen simulera_odrift. Beroende på vilken befintlig utrustning användaren har angett i gränssnittet (Interface) utvärderas systemet utifrån fyra olika driftsscenarier. Modellen

beräknar alltid dimensioneringsförslag oavsett om systemet klarar avbrottet eller inte, så att användaren alltid får ett optimerat åtgärdsförslag.

För att säkerställa att systemets batteri eller reservkraft inte överdimensioneras i onödan, indelas maskinerna i prioritetsklasser. I ö-driftssimuleringen exkluderas de maskiner som inte är kritiska för djurhälsan eller verksamhetens överlevnad, "Prio 3", från datamängden. Energibalansen för gården styrs därefter utifrån följande fyra fall:

1. **Hybridsystem (Reservkraft > 0 och Batteri > 0):** Om bägge är angivna samverkar utrustningen genom "Peak Shaving". Egen produktion används först, vid registrerat underskott fyller dieselgeneratorn på och täcker bristen upp till sin maxeffekt. Batteriet aktiveras endast för att täcka de toppar som överstiger generatorns maxkapacitet. Batteriet laddas vid energiöverskott enligt avsnittet 5.4.5.1 Om den angivna dimensioneringen inte räcker till blir det en systemkrasch. Modellen hämtar då beräkningen från kalkylatorn beskrivet under "Dimensionering av Stödbatteri" och returnerar ett förslag på kompletterande stödbatteri.
2. **Endast batterid (Reservkraft = 0, Batteri > 0):** Om endast batteriet är angivet och reservkraft satt till 0 så kommer batteriet och egen elproduktion bära hela ansvaret. Om batteriet når minimi-SOC eller om lasten överstiger batteriets maxeffekt (kW) loggas en systemkrasch. Modellen genererar då och skriver ut ett förslag på kompletterande reservkraft beräknat enligt avsnittet 4.2.3.
3. **Endast reservkraft (Reservkraft > 0, Batteri = 0):** Om endast reservkraft är angiven förlitar sig systemet helt på generatorn och den egenproducerade elen. Om en momentan effekttopp överstiger generatorns kapacitet uppstår en systemkrasch. Modellen använder då sin inbyggda kalkylator för att dimensionera och föreslå ett kompletterande stödbatteri.
4. **Ingen utrustning (Reservkraft = 0, Batteri = 0):** Om varken reservkraft eller batteri har angetts är gården helt beroende av sin egen elproduktion. Systemet kraschar i samma stund som konsumtionen överstiger produktionen. Algoritmen beräknar därefter den minsta möjliga rena generatorlösningen som krävs för att hantera avbrottet, med hänsyn till både kontinuerlig maxlast och kritiska startströmmar. Samtidigt beräknas och presenteras ett optimerat hybridförslag med både batteri och reservkraft (enligt percentilmetoden och binärsökning).

Energi-clipping och Loggning
I ö-drift så är det krav på konstant balans mellan produktion och konsumtion. Om produktionen överstiger konsumtionen och batteriet är fullt uppstår ett överskott som då måste begränsas (*clipping*). Koden mäter då clippingen solenergin och skriver ut mängden energi som klippts bort.

Samtliga händelser, inklusive batteriets laddningsgrad (SOC), bränsleförbrukning, systembrist och clipping, loggas löpande. Efter avslutat avbrott returneras en sammanställning med överlevnadstid, total dieselförbrukning samt kontextuella åtgärdsförslag för att uppnå ö-drift under angivet intervall.

5.4.6 Användargränssnitt via Streamlit (interface.py)

Processerna för att ta fram den identifierade maskinkurvan och den optimerade maskinkurvan, som i tidigare avsnitt har beskrivits som fasta (hårdkodade), har i "Interface.py" omarbetats för att kunna styras direkt via ett användarvänligt gränssnitt.

Istället för att användaren ska behöva gå in och ändra i de enskilda beräkningsskripten, skrivs

all indata och alla inställningar in via ett grafiskt användargränssnitt (GUI) implementerat i Python-skriptet "Interface.py". Skriptet agerar därmed som en brygga mellan systemets alla delar: det tar emot användarens konfigurationer och skickar ut dem som instruktioner till de underliggande modulerna (data_loader, baseline, optimizer och microgrid). När dessa moduler har utfört sina beräkningar returneras svaren tillbaka till interface.py, som slutligen sammanställer och presenterar den färdiga datan.

Gränssnittet är byggt med Streamlit vilket är ett Python-ramverk och inte kräver några särskilda krav för separat frontend-programmering. Gränssnittet (applikationen) körs lokalt och dyker upp i webbläsaren vilket tillåter visualisering av parametrarna och möjligheten att uppdatera dessa i realtid.

5.4.6.1 Sessionshantering och konfigurationsstruktur

Konfigurationen av parametrarna lagras i ett Python-objekt (st.session_state.config) och är strukturmässigt en nästlad dictionary vilken kommer att utgöra simuleringens inställningar. När ett värde skickas in från användargränssnittet så kommer de "köra över" eventuella fördefinierade värden från Python-modellen. Även fast objektet st.session_state.config initieras med fördefinierade standardvärden så agerar gränsnittet som ett dynamiskt lager och skriver över de gamla värdena om användaren interagerar med gränssnittet. En av de centrala funktionerna med Streamlit är att objektet kommer ihåg ifyllda värden mellan gränssnittets olika sidor. Dessutom skriver samtliga flikar till samma objekt vilket innebär att i de fall som en förändring i flik 1 bör påverka flik 2 så kommer dessa beräkningar per automatik ske i realtid. Resultaten från simuleringen lagras i st.session_state och görs tillgänglig för visualisering i plottar och olika representativa tal i flik 5 "Plottar". De olika nyckelgrupperna som går att ändra och påverkar simuleringen är "fasta_laster", "maskiner_baseline", "beroenden", "klimat", "optimering" och "microgrid".

5.4.6.2 Flikarnas innehåll och struktur

I gränssnittet organiseras koden i olika kategorier för att ge ett logiskt flöde för användaren att gå igenom. Bilder för hur gränssnittet ser ut finns under bilagor i avsnitt 9. Det är totalt fem flikar som består av:

- **Flik 1 - Maskiner (Baseline):** Här samlas samtliga av gårdens maskiner. Användaren kan där efter fylla i effekten för den samt vilka timmar som respektive maskin körs. Detta utgör grunden för hur maskinerna körs typiskt på gården i dagsläget. Timmarna har förvalda värden som går att justera via ett reglage. På samma sida finns även en plot-visualisering som visar hur många maskiner som belastar samma timme under ett dygn.
- **Flik 2 - Säsong och veckor:** Denna flik används i regel inte i dagsläget särskilt mycket. I flik 2 går det att själv definiera vilka veckor som tillhör årets säsonger eftersom det kan finnas maskiner vars drift är säsongsberoende. Det går även att välja vilka veckodagar som maskinerna körs på.
- **Flik 3 - Optimering:** Flik 3 har till syfte att hantera vilka maskiner som anses vara "fasta" och vilka som är "flexibla" för att där efter tillåta maskinernas driftstider att ändras. Eftersom algoritmen som sorterar in maskinerna mot lastkurvan kommer att trycka in maskinerna enligt "Baseline"-definitionerna så har denna del i uppgift att låta maskinernas tillåtna driftstimmar utökas eller flyttas till andra delar på dagen. Även i denna flik fås en visualisering över vilka timmar som är högst belastade för att ha som stöd då driften optimeras. Förutom detta så har även optimeringsfliken "Effektvakt"

och "Komfortspärr" - vilka är variabler kopplade direkt till gårdens uppvärmningssystem. Genom att justera effektvakten så tvingas algoritmen att så gott det går trycka ned lastkurvan för att inte överstiga detta värde. Komfortspärren är en timspärr som sätter gränsen för hur länge värmepannan kan vara avstängd i rad innan den måste startas igen - för att säkerställa att inte temperaturen sjunker för mycket.

- **Flik 4 - Ö-drift och simulering:** Det är från denna flik som själva simuleringen av ödriften kan göras. Här finns samtliga parametrar beskrivna under avsnitt 5.4.5.2. Tre kolumner för reservkraft, batteri och övriga inställningar med möjlighet till att justera avancerade batteri- och reservkraftinställningar finns. Under övriga inställningar finns även möjligheten att skala upp befintliga egenproduktionen på gården, vilket i detta fall är sol- och biogas. Genom att skriva in ett värde högre än 100 % tillämpas detta. I nästa del kan maskinerna delas in i grupperna "Prio 1", "Prio 2" och "Prio 3" där ödriftsscenariet endast kommer att köra maskinerna som ingår i Prio 1 + Prio 2.

  Användaren kan sedan välja exakt vilket tidsintervall som de vill köra simuleringen över genom att ange startdatum och starttid samt antalet timmar de vill testa ett elavbrott. Genom att kryssa i rutan "Inkludera maxlasttimmen" kommer även en simulering som utgår från årets absoluta effekttopp att inkluderas och köras för samma antal timmar som angetts för det kundvalda datumet. Scenariot med *maxlasttimmen* utgår från lastkurvans effekttopp eftersom det i sig innebär att dimensioneringen av reservkraft/batteri kommer kräva störst storlek. Scenariot med *maxlasttimmen* tar alltså inte hänsyn till andra aspekter som också kan innebära ett komplicerat driftsscenario.

  Då användaren väljer att köra simuleringen kommer beräkningskedjan att göras i några delsekvenser: rådatan laddas och rensas i "data_loader", baseline byggs upp av "baseline", lastoptimering körs av "optimizer" och slutligen simuleras ö-driften av "microgrid". Resultaten presenteras i samma flik med kraschstatus, antalet timmar som driften klarade av att köras innan eventuell krasch och ger sedan dimensioneringsförslag enligt avsnitt **??**.

- **Flik 5 - Plottar:** Visualisering av resultaten finns att tillgå först när en simulering har körts på flik 4. En grafisk jämföresle av baseline, optimerad lastkurva och ö-driftskurvan visas för avbrottstiden med alternativet att kunna se det för ett helt kalenderår. De tre största peakarna för respektive lastkurva går även det att se – för att på ett tydligt sätt visa vad skillnaden i driften har blivit mellan scenarierna. Om det inte gick att köra ödrift för alla timmar under angivet avbrott så visas även tidpunkten för kraschen i samtliga plottar. Det finns även en ödriftsgraf som visar varje simulerat scenario, ödriftslasten, lokala elproduktionen, dieselkörningen, batteriets drift och eventuella timmar där lasten inte kunde täckas (orsaken till systemkrasch). På så vis går det att läsa ut hur mycket effekt som saknades för att scenariet hade kunnat varit genomförbart.

5.4.6.3 Standardparametrar för simuleringen

Inne i gränssnittet så finns redan samtliga parametrar definierade med några standardinställningar, dessa är sammanställda i tabell 3. Dessa parametrar utgår dels från grunddatan given av lantbrukaren kring effekt hos maskinerna och driftsmönster, men det är även egendefinierade parametrar där grundinställningen satts till ett godtyckligt värde.

Tabell 3: Sammanställning av standardparametrar och deras värden i simuleringsmodellen.

Parameter	Standardvärde	Beskrivning
Batteriets verkningsgrad	90 %	Round-trip effektivitet vid laddning/urladdning
Batteriets Start-SOC	90 %	Antagen laddningsgrad när strömavbrottet inträffar
Batteriets Min-SOC	10 %	Den lägsta nivå batteriet får laddas ur
Batteriets Max-SOC	90 %	Laddningsmax för att spara batteriets livslängd
C-rate	0,5	Förhållandet mellan effekt (kW) och kapacitet (kWh)
Dieselförbrukning	0,3 l/kWh	Specifik förbrukning för aggregatet
Startströmsfaktor	1,5	Multiplikator på Prio 1 & 2-motorlaster vid start-up
Reservkraft marginal	20 %	Säkerhetsmarginal över högsta identifierade effekttopp
Effektfaktor ($\cos\phi$)	0,8	Förhållandet mellan kVA och kW
Sol- & biogasproduktion	100 %	Procentuell skalning av egenproducerad effekt
Tröskel-percentil	95 %	Standardgräns för hybridstyrning

5.4.7 Nettopositiv drift – försörja trygghetspunkt

För att undersöka lantbrukets förmåga att försörja en lokal trygghetspunkt vid elavbrott simulerades ett utökat ö-driftsscenario där trygghetspunktens lastbehov adderades till lantbrukets. Simuleringen förutsätter att en fysisk sektionering av elnätet är genomförbar, vilket motiveras av nättopologin som beskrivs under avsnitt 6.5.1. Analysen är specifik för referensgårdens förutsättningar och genomförs direkt i Python-skriptet `trygghetspunkt.py` utan Streamlit-gränssnittet, eftersom simuleringen inte är avsedd som en del av det generella verktyget. Lastdata för de två trygghetspunkterna tillhandahölls av Borgholm Energi Elnät AB med timupplösning för år 2025. Simuleringen sträcker sig över hela kalenderåret och genomfördes för respektive trygghetspunkt med de två hybriddimensioneringsförslag som ö-driftssimuleringen genererade, ett baserat på *veckan med maxlasttimmen* och ett baserat på den *tuffaste veckan* (se avsnitt 5.4.5.2.3). Dimensioneringsvärdena som användes framgår av tabell 4. Analysen är uppdelad i två steg som bygger på varandra.

I det **första steget** täcker systemet lantbrukets eget lastbehov enligt den optimerade lastkurvan med prio 1- och prio 2-laster. Eventuellt nettoproduktionsöverskott – det vill säga den el som annars skulle försvinna som clipping – används för att täcka trygghetspunktens last. Detta steg ger en bild av hur ofta lantbrukets befintliga nettoproduktion, utan ytterligare belastning på reservkraft eller batteri, räcker till för att bistå trygghetspunkten.

I det **andra steget** behandlas lantbrukets och trygghetspunktens laster som ett gemensamt system. Den nya lastkurva som systemet ska täcka är summan av de båda, vilket innebär att dieselaggregatet och batteriet aktiveras med målet att försörja båda anläggningarna. Detta steg ger en mer realistisk bild av vad som faktiskt krävs för att upprätta en kontinuerlig ö-drift som inkluderar trygghetspunkten.

För båda stegen och samtliga dimensioneringsfall tas följande nyckeltal fram: antal timmar per år som trygghetspunktens last kan täckas, antal separata avbrott i försörjningen, längsta sammanhängande period utan avbrott samt total dieselförbrukning. Timmar då försörjningen lyckas visualiseras med gröna fält och otillräckliga perioder med röda fält i de framtagna graferna.

6 Resultat

6.1 Tekniska förutsättningar och begränsningar för ö-drift på ett givet lantbruk

För att ett lantbruk ska kunna övergå till och upprätthålla ö-drift är det en förutsättning att det finns lokal elproduktion, såsom solceller eller en biogasanläggning. För att exempelvis solcellerna ska kunna vara aktiva och leverera ström under ett nätavbrott ställs krav på att de är kopplade till en hybridväxelriktare med funktion för "back up power" eller "standalone mode". För biogasanläggningar finns kravet att de måste kunna bibehålla ett specifikt gastryck och en jämn gasleverans för att inte stanna under ö-driften, vilket kan kräva installation av en extra gasfläkt. Vidare skiljer sig kraven åt beroende på om biogasanläggningen är utrustad med en synkron- eller asynkrongenerator, vilket behandlas närmare nedan 4.4.5.

Eftersom anläggningen isoleras från det överliggande elnätet övergår ansvaret för spännings- och frekvensregleringen från Svenska kraftnät (SVK) till det lokala elnätsbolaget. Ett lantbruk som bedriver verksamhet behöver i och med detta upprätta ett avtal med sitt elnätsbolag 4.5.

För att övervaka och hantera systemet är ett överordnat styrsystem en nödvändig förutsättning för ett lantbruk i ö-drift. Ett EMS (Energy Management System) övervakar och styr alla enheter genom kommunikation med växelriktarna. På så vis kan driften optimeras, exempelvis genom att styrsystemet avgör när ett eventuellt elöverskott ska lagras 4.4.3.

För att klara övergången till ö-drift efter ett strömavbrott måste systemet ha förmågan till dödnätsstart, vilket innebär att det kan spänningssätta ett dött nät från noll. Denna procedur kräver två saker:

- Dels att kraftkällan är nätbildande (grid-forming), vilket innebär att den självständigt kan sätta en referens för spänning och frekvens. Denna nätbildande funktion kan åstadkommas genom en grid-forming växelriktare kombinerat med ett batterisystem (BESS), ett dieselaggregat (där spänningen regleras via magnetiseringsströmmen och frekvensen via bränsletillförseln) eller en biogasanläggning med synkrongenerator (alternativt kombinerat med BESS). Om gårdens biogas istället drivs av en asynkrongenerator saknar den denna egenskap och kräver därmed stöttning av ett batterisystem eller ett dieselaggregat för att sätta nätets frekvens 4.4.5.
- Dels krävs att kraftkällan har tillräcklig momentan effektkapacitet för att hantera de höga startströmmar som uppstår när maskinerna startar upp.Denna utmaning hanteras med fördel genom att upprätta en prioriteringsordning för lantbrukets maskiner, så att de inte startas samtidigt och där med överbelastar systemet. För att åstadkomma en sådan lastprioritering kan det interna elnätet behöva byggas om, varvid de mest kritiska lasterna (såsom utfodring, värme och ventilation) placeras på en egen undercentral. Viktigt att beakta här är att även fast lantbrukets prioriterade maskiner drivs med trefas, krävs en hybridväxelriktare som klarar av asymmetrisk trefasmatning under ö-drift, närmre beskrivet i avsnitt 4.4.2.

Det finns även andra delar som gör att ett reservaggregat (dieselgenerator exempelvis) kan vara lämpligast vid dödstart. Det handlar om batteriernas elektroniska begränsningar mot stora strömmar vilket beskrivs i avsnitt 4.1.3. Vidare betyder denna inneboende strömbegränsning hos batterier att säkringar som inte är dimensionerade efter de tekniska förutsättningarna som existerar under ödrift löper risk att inte lösas ut vid fel. Att säkringarna inte löses ut vid fel är problematiskt och beskrivs närmre i avsnitt 4.3.3. Säkringsdimensionering som leder till nya, lägre, maxeffektuttag kan också leda till en ökad betydelse för EMS-systemet. Detta på grund

av att det inte längre räcker med att titta på befintlig energitillgång i batteriet, utan också måste matcha sig mot ett nytt lägre "säkringstaket".

Sammantaget innebär detta att dieselaggregat för dödnätsstart kan vara bra ur två perspektiv: dels för att ge nödvändig effekt vid tunga starter, men också för att bidra med en kortslutningsström som krävs för elsäker drift av tunga maskiner.

Utöver produktionskraven finns det strikta elsäkerhets- och installationskrav för att en anläggning ska godkännas för ö-drift av nätägaren. Gården måste fysiskt kunna sektioneras och helt kopplas bort från det allmänna elnätet via en nätelkopplare (brytare), som garanterar att ström inte oavsiktligt matas baklänges ut på elnätet. Omkopplingen mellan nätanslutet läge och ö-drift måste i sin tur ske säkert via en manuell eller automatisk reservkraftsomkopplare (ATS). Vid bortkopplingen bryts även förbindelsen med nätets jordningssystem, vilket innebär att lantbruket måste ha ett eget godkänt lokalt jordtag. Om elsystemet är ett TN-S-system tillkommer kravet att fyrpoliga brytare används för att säkerställa att skyddsjorden under inga omständigheter strömsätts. Dessutom ställs det krav på dokumentation och kontroller för att säkerställa att installationen är godkänd 4.4.4.

6.1.1 Referensgården KH Lantbruk AB

Förutsättningar och begränsningar kan skilja sig mycket mellan olika gårdar eftersom varje gård är unik. Utifrån ovan nämnda tekniska förutsättningar och begränsningar för ö-drift på lantbruk kan det fastställas att det krävs insatser på referensgården KH Lantbruk AB för att möjliggöra ö-drift. Gården har både biogasproduktion och solceller, vilket utgör goda grundförutsättningar. Det finns dock tekniska hinder för att upprätthålla en stabil drift vid ett strömavbrott. I nuläget uppstår effektbrist under vissa timmar eftersom elproduktionen och konsumtionen inte sammanfaller i tid.

Det finns i dagsläget även systemtekniska begränsningar. Biogasanläggningen drivs av en asynkrongenerator, vilket innebär att den inte på egen hand kan upprätthålla nätets spänning och frekvens och därmed inte kan drivas ensam i ö-drift. Vidare är solcellerna kopplade till stringväxelriktare. Eftersom dessa inte är hybridväxelriktare är inte heller solcellsanläggningen förberedd för ö-drift.

Lantbruket saknar i nuläget även energilagring och reservkraft. Energilagring skulle underlätta genom att balansera den befintliga produktionen mot konsumtionen, medan reservkraft är ett krav för att klara en dödnätsstart. Batteriet behöver med fördel vara utrustad med en grid-forming växelriktare som sätter referensen för systemets spänning och frekvens. De andra växelriktarna i systemet (solcellernas till exempel) kan då koppla upp sig mot grid-forming växelriktaren. Slutligen saknas ett överordnat styrsystem (EMS). En investering i ett sådant system behövs för att öka kontrollen, optimera driften och därmed kunna nyttja gårdens elproduktion mer effektivt.

6.2 Modellering av energisystem

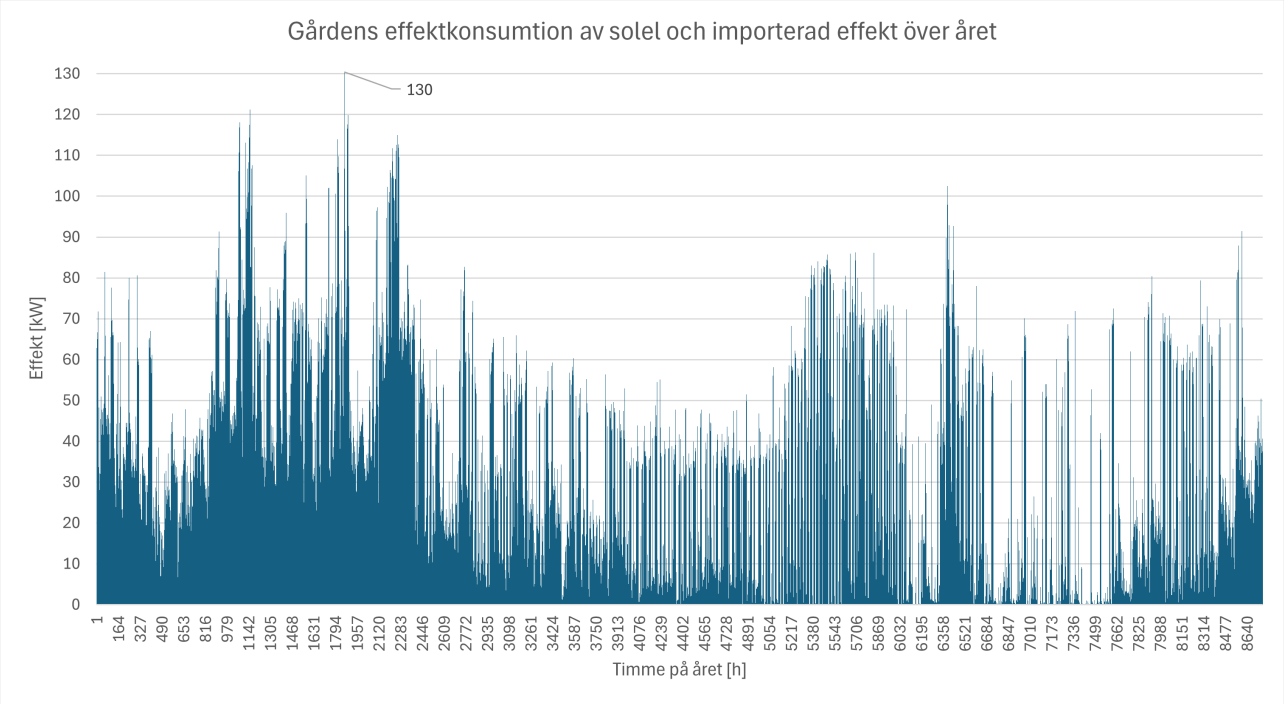
För att besvara frågeställningarna gällande gårdens last- och produktionskurva presenteras här resultaten av den datamodellering som utfördes i Excel och Python. De initala plottarna över hela året bygger direkt på det beräkningsarbete som beskrivs i avsnitt 5.3.1. Genom att integrera rådata från elnätsbolaget, solcellsanläggningen växelriktare och biogasanläggningen har en komplett och kalibreread lastkurva kunnat sammanställas för att representera gårdens faktiska energibehov över ett helt år (2025).

Det första som illustreras är den baslast som kunnat gå att säkerställa via växelriktarenas mätdata i figur 4. Därefter presenteras en slutgiltig lastkurva där biogasproduktionens uppskattade

egenanvändning har integretats dynamiskt enligt metoden i avsnitt 5.3.1. Denna kalibrerade helårskurva utgör fundamentet för den efterföljande simuleringsmodellen som byggs i Python och refereras till som "referenskurvan".

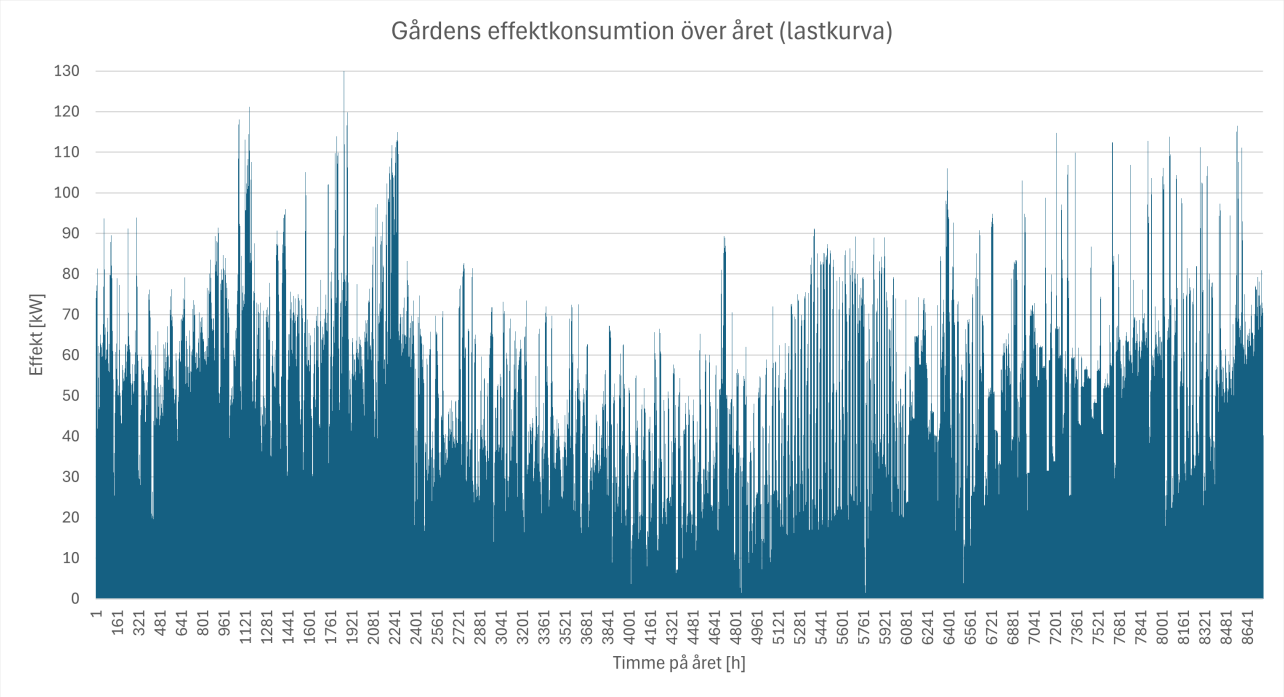
Med detta som utgångspunkt så har Python-algoritmen (beskriven i avsnitt 5.4 använt denna historiska data för att sedan identifiera hur driften för maskinerna har schemalagts på timnivå. För att återskapa en så detaljerad bild som möjligt över hur väl algoritmen lyckats återskapa gårdens interna energiflöden och där efter optimera driften så presenteras resultatet från ett simulerat exempeldygn för varje årstid.

De figurer som presenteras nedan är resultatet från den initala modelleringen av lantbrukets energisystem som genomfördes i Excel 6.2.



Figur 4: Graf som visar gårdens elförbrukning som kommer från solproduktion och importerad effekt från elnätsbolaget.

Figur 4 representerar den "råa datan" som är säkerställd mot växelriktarna och består av egenanvändningen av solelen och den importerade elen från nätbolaget. Detta är i princip lastkruvan (referenskurvan) men exkluderar elanvändningen från biogasproduktionen. Denna kurva kommer att användas som "grundlast" för den totala lastkurvan och dessa värden ska inte ändras eftersom de är sanna.



Figur 5: Graf som visar gårdens totala uppskattade last från samtliga elkällor.

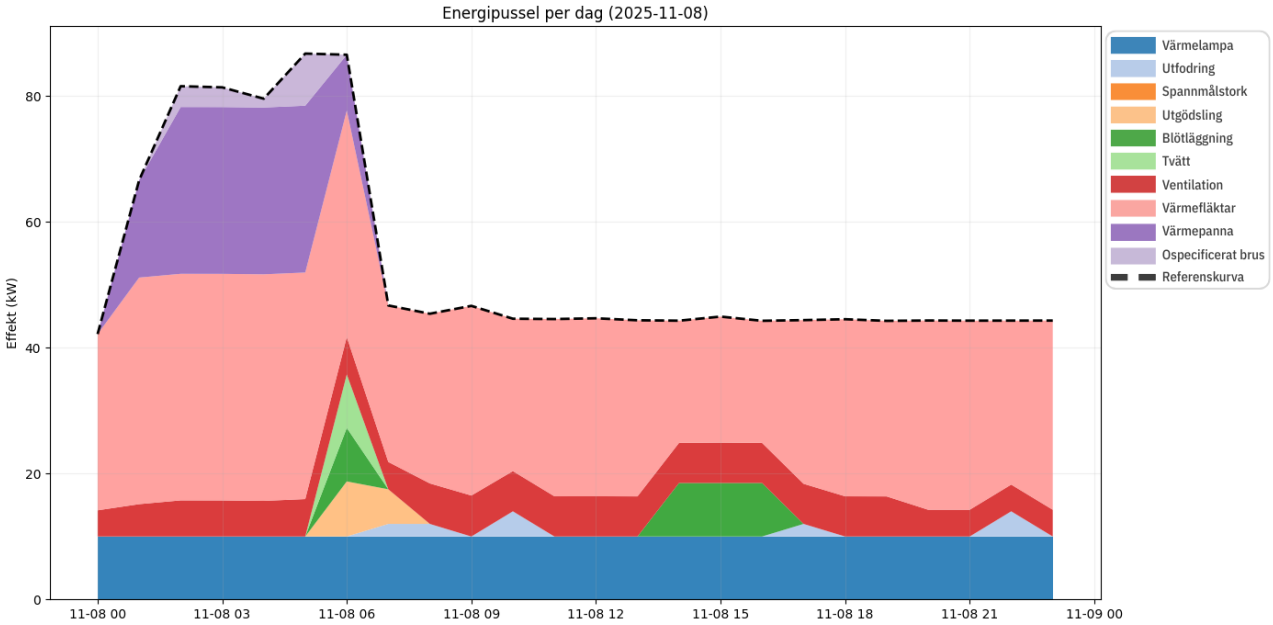
Grafen i figur 5 illustrerar gårdens totala effektanvändning, vilken utgörs av den uppmätta baslasten från växelriktaren (Figur 4) adderat med den uppskattade egenanvändningen av el från biogasproduktionen. Beräkningen av biogasens bidrag har utförts enligt avsnitt 5.3.1. För att fastställa den slutgiltiga lastkurvan har den uppskattade egenanvändningen av biogas genomgått en dynamisk kompression, i enlighet med metodiken i avsnitt 5.3.1. Denna kalibrering säkerställer att modellens värden överensstämmer med anläggningens faktiska totala energianvändning och det maximala effektuttag som angetts av lantbrukaren.

6.3 Modellering av maskindrift

6.3.1 Maskindrift för olika dygn

Nedan presenteras dygnsplottar, så kallade ”energipussel”, för att illustrera resultatet av modellens lastidentifiering och skapade maskindrift. Figurerna visar hur algoritmen iterativt har pusslat in maskinerna under angivna tidsfönster, med hänsyn till regler och beroenden, för att hitta det schema som genererar minst överskott (overflow) jämfört med referenskurvan (den streckade svarta linjen). För att visa hur gårdens lastprofil skiljer sig över året har fyra representativa dagar valts ut: en vinterdag, en sommardag, en vårdag och en höstdag (då spannmålstorken är i drift).

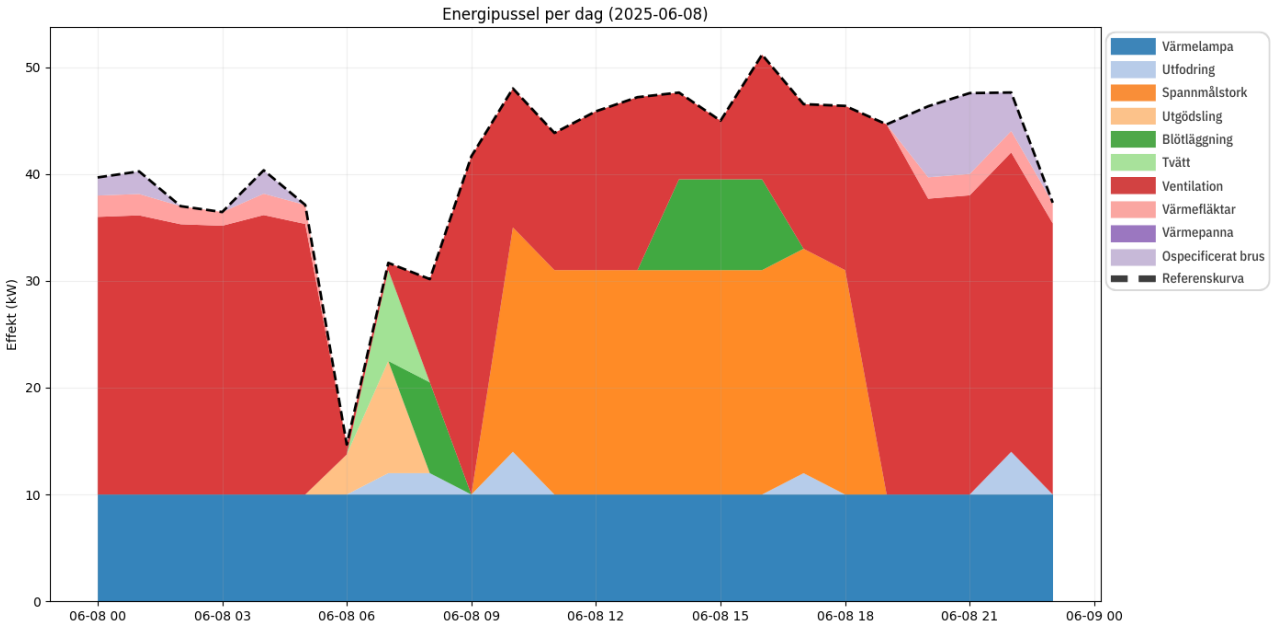
Vinter



Figur 6: Energipussel av maskiner under lastkurvan en vinterdag

Under vintermånaderna utgörs merparten av energibehovet av uppvärmning. I figur 6 syns algoritmens prioriteringsordning. Värmefläktarna (rosa) fyller utrymmet upp till sitt definierade tak på 36 kW. Det kvarvarande gapet upp till referenskurvan fylls därefter av värmepannan (mörklila), vilket syns under natten då energibehovet är större. Ventilationen (röd) är nedskalad till ett minimum. Baslasten utgörs utav Värmelampor, detta är gemensamt för alla månader då värmelamporna alltid är påslagna.

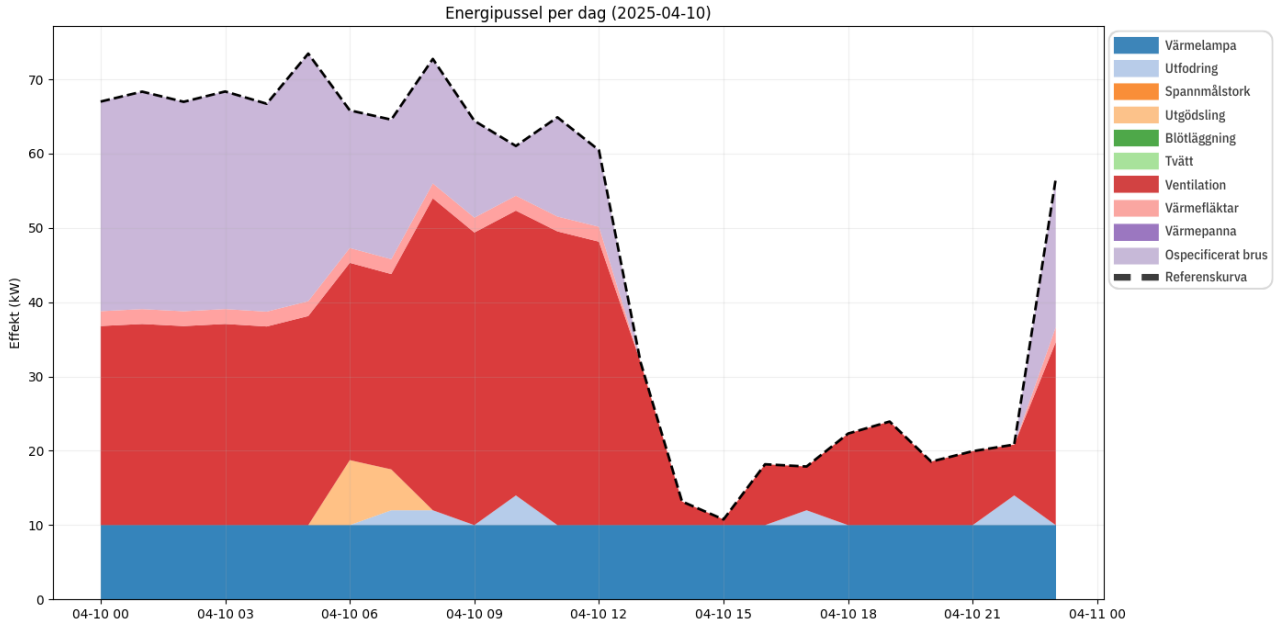
Sommar



Figur 7: Energipussel av maskiner under lastkurvan en sommardag

I figur 7 syns det omvända förhållandet som Värmepanna och Ventilation har. Värmepannan är helt frånkopplad och värmefläktarna (rosa) är strypta till maximalt 2 kW, vilket fungerar som en underhållsdrift och syns på morgon och kväll då det normalt är kallare. Istället dominerar ventilationen (röd) som under sommarveckorna tillåts expandera genom att grundbehovet multipliceras med en faktor på 1,6 av. Detta speglar behovet av kylning i grisstallarna. Vidare kan man se att en av spannmåltorkarna är igång under dagen, motsvarande halvfart på 21 kW.

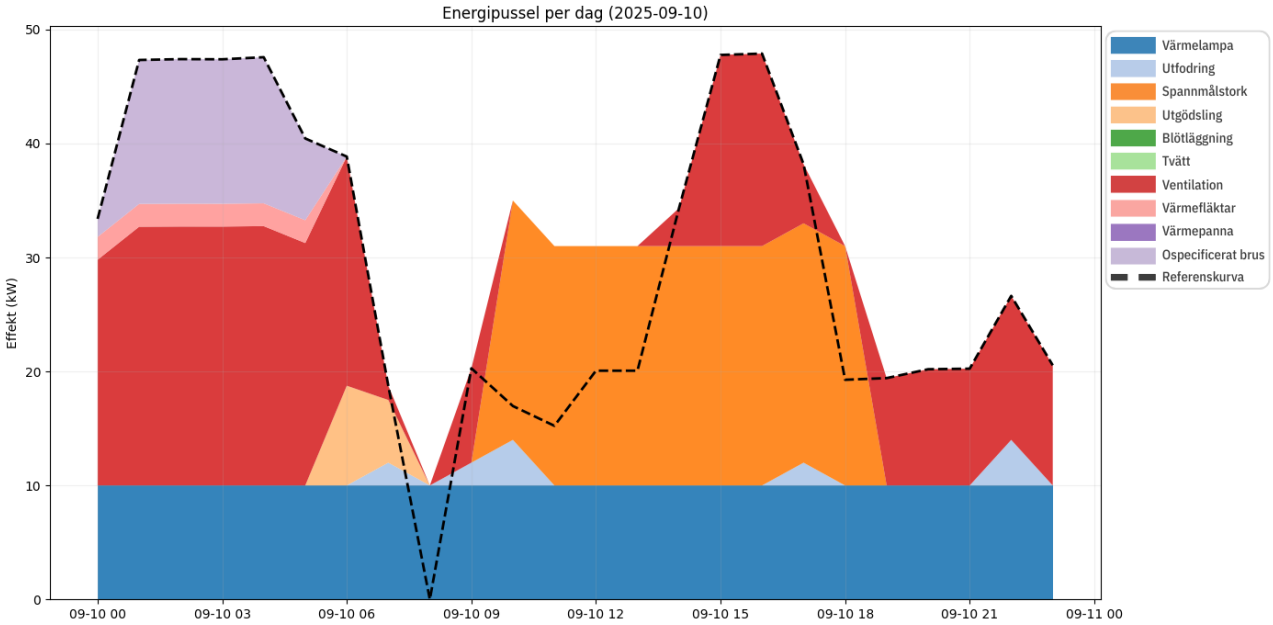
Vår



Figur 8: Energipussel av maskiner under lastkurvan en vårdag

Figur 8 visar ett exempel på en vårdag. Under våren är uppvärmningsbehovet relativt vintern lågt, vilket medför att värmepannan (mörklila) stängs av helt och värmefläktarna (rosa) stryps till en underhållsdrift på maximalt 2 kW. Detta medför, likt under sommarmånaderna, att värmefläktarna oftast är aktiva sent på kvällen, morgonen och tidigt på dagen. Det som skiljer sig mot sommarmånaderna är att ventilationen (röd) är snäppet lägre, detta är reglerat genom att ventilationen multipliceras med grundbehov med en faktor på 1,3. Den vårdag som figuren illustrerar har en stor mängd ospecificerat brus (ljuslila). Detta skapas eftersom algoritmen inte lyckas placera ut maskinernas effekt under de angivna tidsfönsterna och säsongsreglerna för att fylla upp gapet. Detta är resultatet av modellens iterativa metod som väljer maskindriften baserat på den lägsta siffran overflow men begränsat till säsongens regler för driften.

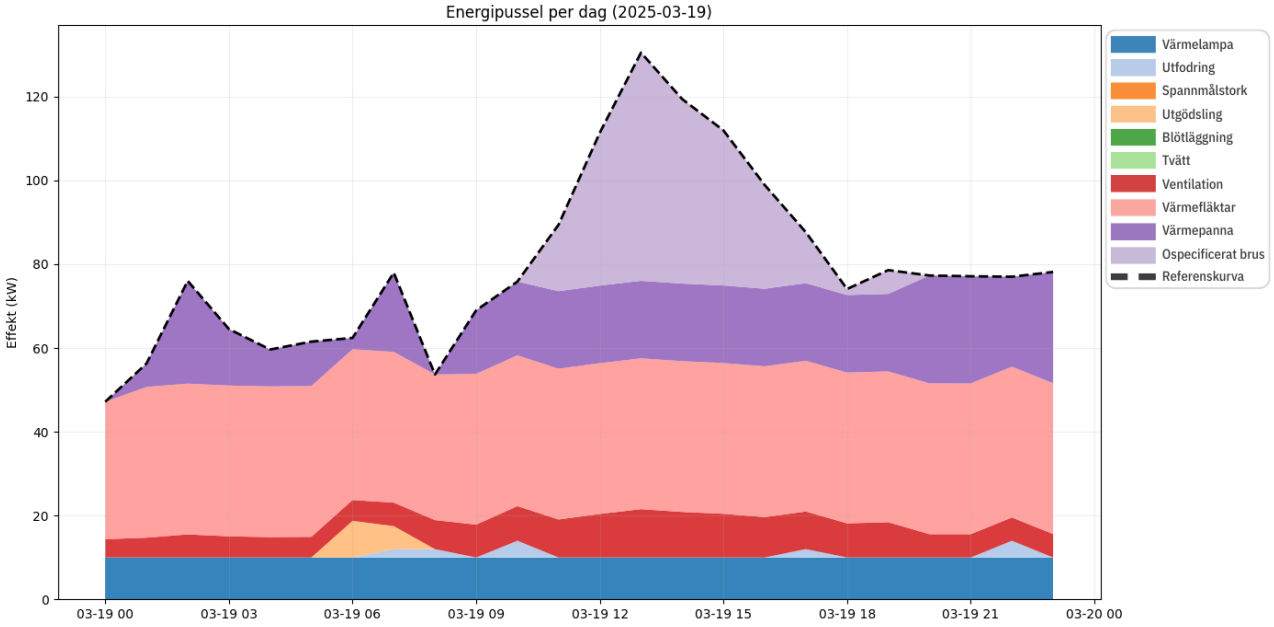
Höst



Figur 9: Energipussel av maskiner under lastkurvan en höstdag

Under hösten har algoritmen samma underliggande logik som under våren. Värmepannan är avstängd, värmefläktar på underhållsdrift och ventilationen uppskalad med en faktor 1,3. Det som utmärker höstgrafen är driften av spannmålstorken (orange) som aktiveras under sitt tillåtna fönster kl 10-18. Denna höstdag infaller under perioden då spannmålstorken får gå på full effekt (två torkar motsvarande 42 kW). Koden använder dock en adaptiv logik som beräknar hur mycket ledigt utrymme som i genomsnitt finns upp till referenskurvan innan den beslutar hur stor effekt som ska allokeras. Eftersom det tillgängliga gapet denna specifika dag var begränsat, bedömde algoritmen att två torkar skulle skapa en orealistiskt stor overflow. Därför syns torken aktiverad med 21 kW (en tork). I figur 9 kan man även se en peak mellan cirka 01 och 04 som fylls upp av ospecifierat brus (ljuslila).

Dagen med maxlasttimmen



Figur 10: Energipussel av maskiner under lastkurvan dagen med maxeffekttoppen

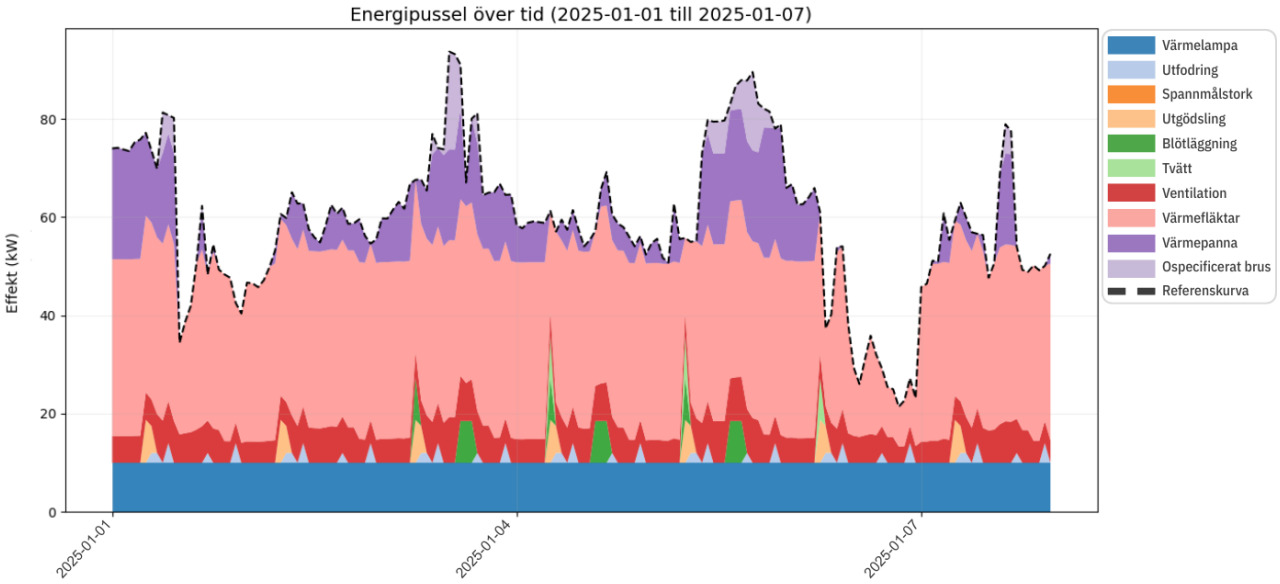
Figur 10 illustrerar den dag under året då lantbruket hade sitt absolut högsta effektuttag, *maxlasttimmen*. Eftersom den 19 mars infaller under modellens definierade vinterperiod, tillämpar algoritmen full uppvärmningslogik. Detta syns tydligt i grafen då värmefläktarna (rosa) kör på en konstant full effekt (36 kW) hela dygnet. Även värmepannan (mörklila) arbetar kontinuerligt för att fylla utrymmet upp till sitt tillåtna maxtak, medan ventilationen (röd) hålls på en låg miniminivå motsvarande 25 % av grundbehovet. Maxeffekt-peaken går upp mot 130 kW vid kl 13 och denna består till stor del av ospecificerat brus (ljuslila). Förklaringen till detta är att effektbehovet under denna timme överstiger den kombinerade maxkapaciteten av lantbrukets kända baslaster, schemalagda maskiner och klimatsystem. Därmed kan inte algoritmen identifiera vilken maskin som står för denna förbrukning.

6.3.2 Maskindrift för olika veckor

Nedan presenteras tre grafer som illustrerar lantbrukets lastkurva och maskindrift över en vecka under sommartid, vintertid samt *veckan med maxlasttimmen*.

Figur 6 och figur 7 visar en vinter- respektive sommarvecka. Man kan genom att studera en längre, sammanhängande period se tydliga skillnader i lantbrukets lastprofil och maskindrift mellan de olika säsongerna. Det som är mest framträdande är skiftet i klimatsystemens dominans, det vill säga mellan Ventilation (röd) och värmebehovet bestående av värmepanna (mörklila) och värmefläktar (rosa). Detta beskriver en verklighetstrogen bild av dynamiken mellan ventilation och värmesystem som beskrivits under intervju och platsbesök hos lantbruket KH Lantbruk AB.

Vintervecka



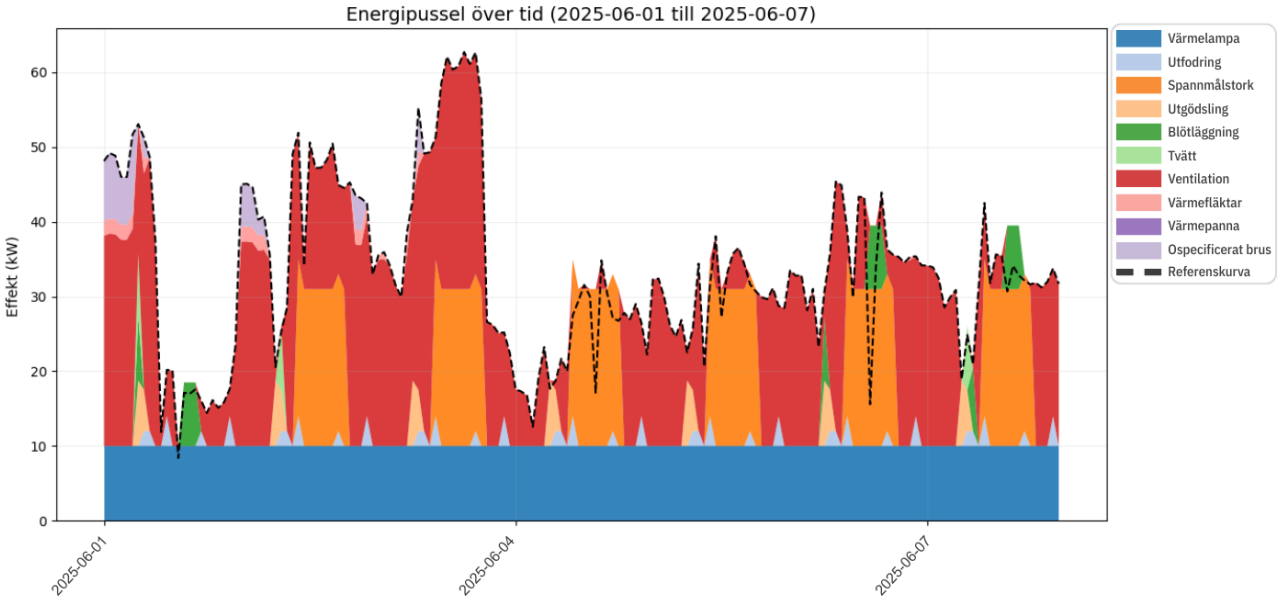
Figur 11: Energipussel av maskiner under lastkurvan en vintervecka

Under vinterveckan (Figur 11) utgörs merparten av energibehovet av uppvärmning. Värmefläktarna (rosa) arbetar upp mot sitt maximerade tak på 36 kW, och vid de kraftigaste effekttopparna aktiveras värmepannan (mörklila) för att täcka restbehovet upp till sitt maxtak. Vid de högsta topparna kan man även se ljuslila, det ospecificerade bruset. Det ospecificerade bruset är aktiverat i större utsträckning under vintersäsongen, något som kan förklaras utav att energibehovet generellt är högre under vintern än under sommaren.

För att få en mer sammanfattad bild av driftsbeteendet har statistik tagits fram över vilken tid på dygnet lantbrukets högsta effektuttag inträffat under samtliga vinterveckor. Under vintersäsongen visar resultaten att dygnets högsta effektopp i de allra flesta fall inträffar under morgonen. Fördelningen av dygnets max-toppar under vintern var följande:

- **Morgon (05:00 - 09:59):** 47.5 % av dagarna
- **Kväll (17:00 - 22:59):** 22.2 % av dagarna
- **Dag (10:00 - 16:59):** 17.9 % av dagarna
- **Natt (23:00 - 04:59):** 12.3 % av dagarna

Sommarvecka



Figur 12: Energipussel av maskiner under lastkurvan en sommarvecka

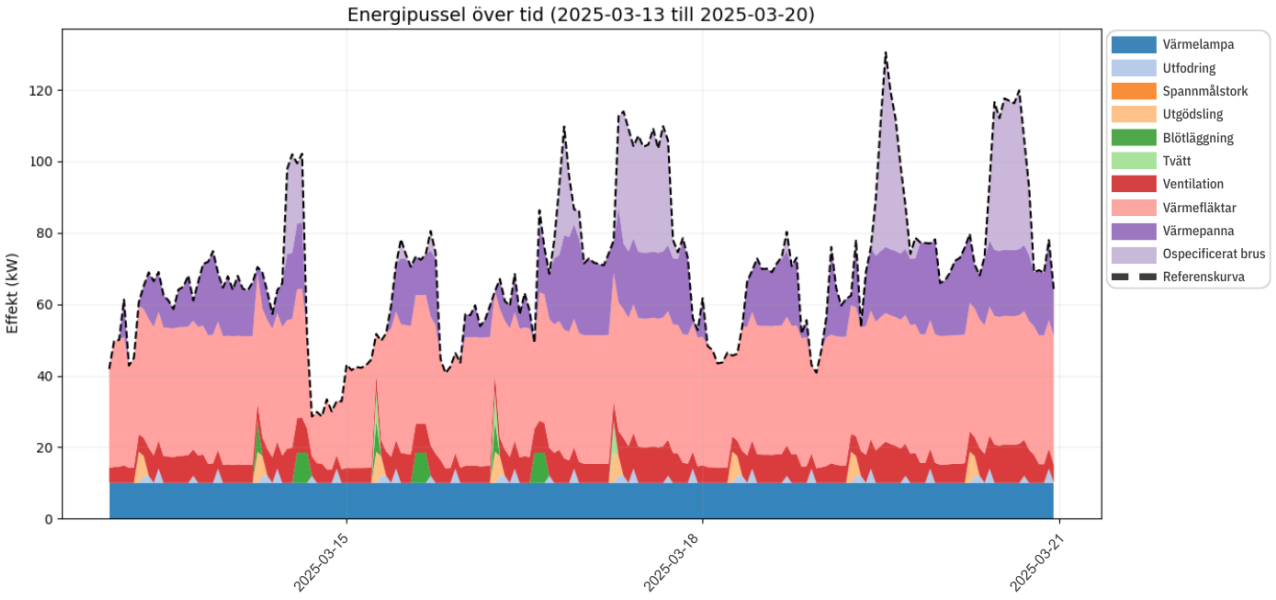
Under sommarveckan (Figur 12) är förhållandet det omvända. Värmepannan (mörklila) är helt inaktiv och värmefläktarna (rosa) är strypta till underhållsdrift. Istället expanderar ventilationen (röd).

För att få en tydligare bild av driftsbeteendet har statistik tagits fram över vilken tid på dygnet lantbrukets högsta effektuttag inträffat under samtliga sommarveckor. Fördelningen av dygnets högsta effekttoppar under sommarveckorna var:

- **Dag (10:00 - 16:59):** 39.3 % av dagarna
- **Kväll (17:00 - 22:59):** 28.6 % av dagarna
- **Morgon (05:00 - 09:59):** 21.4 % av dagarna
- **Natt (23:00 - 04:59):** 10.7 % av dagarna

Resultatet visar på att maxeffekttoppen oftast infaller mitt på dagen (39,3 %), medan nattliga toppar endast utgör 10,7 %.

Veckan med maxlasttimmen



Figur 13: Energipussel av maskiner under lastkurvan veckan där maxeffektoppen ingår

Figur 13 illustrerar veckan med *maxlasttimmen*, (14–21 mars), där årets högsta effekttopp (den 19 mars) ingår. Eftersom mars månad infaller under modellens definierade vinterperiod, uppvisar maskindriften stora likheter med den tidigare analyserade vinterveckan (Figur 11). Säsongens höga uppvärmningsbehov syns tydligt genom att värmefläktarna (rosa) konstant arbetar mot sitt maxtak på 36 kW.

Det som dock särskiljer denna vecka är att energibehovet generellt är högre samt de höga effekttopparna. Detta gör att värmepannan (mörklila) aktiveras och tillåts fylla ett högre gap upp till referenskurvan, samt att det ospecificerade bruset (ljuslila) utgör en betydligt större andel av den totala lasten. Denna ökning av brus förklaras av de återkommande höga effekttopparna.

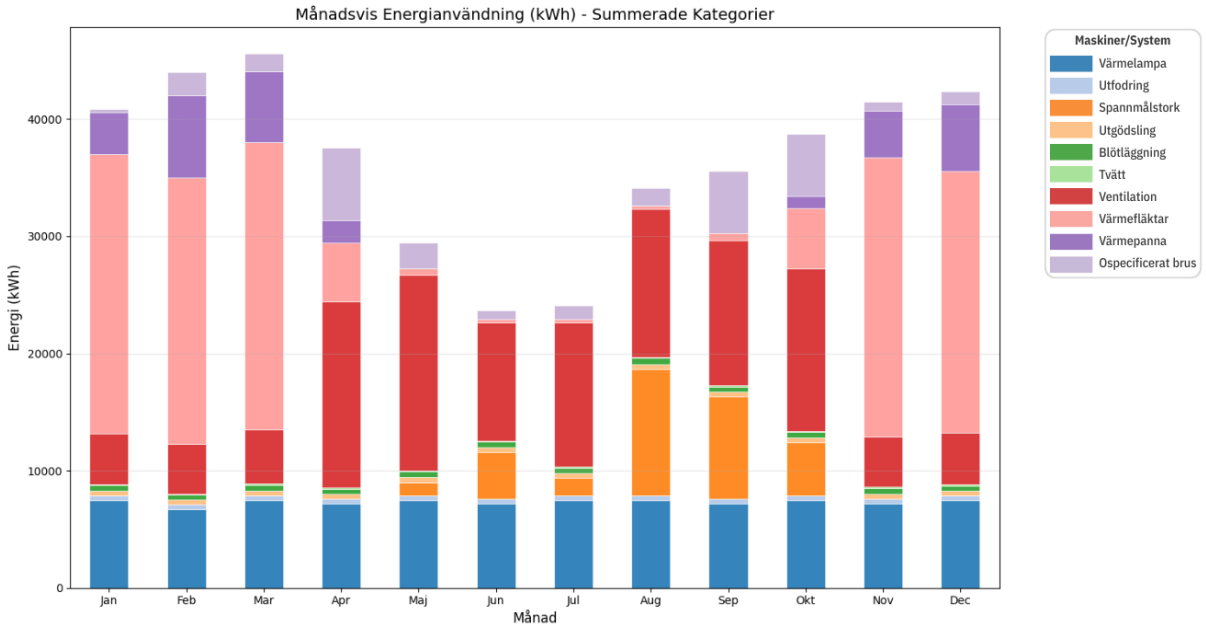
Vidare kan man se en tidsförskjutning av blötläggning (grön) och tvätt (ljusgrön) i jämförelse med figur 6. Detta förklaras av den inbyggda logiken för dessa laster, vilket har utformats utifrån de driftsmönster som framkom under intervju med lantbruket (sammanställt i avsnitt 6.1.1). Logiken innefattar att tvätt är begänsad till lördagar, söndagar och måndagar, med ett sekventiellt beroende som dikterar att blötläggning måste utföras dygnet innan (fredag, lördag, söndag). I figur 6 börjar veckan på en onsdag, därmed dröjer det ett par dagar innan dessa maskiner aktiveras i grafen. *Veckan med maxlasttimmen* (14–21 mars) inleds däremot på en fredag, vilket resulterar i att blötläggning och tvätt pusslas in och blir synliga direkt i början på grafen.

I samtliga figurer kan man även observera att blötläggning och tvätt ibland sammanfaller. Att en avdelning tvättas samtidigt som en annan blötläggs inför morgondagen resulterar i att de två lasterna sammanfaller i lastkurvan. Dessa processer har slagits samman i en gemensam färgkategori för att underlätta visuellt.

Vidare framträder även tydliga, återkommande effekttoppar varje dygn vilka utgörs av utfodring (ljusblå) och utgödsling (ljusorange). Dessa maskiner pusslas in av algoritmen utifrån lasternas definerade tidsfönster samt beroenderegler. Nämnvärt är att utgödslingen i modellen består av tre separata maskiner: två gödselpumpar (3,75 kW respektive 5,0 kW) samt en tryckutgödsling (5,5 kW). Mellan de finns ett beroende som säger att tryckutgödslingen måste aktiveras efter

eller exakt samtidigt som gödselpumparna. Eftersom algoritmens primära syfte är att iterativt pussla maskinerna för att följa referenskurvan och samtidigt minimera overflow, undviker den att schemalägga dessa maskiner samtidigt. Istället sprids starterna ut sekventiellt efter varandra, vilket gör att man i figurerna ser en momentan belastning på mellan 3,75 och 5,5 kW per timma samt sammanhängande effektoppar.

6.3.3 Lastfördelning över året



Figur 14: Lastfördelning per månad för året 2025

Figur 14 visar lastfördelningen per månad för år 2025. I figuren framträder en tydlig säsongsvariation som väl korrelerar med algoritmens funktion och de specifika dygns- och veckoprofiler som analyserats tidigare i rapporten.

I nedanstående uppställning presenteras algoritmens simulerade lastfördelning i jämförelse med branschspecifika nyckeltal från handboken "Handbok om energieffektivisering" även beskriven i avsnitt 3.4:

- **Utfodring:** Modell 8,2 % vs Handboken 4 % (Utfodring el)
- **Ventilation:** Modell 26,7 % vs Handboken 54 % (Ventilation)
- **Utgödsling:** Modell 1,2 % vs Handboken 1 % (Utgödsling el)
- **Uppvärmning (Värme/Lampor):** Modell 56,8 % vs Handboken 36 % (Uppvärmning el)
- **Övrigt:** Modell 8,0 % (Tvätt 1,5 % + Brus 6,5 %) vs Handboken 6 % (Övrigt el 2 % + Belysning 4 %)

Nyckeltalen presenterade i handboken "Handbok om energieffektivisering" (beskriven i avsnitt 3.2.4) är ett sammanställt resultat från 25 energikartläggningar hos företag med integrerade system (kombinerad smågris- och slaktsvinsproduktion). Det är dock viktigt att poängtera att dessa värden utgör ett generellt branschgenomsnitt. Den faktiska lastfördelningen varierar naturligt från gård till gård beroende på anläggningens specifika förutsättningar. Referensgården

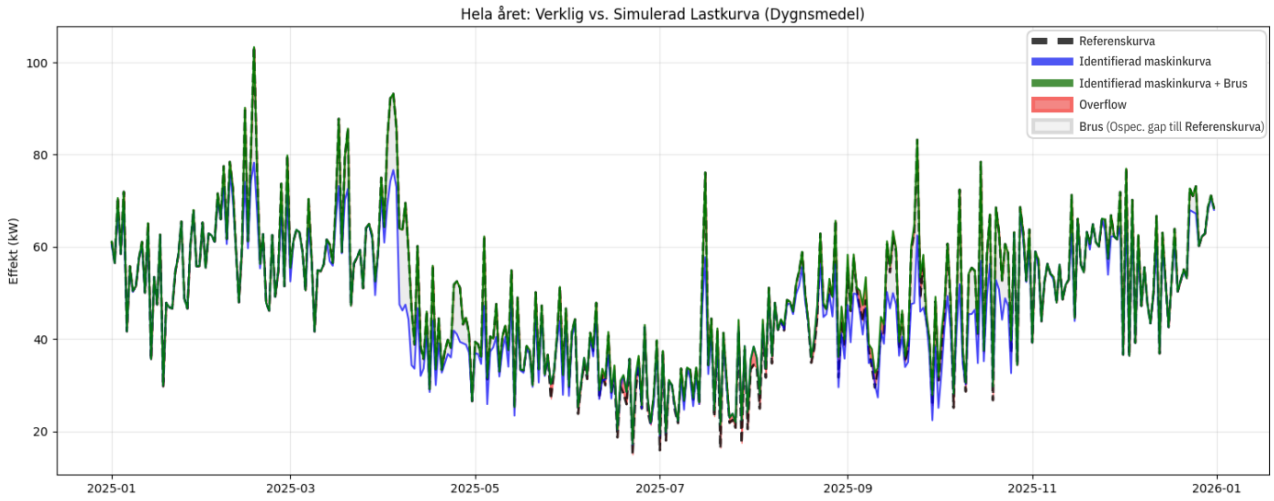
som studien utgått ifrån för att bygga modellen bedriver smågrisproduktion, därmed är ett högre värmebehov förväntat.

- Den verkliga förbrukningen (referenskurvan) uppgick till totalt 433 190 kWh år 2025.
- Den simulerade lastkurvan (maskinkurva inklusive brus) uppgick till totalt 437 542 kWh år 2025.

Detta innebär att skillnaden mellan modellens resultat har en avvikelse på cirka 1 %.

6.3.4 Maskindriften träffsäkerhet

Simulering av lastkurvan över året med overflow, brus och referens-lastkurvan



Figur 15: Simulering av lastkurvor för året 2025

För att utvärdera modellens förmåga att återskapa gårdens verkliga energibehov presenteras i Figur 15 en jämförelse mellan den uppmätta lastkurvan (referenskurvan) och den simulerade maskinkurvan över hela året. Grafen illustrerar en stark följsamhet mellan referenskurvan (streckad linje) och den identifierade maskinkurvan inklusive brus (grön linje) som är lastkurvan som algoritmen tagit fram.

Under de timmar där referenskurvan översteg den identifierade maskinlasten, utgjordes differensen av ospecificerat brus. I figuren illustreras detta av de vita fälten mellan den blå och den gröna linjen. Vid dessa tillfällen matchar den gröna linjen referenskurvan exakt.

Vid de tidpunkter då den schemalagda maskinlasten i stället översteg referenskurvan, bestod den totala lasten uteslutande av maskinernas effektbehov. Resultatet visar att den simulerade lastkurvan vid dessa tillfällen frångår referenskurvan, vilket innebär att systemet genererar ett simulerat effektöverskott (så kallat overflow). Detta överskridande visualiseras av de rosa fälten i figuren.

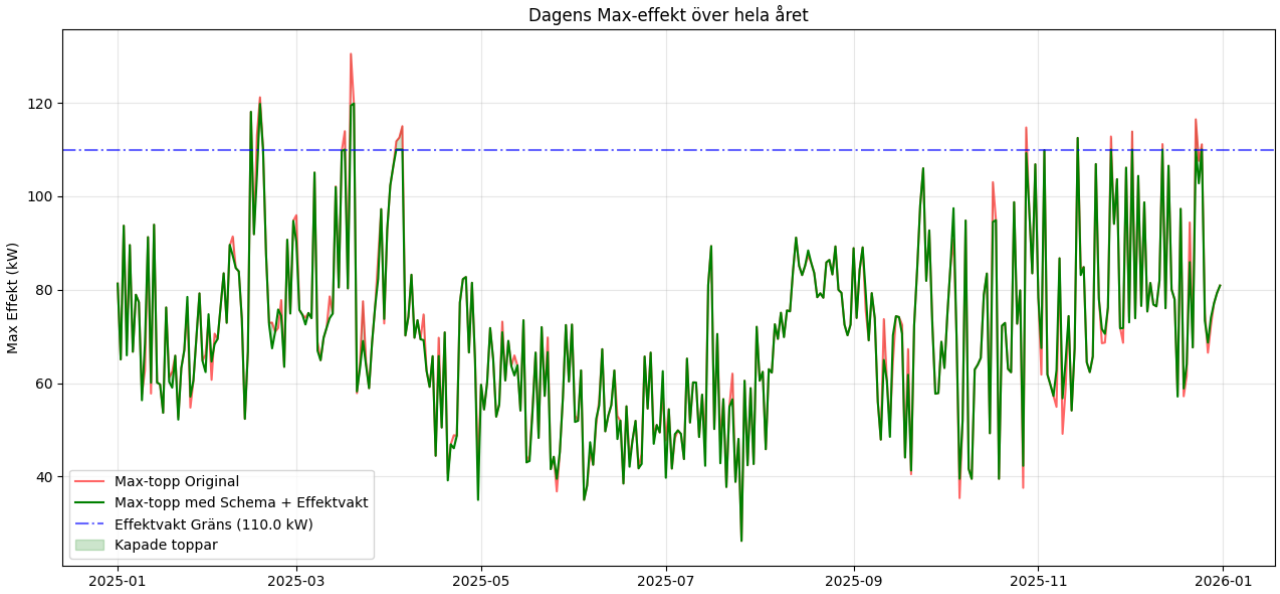
Man kan även tydligt se säsongsvariationer, att energibehovet är högre under vintertid och dalar under sommarmånaderna.

Modellens träffsäkerhet utvärderad utifrån ekvationer beskrivet i avsnitt 5.4.4:

- Träffsäkerhet identifierad maskinkurva (exklusive brus): 94,5 %
- Träffsäkerhet total lastkurva (inklusive brus): 101,0 %
- Total overflow: 4 352 kWh

Modellen uppnår en total träffsäkerhet på 101,0 % för den slutgiltiga lastkurvan, där den överkjutande procenten är utgörs utav overflow motsvarande 4 352 kWh.

6.3.5 Optimerad lastkurva och maskindrift



Figur 16: Simulering av identifierad lastkurvan jämfört med den optimerade för året 2025

Figur 16 illustrerar lastkurvornas effekttoppar före och efter optimering, där optimeringen innefattade en kombination av justerade tidsfönster för flexibla maskiner och en effektvakt. Effektvakten definerades med en gräns på 110,0 kW och en komfortspärr för frånkoppling av värmepannan på maximalt två timmar.

Resultatet av optimeringen gav en kapning av den maximala effekttoppen på cirka 8% som beräknats med ekvationerna i avsnitt 5.4.4. Detta baseras på följande data:

- Gårdens ursprungliga maxeffekt: 130,5 kW
- Ny maxeffekt efter optimering: 119,9 kW
- Maxtoppens effektreduktion: 10,6 kW

6.4 Ödriftssimulering och optimerad dimensionering

För att ta reda på hur lantbruket bör dimensionera sitt batteri och reservaggregatet så görs två olika worst-case simuleringar. Båda simuleringarna innehåller exakt sju dagar (168 h). Den första simuleringen utgår från det scenario som kallas för *veckan med maxlasttimmen*, i vilken den absoluta effekttoppen på hela året ingår. Den veckan börjar på samma timme som den högsta toppen inträffar 2025-03-20 kl. 16:00 och sedan simuleras det 168 timmar framåt.

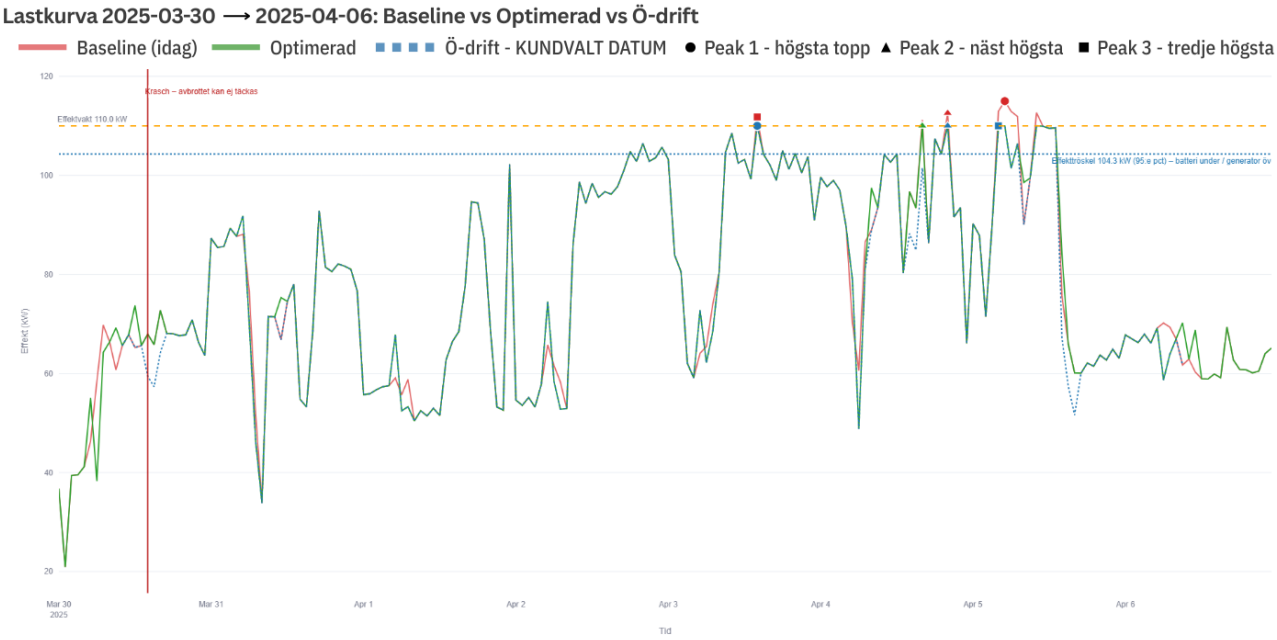
Den andra simuleringen är också en typ av worst-case, men denna vecka är bestämd utifrån vilka sju sammanhängande dagar som genererar den absolut högsta energiförbrukningen tillsammans. Detta har alltså inte någon enskilt stor peak - utan är istället svår att hantera för att det generellt sett är högt effektbehov hela veckan och kommer att kallas för den *tuffaste veckan*. Denna vecka är framräknad till att börja 2023-03-30 kl 10:00 och 168 timmar framåt.

I båda dessa simuleringar håller samtliga parametrar värdet från grundinställningarna beskrivna i avsnitt 5.4.6.3.

6.4.0.1 Scenario A: Inget batteri eller reservaggregat

De första simuleringarna för respektive fall (*tuffaste veckan* och *veckan med maxlasttimmen*) är utan batteri eller reservkraft. Detta för att se om något av fallen klarar någon/några timmar utan någon extra kraft samt för att få fram det optimerade dimensioneringsförslaget för ett hybridsystem.

Resultat för den tuffaste veckan



Figur 17: Visualisering av den högst belastade veckan på året för respektive lastkurva över det kundvalda datumet (baseline, optimerad baseline och ö-drift)

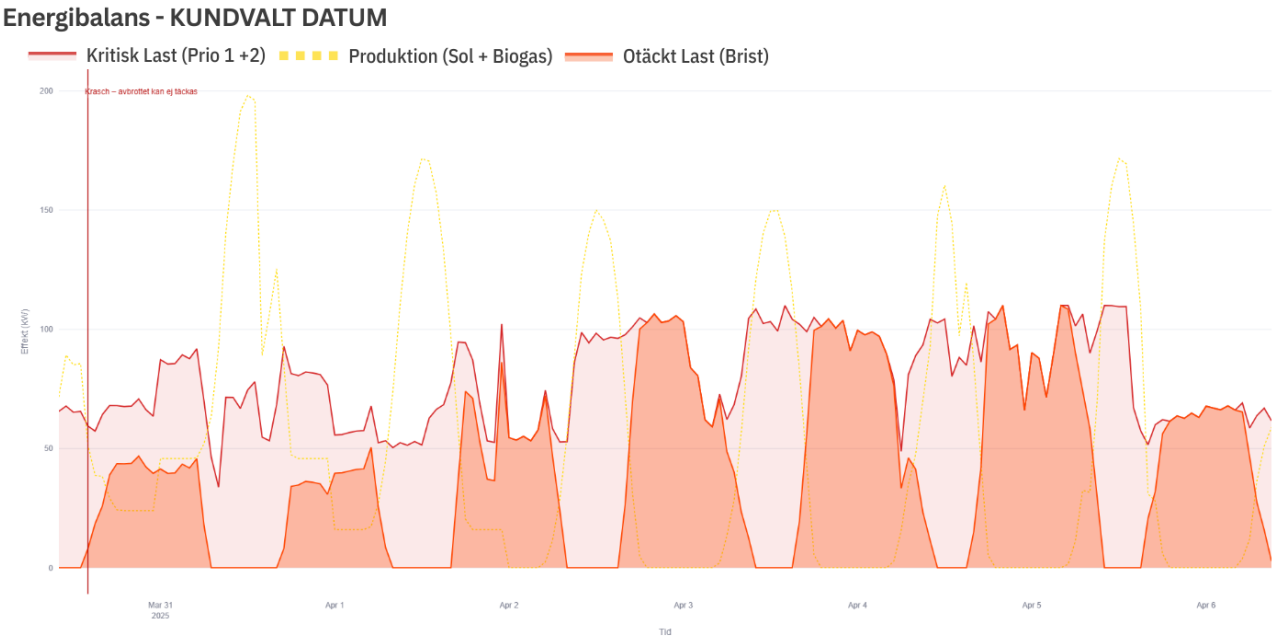
I simuleringen för den *tuffaste veckan* anger systemet att den klarar av att hantera ö-drift i 4h innan det kraschar. Figur 17 visar även att peaken för baseline sker 5 april 05:00 och uppnår ett värde av 115 kW medan peaken för den optimerade och ödrifts-kurvan sker 3 april 14:00 och uppgår till 110 kW. Utöver det visar figuren att effektuttaget sjunker drastiskt efter 5 april kl. 13:00 för samtliga kurvor. Det går även att utläsa skillnader i driften mellan de olika lastkurvorna, vilket betyder att de olika driftscenarierna för respektive lastkurva under denna tidsperiod kommer att ha ett genomslag för den totala effektanvändningen och den dagliga driften.

Den största effektsänkningen sker 5 april och är på 5 kW. Totalt är energibesparingen mellan baseline och ö-drift 144 kWh där bortkopplingen av prio 3-laster är den åtgärd som bidrar till den största procentuella sänkningen av effektförbrukning mellan de olika fallen.

Resultaten från simuleringen med den högst belastad veckan, utan batteri eller reservkraft, angav följande som optimerat hybriddimensioneringsförslag:

- Batteriets optimerade dimensionering bör vara 104.3 kW / 208.6 kWh
- Dieselaggregatets optimerade dimensionering bör vara 110 kW / 137.5 kVA

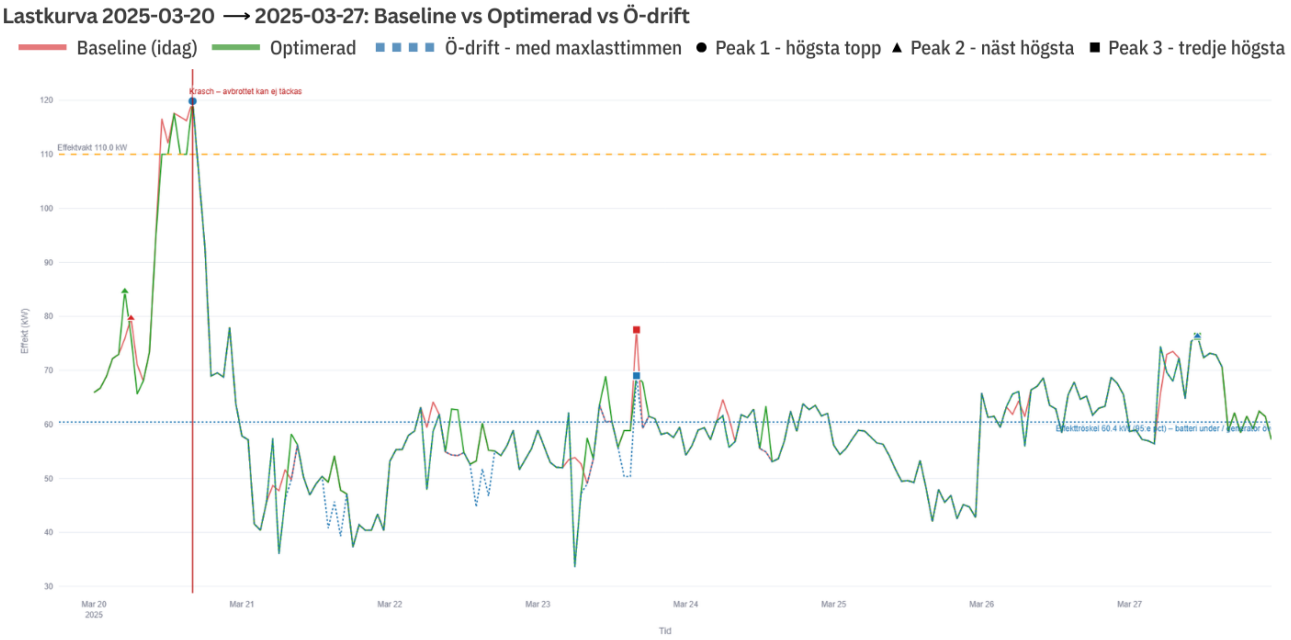
Simuleringen beräknade enligt en percentil på 0.95 vilket för denna vecka innebar att effekttröskeln hamnade på 104.3 kW. Den totala mängden outnyttjad energi från clipping, det vill säga solenergi som inte används men som produceras, blev totalt 2447.5 kWh.



Figur 18: Visualisering av energibalansen och effektbristen för den högst belastade veckan på året framtagen för den optimerade lasten och ödriftslasten (kritisk last) över de kundvalda datumen

I figur 18 så visualiseras själva hanteringen av ö-driften. Här går det att utläsa vilka energikällor som finns att tillgå och hur de samspelar med varandra. Eftersom att detta är ö-drift utan batteri eller reservaggregat består det endast av egenproducerad el från sol och biogas. Den egenproducerade elen är anledningen till att systemet initalt klarar av 4h innan det kraschar. Därefter uppstår den första effektbristen (otäckt last) vilket visualiseras med det mörkröda området. Den första effektbristen kommer att vara mellan 30 mars 14:00 och 31 mars 07:00. Ploten visualiserar alla eventuella timmar som en brist skulle uppstått under avbrottstiden trots att första kraschen som omöjliggör drift uppstår redan efter 4h. Detta för att användaren ska kunna se hur svårhanterat eller eventuellt hur nära scenariot var att faktiskt fungera med angivna parametrar.

Resultat för veckan som inkluderar *maxlasttimmen*



Figur 19: Visualisering av *veckan med maxlasttimmen* för respektive lastkurva (baseline, optimerad baseline och ö-drift)

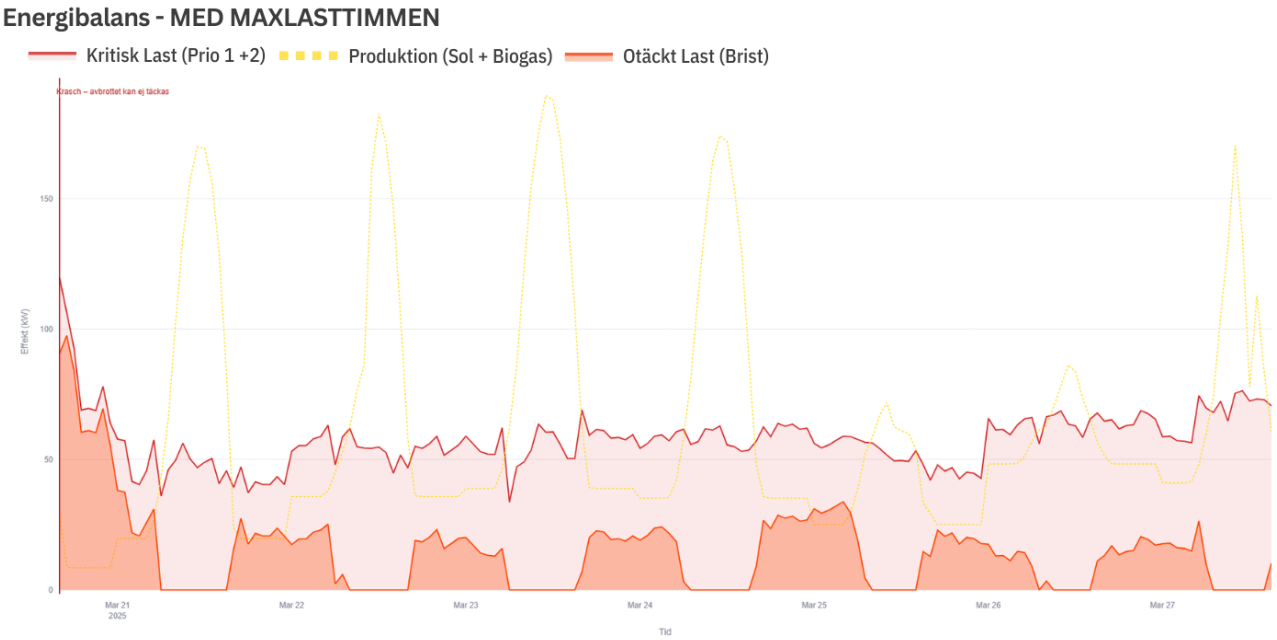
I simuleringen för *veckan med maxlasttimmen* anger systemet att den inte klarar av att hantera ö-driften för någon timme alls. Anledningen till att den röda markeringen inte ser ut att inträffa för den första timmen är för att figuren visar hela dygnet trots att ödriften simuleras från kl 16:00. Figur 19 visar även att peaken för baseline, optimerade lastkurvan och ö-driftkurvan alla sker 20 april kl 16:00, vilket är rimligt givet att detta är den högsta effekttoppen för hela året. Den uppgår till ett värde av 119.9 kW medan den näst största peaken över samma avbrottstid är på 84.6 kW (för den optimerade kurvan). På grund av den stora skillnaden mellan maxvärdet och de övriga "höga" effekttopparna så landar effekttröskeln på 60.4 kW, vilket är lågt i jämförelse med vad figur 17 uppvisar med den motsvarande effekttröskeln på 104.3 kW. Detta är på grund av hur percentilgränsen beräknas vilket förklaras närmre i avsnitt 5.4.5.2.3.

Den största effektsänkningen kommer inte att synas för de absoluta maxvärdena (peak 1), utan den syns i den effektsänkning som sker för lastkurvornas peak 2 respektive peak 3. Den optimerade lastkurvans peak 2 uppgår till 84.6 kW medan ö-driftens peak 2 är på 76.3 kW och innebär en effekt-toppsänkning på 8,3 kW. Totalt är energibesparingen mellan baseline och ö-drift 128 kWh, där bortkopplingen av prio 3-laster, är den åtgärd som bidrar till den största procentuella sänkningen av effektförbrukning mellan de olika fallen. Vidare går det även att utläsa att optimeringen från baseline och bortkoppling av prio 3-laster i ö-driftskurvan alla har lett till skillnader i driftsmönster över avbrottstiden.

Resultaten från simuleringen av *veckan med maxlasttimmen*, utan batteri eller reservkraft, angav följande:

- Batteriets optimerade dimensionering bör vara 70 kW / 140 kWh
- Dieselaggregatets optimerade dimensionering bör vara 98.5 kW / 123.1 kVA

Precis som nämnt ovan är effekttröskeln på 60.4 kW i detta fall med en percentiltröskel på 0.95. Den energimängd som förblir helt outnyttjad från clipping uppgår till 3350.6 kWh i detta scenario.



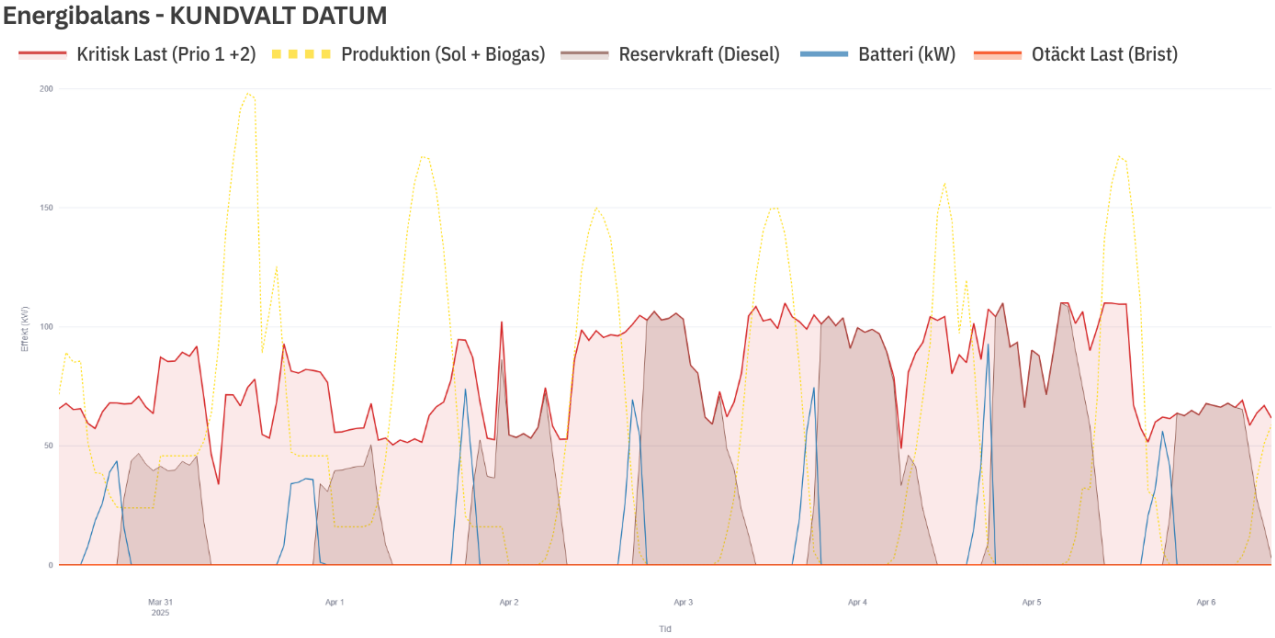
Figur 20: Visualisering av energibalansen och effektbristen för *veckan med maxlasttimmen*, framtagen för den optimerade lasten och för ö-driftslasten (kritisk last)

I figur 20 går det att se hur väl ödriften hanteras i scenariet för *veckan med maxlasttimmen*. Som konstaterat kan inte detta scenarie hantera ö-drift någon timme alls och den initala effektbristen för den första timmen är på 90 kW med efterföljande timmes effektbrist på 97 kW. Detta indikerar att systemet är kraftigt underdimensionerat. Dessutom visar grafen att effektbrist kommer att uppstå för varje dygn i detta dimensioneringsfall.

6.4.0.2 Scenario B: Med optimerad storlek för batteri och reservkraft

Scenario B simulerar samma veckor tillsammans med den optimerade storleken för batteriet och reservkraften för respektive fall - för att se hur ö-driften hanteras.

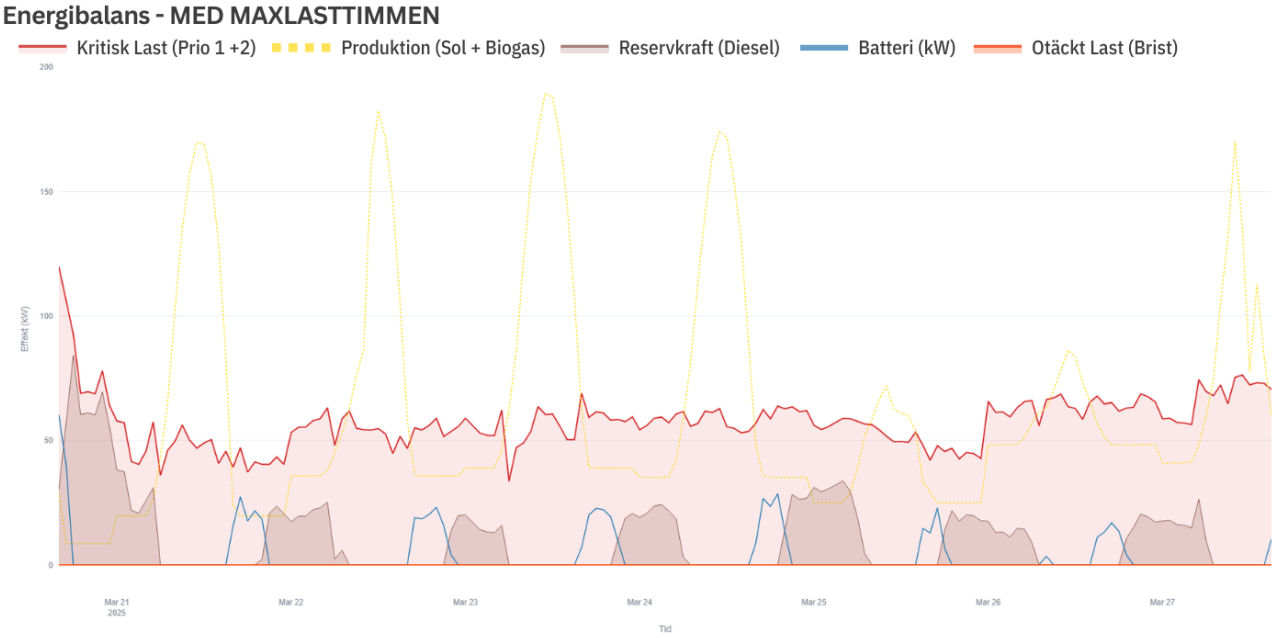
Resultat för den tuffaste veckan



Figur 21: Visualisering av energibalansen och effektbristen för den vecka som definieras som den tuffaste veckan, framtagen för ö-driftslasten (kritisk last) samtidigt som den optimerade batteri- och reservaggregatsstorleken implementerats.

I figur 21 täcks hela den kritiska lasten enligt percentilmetoden med de angivna optimerade dimensioneringsvärdena för batteriet och reservkraften. Den totala dieselanvändningen uppgår till 1 778,7 liter vilket motsvarar 5928.9 kWh i energi. Mängden outnyttjad solenergi från clipping uppgår till 1 346,9 kWh i detta simuleringsfall, vilket är en minskning med nästan 45 % och samtidigt betyder att den egenproducerande elen används mycket mer effektivt. Vidare går det att utläsa att reservaggregatet åtminstonde under 12h av det 168h långa avbrottet använder minst 90 % av sin dimensionerade maxkapacitet. Det uppgår aldrig till 100 %, vilket hör till sakens natur, eftersom att reservaggregatet alltid dimensioneras med en säkerhetsmarginal uppåt enligt beskrivningen i avsnitt 5.4.5.2. Batteriet kommer att utnyttja 89 % av sin maxkapacitet vid ett tillfälle. Varför batteriet aldrig når sin maxkapacitet är för att effekttröskeln (som styr batteristorleken utifrån vad som anses vara baslast) angav 104.3 kW som gränsvärde - men max-urladdningen för batteriet blir bara 92.9 kW då batteriets maxeffekt som den kan leverera begränsas av hur mycket batteriet tillåts laddas ur (min-SOC) vilket är beskrivet i avsnitt 5.4.5.1.

Resultat för veckan som inkluderar *maxlasttimmen*



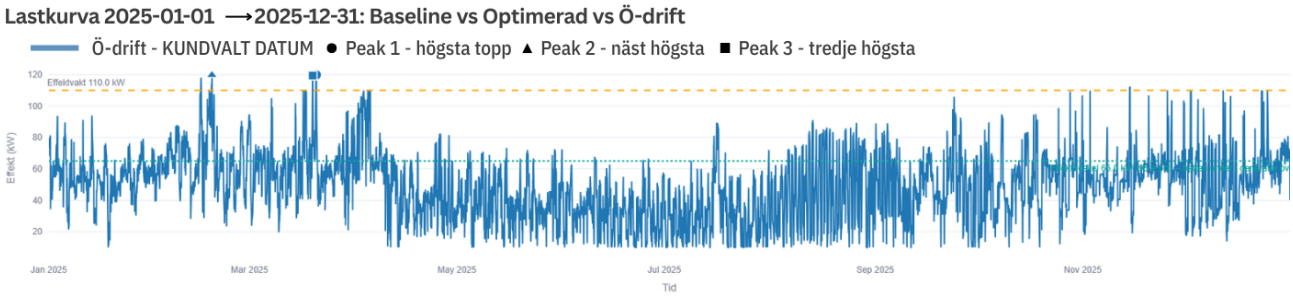
Figur 22: Visualisering av energibalansen och effektbristen för *veckan med maxlasttimmen*, framtagen för den optimerade lasten och för ö-driftslasten (kritisk last) samtidigt som den optimerade batteri- och reservaggregatsstorleken implementeras

I figur 22 så kan man utläsa att hela avbrottet går att hantera med de optimerade parametrarna. Totalt har 562,5 liter diesel använts vilket motsvarar 1 875,1 kWh i energi. Outnyttjad solenergi uppgår till 2 586,2 kWh från clipping och betyder att detta sänkts med nästan 23 %. Värt att notera är att reservkraftens högsta utnyttjandegrad är på 85 % och att detta endast inträffar en gång. Varför reservaggregatets topplast inte sker vid timme 1 i figur 22 är för att detta inte är den högsta netto-effekttoppen eftersom att batteriet tar en betydande mängd vid den timmen. Den högsta nettoeffekttoppen uppstår istället kl. 18:00 då batteriet har laddats ur och det inte finns någon egenproducerad el att tillgå. Efter det första dygnet med effektbrist belastas dieselgeneratorn runt 20 - 25 % av sin fulla kapacitet vid de tillfällen den behöver användas. Batteriet använder runt 85 % av rated vid det tillfälle då det belastas som mest. Anledningen till att batteriet inte kan använda 100 % av rated är delvis på grund av att min-SOC begränsar den - men också för att C-rate kommer att spela roll för hur dimensioneringen blir enligt avsnitt 5.4.5.2.4. Även den initala laddningsgradens SOC spelar roll i detta fall, närmre beskrivet i avsnitt 5.4.5.1

6.4.0.3 Scenario C: Optimerade hybriddimensioneringens förmåga till ö-drift hela året

Scenario C ämnar till att testa de två olika hybriddimensioneringarna föreslagna för den *tuffaste veckan* och *veckan med maxlasttimmen* över hela året. Syftet med detta är att se hur väl systemet kan eller inte kan hantera driften samt att få en uppfattning om hybriddimensioneringen är under- eller överdimensionerad. Detta är ett förberedande scenario för att sedan kunna gå vidare och testa lantbrukets förmåga att även kunna täcka lastbehovet för en trygghetspunkt under samma år.

Resultat för den tuffaste veckan



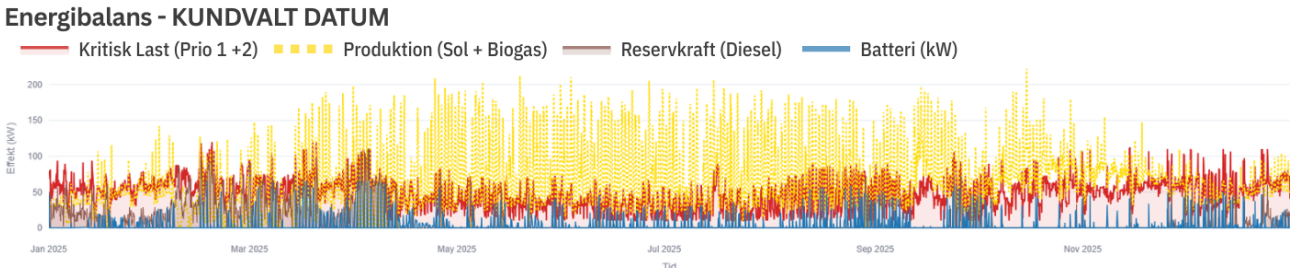
Figur 23: Graf över ö-driftens lastkurva för hela året - tillsammans med effekttröskeln och peakar.

Det sker inget avbrott över året med denna dimensionering, som visas i figur 23. Dock är inte hybriddimensioneringen som valdes utifrån den tuffaste veckan längre det optimala förslaget. Istället fås förslaget om att implementera ett batteri som är fyra gånger så stort. Det har att göra med vad som definieras som "optimalt" och beror på att algoritmen vill minimera dieselanvändningen. Definitonen av percentiltröskeln vid 0.95 blir 65 kW för årssimuleringen.

Följande parametrar anses vara optimala för att driva ö-driften i ett år:

- Batteristorleken bör vara 522,3 kW / 1044,6 kWh
- Generatorstorleken blir densamma på 110 kW / 137,5 kVA

Den totala dieselanvändningen för att driva ö-driften med denna dimensionering är 21 785 liter motsvarande 72 616 kWh. Den outnyttjade solproduktionen är på 158 538 kWh över året.



Figur 24: Ö-driftens effektbalans och utnyttjande av olika energikällor för att täcka den kritiska lasten. I grafen syns båda dieselaggregatet, batteriet och den egenproducerade elens utnyttjande samt den kritiska lasten

I figur 24 blir det tydligt var ifrån den enorma mängden outnyttjad solproduktion kommer ifrån. Egenproducerade elen från sol och biogas blir mycket högre än den kritiska lasten för sommartimmarna.

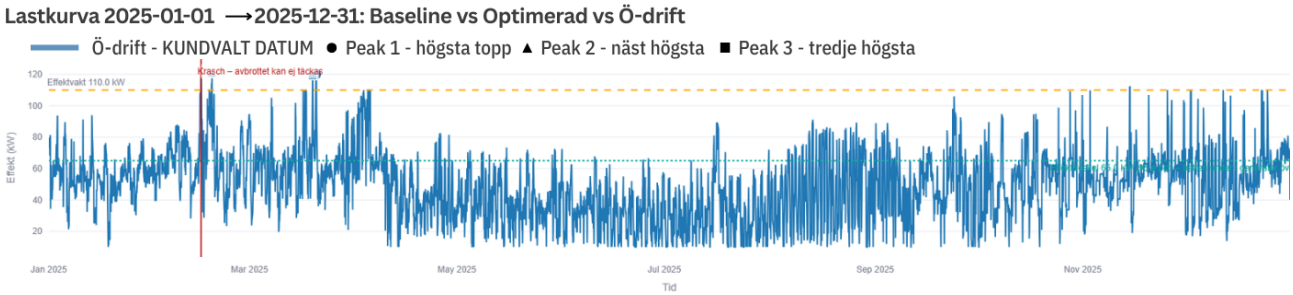


Figur 25: Ö-driftens effektbalans och utnyttjande av dieselaggregat och batteri över året.

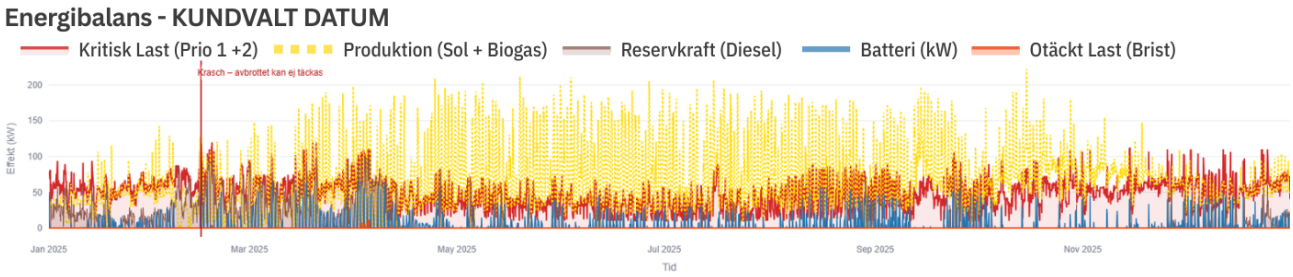
Figur 25 visar i princip samma sak som figur 24 men utan den egenproducerade elen från sol + biogas och utan den kritiska lasten utmarkerad. Syftet är att kunna visa mer detaljerat hur dieselaggregatet och batteriet körs över året. Det finns en tydlig nedgång av reservaggregatets utnyttjande under sommartid - vilket är på grund av att framförallt solen genererar mycket mer el. Batteriets förhållandevis låga tillskott av el över året har dels att göra med en ökad produktion från solen, men det är även på grund av att batteriet är för litet för att kunna bidra mer. Det i sig är orsaken till att dieselaggregatet behöver köras ibland även sommartid och förbrukar ca 21785 liter över året.

Resultat för *veckan med maxlasttimmen*

Med hybriddimensioneringen föreslagen för *veckan med maxlasttimmen* kommer inte lantbruket att klara av ö-drift under hela året. Efter 1075 timmar, 2025-02-17 kl 19:00, uppstår en effektbrist som inte går att hantera. Detta kan observeras i figur 26. Förslaget för att klara hela året är de parametrar som nämns i stycket ovanför, eftersom det är samma avbrottstid som simuleras. Totalt använder detta system 23506.3 liter diesel och kastar bort 165238.7 kWh via clipping.

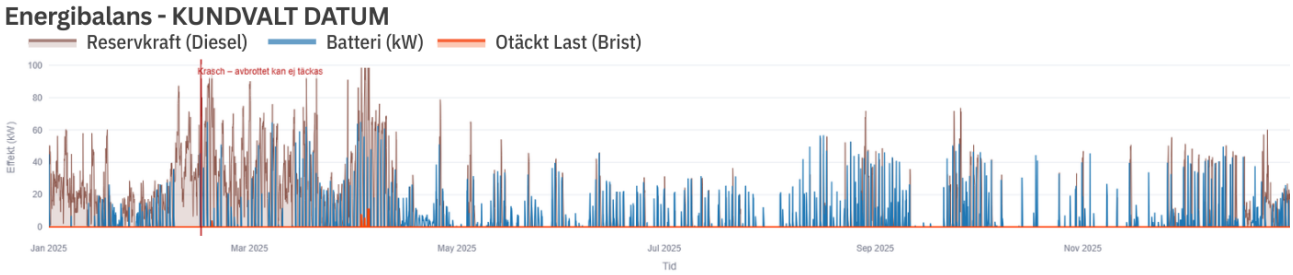


Figur 26: Graf över ö-driftens lastkurva för hela året - tillsammans med effekttröskeln och peakar samt markering vid krasch av systemet



Figur 27: Ö-driftens effektbalans och utnyttjande av olika energikällor för att täcka den kritiska lasten. I grafen syns både dieselaggregatet, batteriet och den egenproducerade elens utnyttjande, den kritiska lasten samt den otäckta lasten (effektbristen som ger upphov till avbrott)

I figur 27 visualiseras hela året med ö-driftslasten tillsammans med de elproducenter som täcker lasten. Precis som i figur 24 går det att se att den egenproducerande elen från sol och biogas är högre än den kritiska lasten under sommaren och detta försvinner vid clipping.



Figur 28: Ö-driftens effektbalans och utnyttjande av dieselaggregat och batteri över året tillsammans med den otäckta lasten

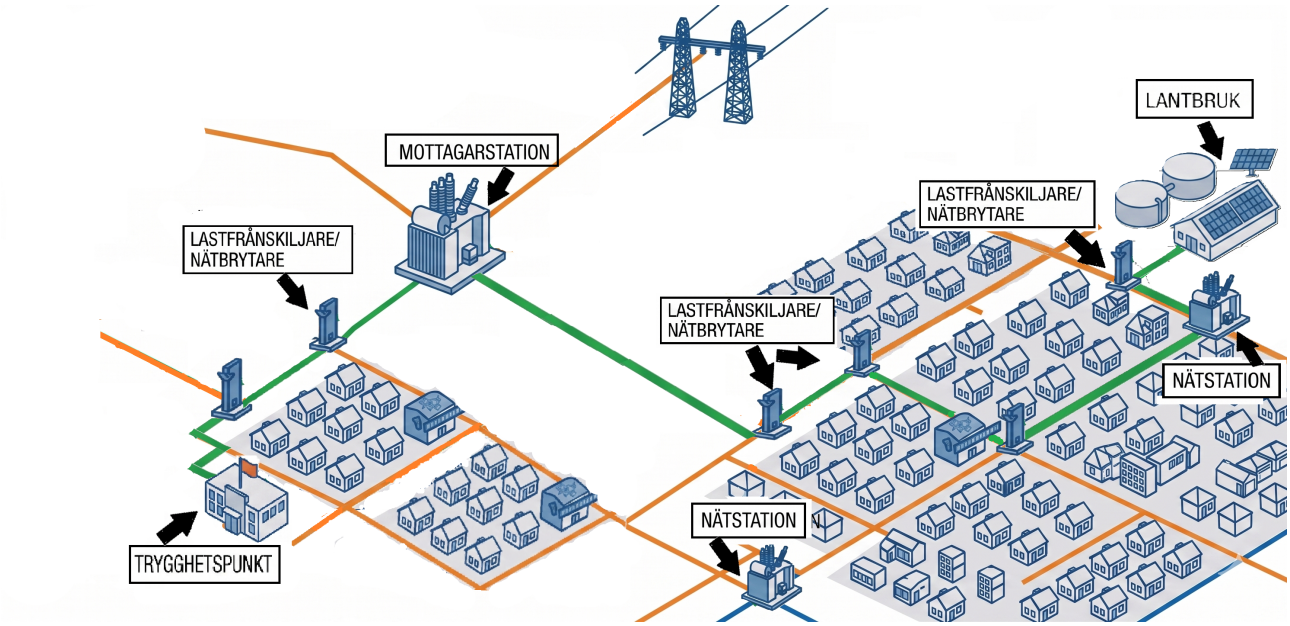
Figur 28 visar hur reservaggragatet och batteriet arbetar enligt percentilmetoden för att hantera lasten över hela året. Det som är mest intressant här blir att titta på den otäckta lasten - markerad som klarrött fält - i grafen. Vid kraschen är effektbristen så pass liten att den nästan är försumbar och uppnår endast ett värde av 0,07 kW. Nästa gång en effektbrist uppstår är fyra timmar senare och då är värdet 4 kW. Därefter hade systemet kunnat klara sig fram till andra april (2025-04-02 kl. 19:00) då en effektbrist av 4,3 kW uppstår. Detta område är något svårare att hantera än tillfället som utlöser effektbristen, då flera underskott uppstår på rad mellan 2 och 5 april. Den högsta otäckta lasten över året når ett värde av nästan 6 kW vid två tillfällen. Den totala effektbristen som omöjliggör ö-drift för detta system är förhållandevis lågt, både med tanke på hur få timmar av årets 8760 h som har en brist men också i toppeffektbrist.

6.5 Nettopositiv drift

6.5.1 Nätsektionering

Utifrån den teoretiska kartläggningen av elnätsautomation så som ABBs zon-koncept och utifrån Borgholm Energis elnätstopologi och diskussion med dem så bör sektionering för att koppla samman referensgården och de lokala trygghetspunkterna vara genomförbart i teorin. Detta genom att använda fjärrstyrda lastfrånskiljare och nätbrytare strategiskt vid noder för att skapa en lokal matningsrutt från lantbruket, till nätstationen, till mottagningsstationen och därefter från mottagningsstationen till trygghetspunkten. Dock ska det nämnas att en mer genomgående analys av detta krävs för att fastställa ifall detta är praktiskt genomförbart, ekonomiskt försvarbart eller det mest optimala för området.

Nedan är en illustration som visar hur ett elnät skulle kunna sektioneras i teorin med en matningsrutt mellan ett lantbruk och en trygghetspunkt.



Figur 29: Illustration

Figur 29 har tagits fram med hjälp av artificiell intelligens. Samtliga figurer av komponenterna mottagarstation, nätstationer, lastfrånskiljare/nätbrytare, trygghetspunkt, lantbruk, stolpar samt hus är framtagna med hjälp av AI, genom att i prompten ange önskemål om att generera dessa komponenter. Figuren har därefter satts samman till en sammanhängande figur, bearbetats och färdigställts med hjälp av grafikverktyg.

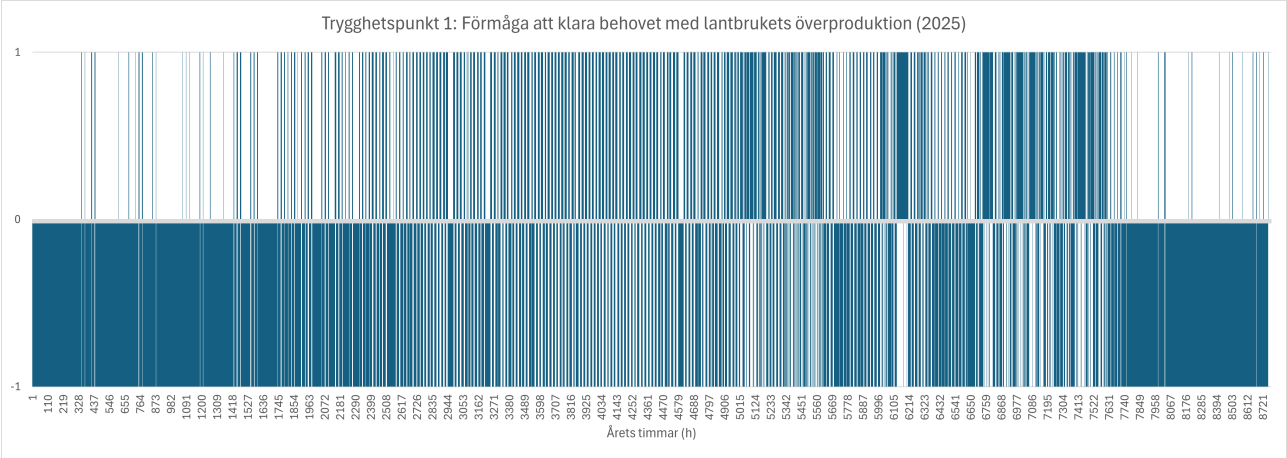
6.5.2 Produktionskapacitet i förhållande till energibehov

För att ö-driften ska fungera i praktiken analyserades lantbrukets nettoproduktion (genererad el minus gårdens egenförbrukning) för att fastställa om den är tillräckligt stor för att täcka trygghetspunkternas energibehov.

Genom att använda konsumtionsdata med timupplösning från två trygghetspunkter och jämföra respektive årsserie mot lantbrukets nettoproduktion, framkom det att en kontinuerlig ö-drift i nuläget inte är genomförbar. Figur 30 illustrerar detta för Trygghetspunkt 1 och figur 31 för Trygghetspunkt 2. För varje timme under året 2025 har det utvärderats huruvida lantbruket haft en nettoproduktion, och om denna i så fall varit tillräcklig för att täcka trygghetspunktens förbrukning under samma timme. Resultatet har sammanställts i en graf där y-axeln indikerar följande:

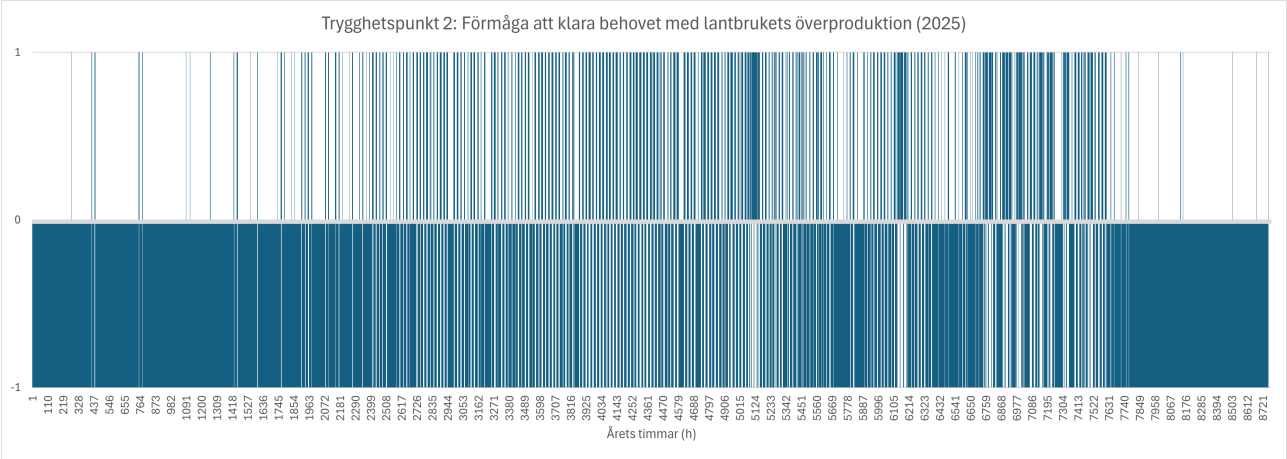
- **1:** Nettoproduktionen täcker trygghetspunktens konsumtion den aktuella timmen.
- **-1:** Nettoproduktionen täcker *ej* trygghetspunktens konsumtion den aktuella timmen.

Trygghetspunkt 1



Figur 30: Trygghetspunkt 1 konsumtion mot överproduktion från lantbruk

Trygghetspunkt 2



Figur 31: Trygghetspunkt 2 konsumtion mot överproduktion från lantbruk

Vidare har följande resultat tagits fram baserat på helårsdatan:

- Lantbruket (rapportens referensgård) hade överproduktion under 4 977 timmar år 2025, vilket motsvarar ungefär 57 % av årets timmar.
- Lantbrukets överproduktion kunde täcka Trygghetspunkt 1:s konsumtion under 31 % av årets timmar.
- Lantbrukets överproduktion kunde täcka Trygghetspunkt 2:s konsumtion under 23 % av årets timmar.

Resultatet visar därmed att lantbrukets överproduktion, i sin nuvarande utformning och ensamt, inte är tillräcklig för att trygghetspunkterna ska kunna upprätthålla en kontinuerlig drift i händelse av ett långvarigt strömavbrott. Nämnvärt är att förluster som uppkommer vid överföring har exkluderats.

6.5.3 Simulering – nettopositiv drift och försörjning av trygghetspunkt

Vidare har en analys utförts i Python för att simulera hur väl lantbruket klarar av att försörja ytterligare en enhet (Trygghetspunkt 1 eller Trygghetspunkt 2). Simuleringen utgår från två olika dimensioneringsfall, vilka beskrivs närmare i avsnitt 5.4.7. Det första fallet baseras på en simulerad vecka (168 h) som inkluderar årets timme med absolut maximal last. Det andra fallet baseras istället på den vecka som bedöms vara den mest krävande, definierad som den sammanhängande period som ackumulerar det allra högsta totala energibehovet.

För att utvärdera om lantbrukets energisystem klarar av denna extra belastning genomfördes analysen i två steg:

Steg 1: Lantbruket täcker sin ordinarie last som vanligt. Ett eventuellt nettoöverskott (exempelvis energi som annars hade förlorats genom så kallad clipping) styrs därefter om för att täcka trygghetspunktens last.

Steg 2: Algoritmen betraktar lantbrukets och trygghetspunktens energibehov som en gemensam enhet, med det övergripande målet att täcka båda anläggningarnas totala lastkurva.

Följaktligen presenteras totalt åtta stycken scenarier där "steg 1" och "steg 2" bygger på varandra. Ingångsparametrarna för dimensionering följer från resultatet i 6.4.0.1 och redovisas i tabell 4.

För varje scenario presenteras en kort sammanställning av data hämtad för respektive scenario. Parametern "timmar med nettobrist" kommer till följd av definitionen av de två olika stegen att ha olika betydelser. För "steg 1" beräknas timmar med nettobrist ut för att endast täcka lantbruket - medan "steg 2" beräknar antalet timmar med brist med målet att täcka lantbruket och trygghetspunktens last.

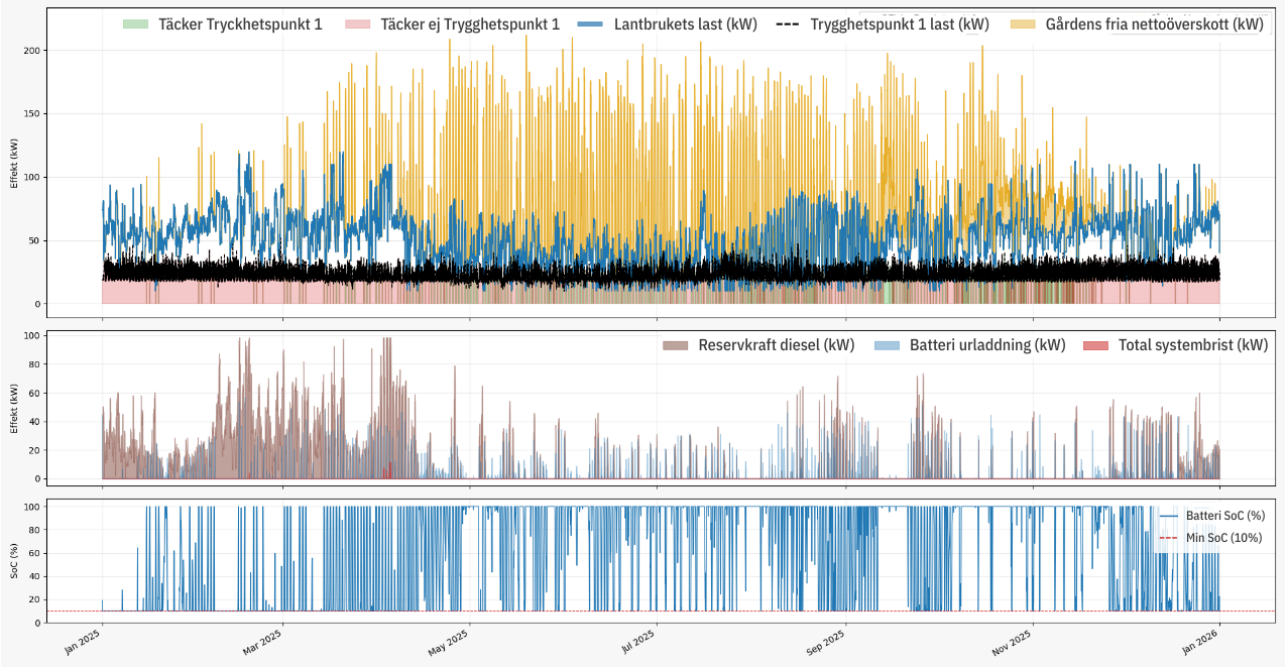
I samtliga figurer presenterade nedan används ett återkommande färgschema. Alla grafer som visualiserar "steg 1" har samma färgsättning och alla "steg 2" har samma färgsättning. Under huvudgrafen för varje scenario visas även två plottar till - där mittengrafen visualiserar reservkraften, batteriet och eventuell effektbrist för att täcka lantbrukets egen last. Den nedersta grafen visar hur batteriet laddas i och ur över hela året. De två sistnämnda graferna visualiseras identiskt för alla åtta scenarier.

Graferna som visualiserar "steg 1" visar lantbrukets lastkurva som blå, trygghetspunktens lastkurva som svart och nettoeffekten i gult. Under lastkurvorna är området under graferna antingen rött eller grönt. För timmar där lantbrukets nettoöverskott är tillräckligt för att täcka hela trygghetspunktens effekt är fältet grönt och då nettoöverskottet är otillräckligt representeras det med rött fält. I graferna för "steg 2" är logiken densamma - med den enda skillnaden att en tredje lastkurva för den summerade "nya lasten" även är med och plottas i lila.

Tabell 4: Sammanställning av hybriddimensionering från Scenario A

Parameter	Tuffaste veckan	Veckan med maxlasttimmen
Batteriets maxeffekt	104,3 kW	70 kW
Batteriets kapacitet	208,6 kWh	140 kWh
Dieselaggregatet maxeffekt	110 kW (137,5 kVA)	98,5 kW (123,1 kVA)

Maxlasttimme-dimensioneringen och trygghetspunkt 1 – Steg 1

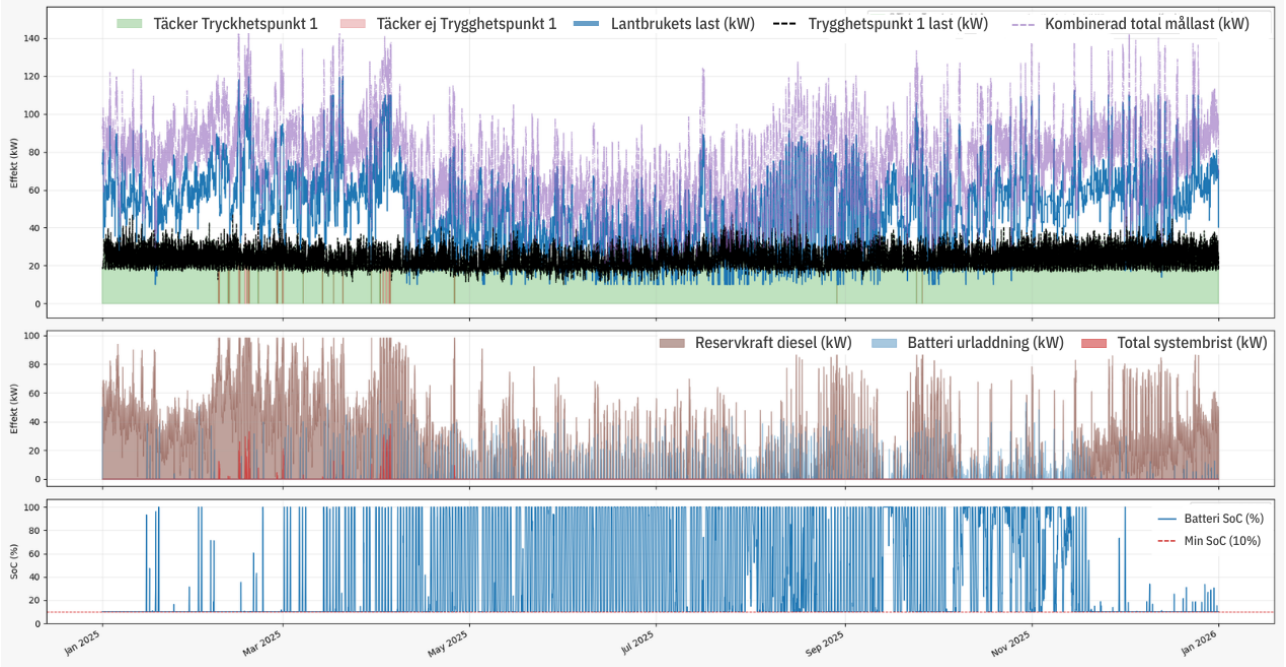


Figur 32: Graf över hybriddimesnioneringen för *veckan med maxlasttimmen* som täcker trygghetspunkt 1 - Steg 1

- Klarar trygghetspunkten: 2 470 timmar (28,2 %)
- Timmar med nettobrist (lantbruket): 22 timmar
- Antal bristepisoder: 458 st
- Längsta sammanhängande gröna period: 46 timmar (2025-09-13 kl. 06:00 – 2025-09-15 kl. 03:00)
- Dieselförbrukning: 26 030 liter

Enligt listan ovan klarar lantbruket inte av att hantera trygghetspunktens last med endast nettoöverskottet i detta fall. I detta fall finns det dessutom en nettobrist på 22 timmar av året för att kunna täcka sin egen last. Resultatet anger att det går att driva trygghetspunkten över en fjärdedel av årets timmar men figur 32 anger även att den längsta sammanhängande gröna perioden är 46 timmar och att avbrott kommer att ske 458 gånger under året.

Maxlasttimme-dimensioneringen och trygghetspunkt 1 – Steg 2

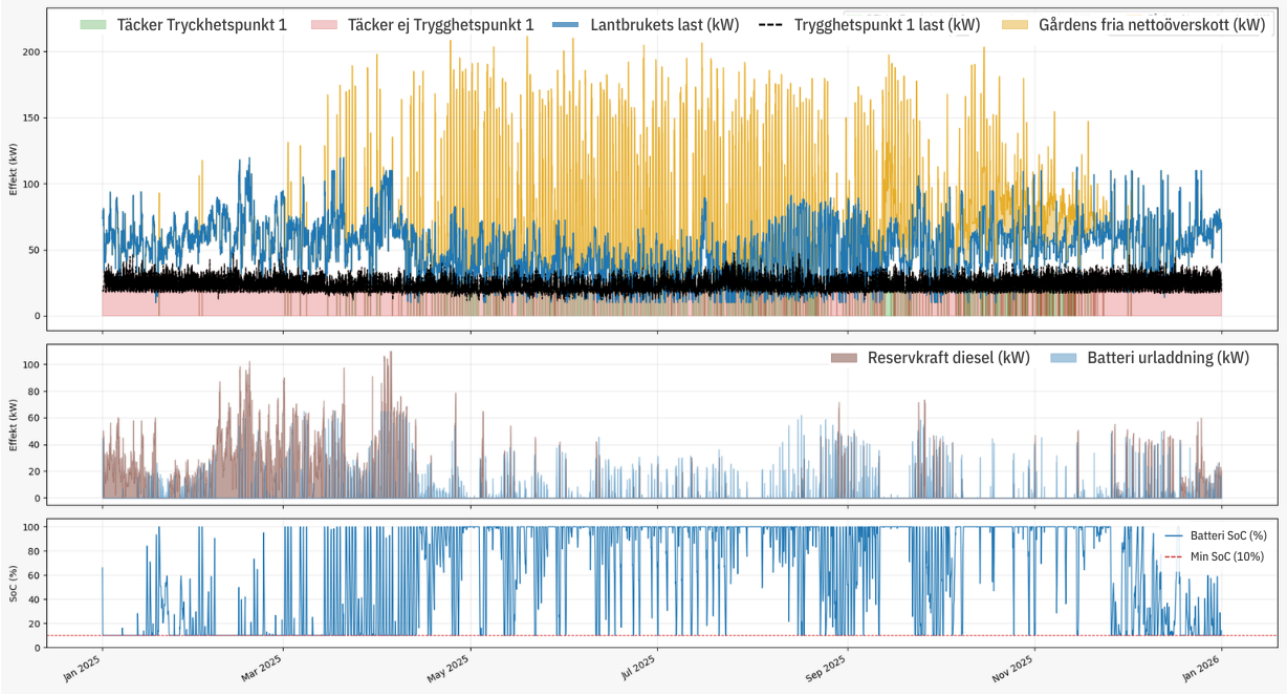


Figur 33: Graf över hybriddimensioneringen för *veckan med maxlasttimmen* som täcker trygghetspunkt 1 - Steg 2

- Klarar trygghetspunkten: 8 655 timmar (98,8 %)
- Timmar med nettobrist (lantbruket + trygghetspunkt): 105 timmar
- Antal bristepisoder: 37 st
- Längsta sammanhängande gröna period: 2 999 timmar (2025-04-26 kl. 05:00 – 2025-08-29 kl. 03:00)
- Dieselförbrukning: 61 782 liter

Figur 33 visar en klar förbättring från föregående fall då målet är att täcka även trygghetspunkten. Siffrorna visar en ökad förmåga att täcka trygghetspunktens last med 250 % från figur 32. Antalet gånger som ett avbrott kommer att ske är 37 st och dessa ligger främst i början på året. Samtidigt ökar dieselförbrukningen med 137 % för att täcka den ökade lasten.

Tuffaste veckan-dimensioneringen och trygghetspunkt 1 – Steg 1

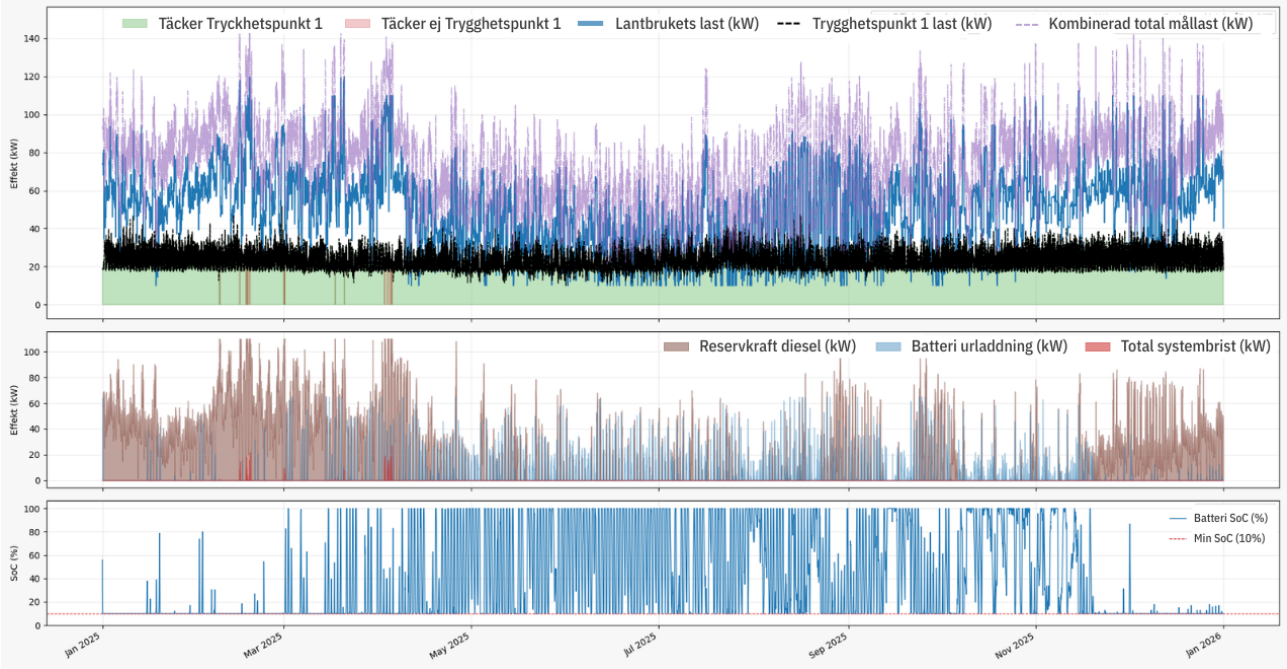


Figur 34: Graf över tuffaste veckans hybriddimensionering som täcker trygghetspunkt 1 - Steg 1

- Klarar trygghetspunkten: 2 225 timmar (25,4 %)
- Timmar med nettobrist (lantbruket): 0 timmar
- Antal bristepisoder: 419 st
- Längsta sammanhängande gröna period: 46 timmar (2025-09-13 kl. 06:00 – 2025-09-15 kl. 03:00)
- Dieselförbrukning: 21 808 liter

Figur 34 visar att *tuffaste veckans* och *veckan med maxlasttimmens* dimensioneringsförslag genererar en nästan identisk förmåga att täcka lasten för trygghetspunkt 1 - både i antalet timmar och sammanhängande period. Skillnaden ligger i att tuffaste veckans dimensioneringsförslag förbrukar ca 5 000 liter mindre och har noll timmar nettobrist för att täcka lantbrukets egen last.

Tuffaste veckan-dimensioneringen och trygghetspunkt 1 – Steg 2

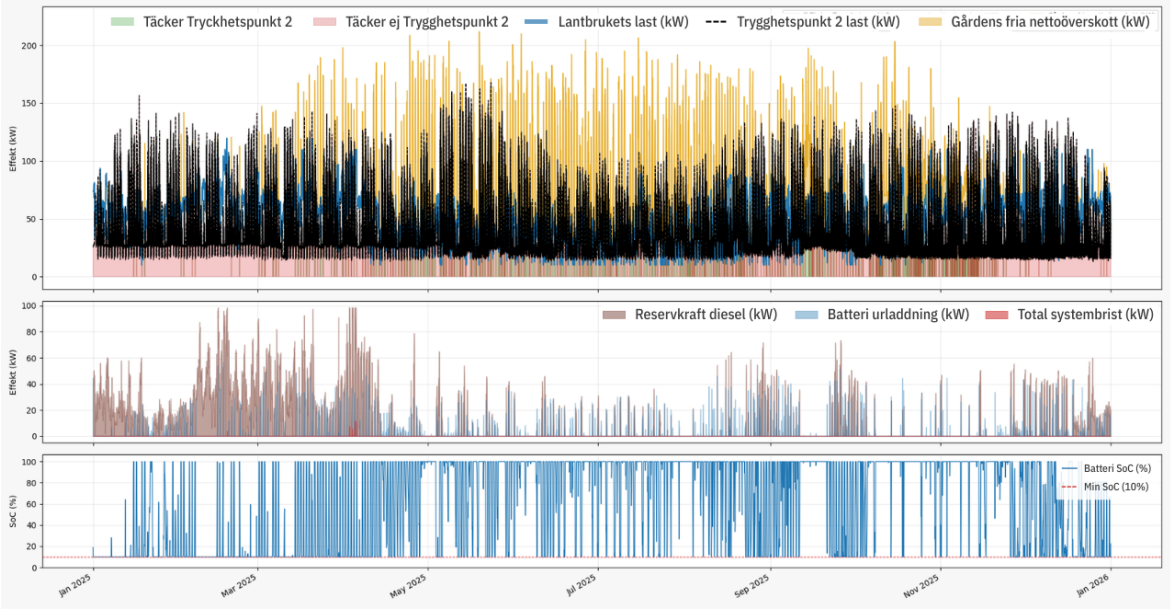


Figur 35: Graf över tuffaste veckans hybriddimensionering som täcker trygghetspunkt 1 - Steg 2

- Klarar trygghetspunkten: 8 704 timmar (99,4 %)
- Timmar med nettobrist (lantbruket + trygghetspunkt): 56 timmar
- Antal bristepisoder: 19 st
- Längsta sammanhängande gröna period: 6 497 timmar (2025-04-05 kl. 07:00 – 2025-12-31 kl. 23:00)
- Dieselförbrukning: 56 065 liter

I steg 2 sker en ökning av hanterbara timmar på 291 % och endast 0,6 % av årets timmar kan inte täckas med befintligt dimensioneringssystem. Figur 35 visar även att lasten för trygghetspunkt 1 kan täckas från 5 april till och med 31 december utan avbrott. Samtidigt har dieselförbrukningen ökat med 157 %.

Maxlasttimme-dimensioneringen och trygghetspunkt 2 – Steg 1

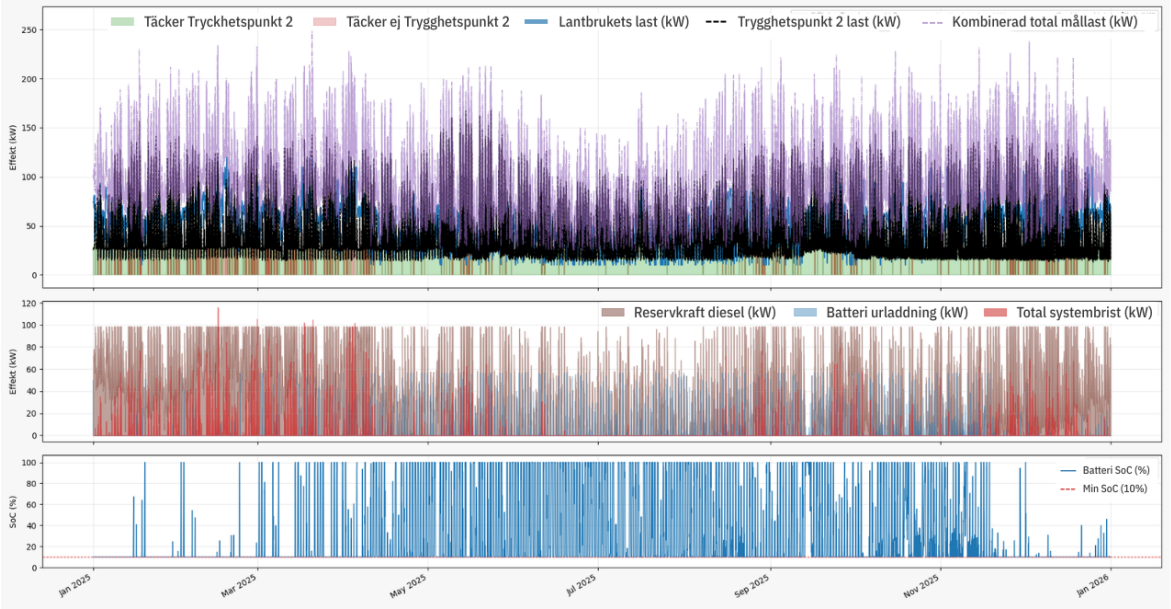


Figur 36: Graf över hybriddimensioneringen för *veckan med maxlasttimmen* som täcker trygghetspunkt 2 - Steg 1

- Klarar trygghetspunkten: 1 998 timmar (22,8 %)
- Timmar med nettobrist (lantbruket): 22 timmar
- Antal bristepisoder: 750 st
- Längsta sammanhängande gröna period: 27 timmar (2025-09-13 kl. 12:00 – 2025-09-14 kl. 14:00)
- Dieselförbrukning: 26 030 liter

För denna dimensionering visar det sig att trygghetspunkt 2 är svårare att hantera. Den sammanhängande "gröna" perioden har minskat med 18h medan dieselförbrukningen förblir densamma. Totalt sker det 750 st separata avbrott för detta fall - vilket för trygghetspunkt 1 med samma aggregat och batteri låg på 458 st.

Maxlasttimme-dimensioneringen och trygghetspunkt 2 – Steg 2

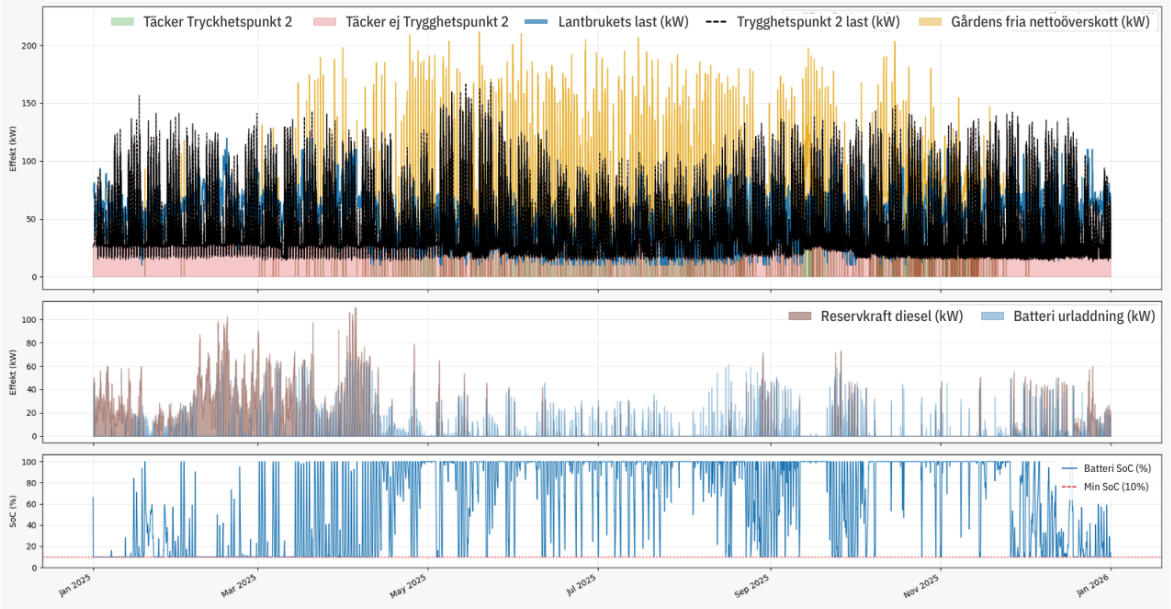


Figur 37: Graf över hybriddimensioneringen för *veckan med maxlasttimmen* som täcker trygghetspunkt 2 - Steg 2

- Klarar trygghetspunkten: 7 874 timmar (89,9 %)
- Timmar med nettobrist (lantbruket + trygghetspunkt): 886 timmar
- Antal bristepisoder: 742 st
- Längsta sammanhängande gröna period: 356 timmar (2025-06-19 kl. 01:00 – 2025-07-03 kl. 20:00)
- Dieselförbrukning: 94 993 liter

I steg 2 kan systemet hantera trygghetspunktens behov för 89 % av årets timmar – men antalet gånger med avbrott är fortfarande över 740 st. Den sammanhängande gröna perioden har gått från 27 h i figur 36 till 356 h i figur 37. Samma system kunde hantera nämre 3000 sammanhängande timmar i rad för trygghetspunkt 1.

Tuffaste veckan-dimensioneringen och trygghetspunkt 2 – Steg 1

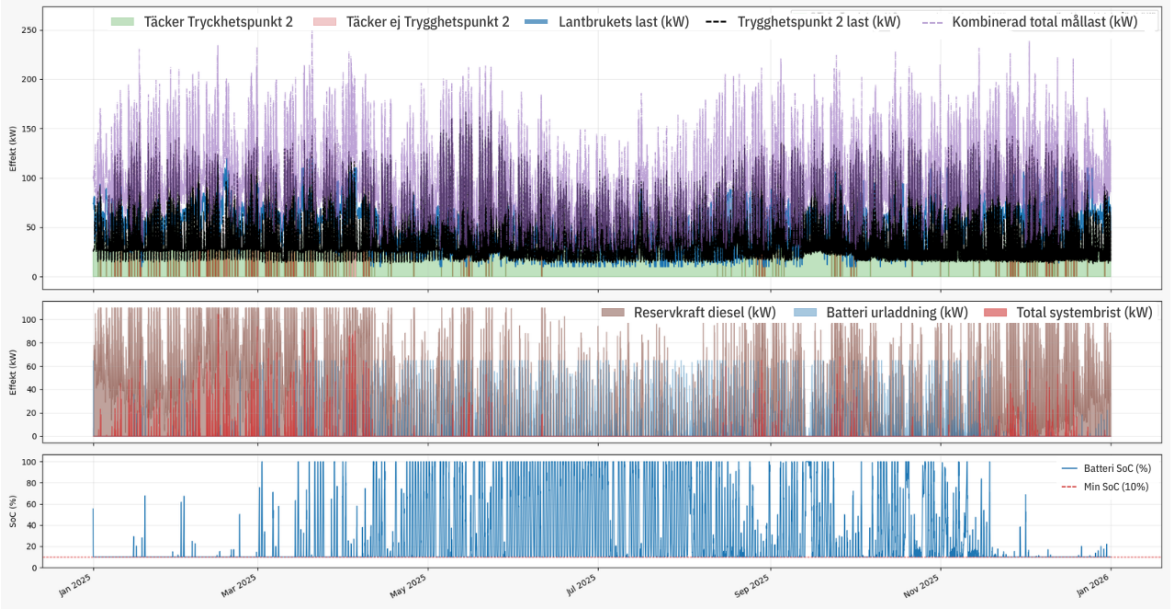


Figur 38: Graf över tuffaste veckans hybriddimensionering som täcker trygghetspunkt 2 - Steg 1

- Klarar trygghetspunkten: 1 783 timmar (20,4 %)
- Timmar med nettobrist (lantbruket): 0 timmar
- Antal bristepisoder: 679 st
- Längsta sammanhängande gröna period: 27 timmar (2025-09-13 kl. 12:00 – 2025-09-14 kl. 14:00)
- Dieselförbrukning: 21 808 liter

I figur 38 kan lantbrukets effektöverskott hantera behovet för lantbruket och trygghetspunkten för en femtedel av året. Den längsta sammanhängande perioden är ungefär ett dygn vilket kan jämföras med att samma system klarade nästan två sammanhängande dygn då den extra lasten kom från trygghetspunkt 1.

Tuffaste veckan-dimensioneringen och trygghetspunkt 2 – Steg 2



Figur 39: Graf över tuffaste veckans hybriddimensionering som täcker trygghetspunkt 2 - Steg 2

- Klarar trygghetspunkten: 8 158 timmar (93,1 %)
- Timmar med nettobrist (lantbruket + trygghetspunkt): 602 timmar
- Antal bristepisoder: 529 st
- Längsta sammanhängande gröna period: 1 506 timmar (2025-06-11 kl. 01:00 – 2025-08-12 kl. 18:00)
- Dieselförbrukning: 92 069 liter

I figur 38 är de gröna fälten tydligt dominerande och utslaget över hela året klarar systemet av den summerade lasten för 93,1 % av årets timmar. Dock är den längsta sammanhängande perioden mycket kortare än den i figur 35. Detta fall klarar av att hantera lantbruket och trygghetspunkt 2 i ödrift från 11 juni till 12 augusti – vilket kan jämföras med perioden för samma system och trygghetspunkt 1 som sträckte sig från början av april till sista december. Dieselförbrukningen har ökat med 64 %.

6.6 Ekonomiska incitament

De ekonomiska incitamenten för att investera i åtgärder som ökar gårdens självförsörjningsgrad och möjliggör ö-drift kan delas in i tre huvudkategorier: statliga investeringsstöd, löpande kostnadsbesparingar och löpande intäkter.

6.6.1 Statliga investeringsstöd

- Investeringsstöd för robust primärproduktion: Möjliggör finansiellt stöd för åtgärder som implementeras för att stärka verksamhetens resiliens vid höjd beredskap eller krig. Detta stöd innefattar åtgärder för att nå ö-drift, där stöd för batteriinstallation specifikt kräver att batterierna kan frikopplas från elnätet och laddas med solenergi under ett avbrott. Jordbruksföretag kan få stöd motsvarande 65% av investeringskostnaden, med ett

maxbelopp på 5 miljoner kronor.

- Klimatklivet: Erbjuder investeringsstöd för fysiska projekt och investeringar som bidrar till omställningen från fossilt till förnybart. Stödet täcker vanligtvis mellan 20 och 65 % av investeringskostnaden, med ett maxtak på 70 %.
- Driftstöd för biogas: Stödet ger upp till 40 öre per producerad kWh för lokal biogasproduktion från stallgödsel, och/eller till aktörer som uppgraderar biogas till biometan.
- Klimatpremier: Ger ekonomiskt stöd vid inköp av elfordon och miljöarbetsmaskiner. Stödet baseras på prisskillnaden mellan miljöfordonet och ett vanligt fordon.

6.6.2 Löpande kostnadsbesparingar

En ökad självförsörjningsgrad leder till löpande sänkningar av gårdens kostnader.

- Undvikna elkostnader: Egenanvänd el från solceller eller biogas ersätter inköpt el, vilket eliminerar kostnader för elpris, energiskatt, rörliga elöverföringsavgifter, elcertifikat och moms. Det finns även ett undantag från energiskatt för anläggningar under 500 kW, som förstärker denna besparing. Genom att kombinera energilager med produktionen kan man även lagra el vid överflöd för att nyttja senare.
- Kapade effekttoppar: Genom att integrera batterilager minskar gårdens maximala belastning på elnätet, vilket möjliggör en nedgradering av anslutningens kapacitet och därmed sänker de fasta nätavgifterna.

6.6.3 Löpande intäkter

System som möjliggör självförsörjning och lagring kan även nyttjas för att sälja tjänster och energi till externa aktörer:

- Försäljning av el, nätnytta och ursprungsgarantier: Den el som inte förbrukas lokalt kan generera intäkter genom försäljning på elbörsen. Därtill ges ersättning från elnätsföretaget för nätnytta samt intäkter från ursprungsgarantier (för anläggningar över 50 kW).
- Stödtjänstmarknaden: Batterilager kan integreras i Svenska kraftnäts stödtjänstmarknad via en BSP-aktör. Genom att erbjuda sin batterikapacitet för att balansera elnätet får resursägaren en kontinuerlig ekonomisk ersättning.

7 Diskussion

7.1 Tekniska förutsättningar för ö-drift på lantbruk

Det finns olika tekniska lösningar och kombinationer för att möjliggöra och upprätthålla ö-drift på ett lantbruk. Grundförutsättningen vid ö-drift är en konstant balans mellan produktion och konsumtion. För att uppnå detta krävs ett hierarkiskt system där en specifik enhet agerar "master" (nätbildande) och sätter referensen för nätets spänning och frekvens, varpå övriga maskiners växelriktare kopplar upp sig och följer denna.

Hur detta implementeras beror på de unika förutsättningar och begränsningar som finns på det specifika lantbruket. Varje gård är unik, vilket innebär att förutsättningarna för ö-drift varierar kraftigt, inte bara mellan olika typer av lantbruk utan även mellan liknande svinproducerande gårdar. De begränsningar och förutsättningar som har fastställts för KH Lantbruk AB baseras på den data och information som funnits tillgänglig för denna studie. För att göra analysen av effektbehovet mer exakt och ytterligare optimera maskindriften, skulle fysiska elmätare behöva installeras på varje enskild last.

7.2 Modellering och optimering av energisystem

7.2.1 Lastkurvan från Excel

Uppbyggnandet av gårdens verkliga lastkurva i Excel innefattade en rad osäkerheter och felkällor. Eftersom gården saknar elmätare på maskiner och generatorer behövde antaganden av den gårdens drift och effektflöden modelleras utifrån export- och importdata från elnätsbolaget, växelriktarens data och skriftlig data av biogasproduktionen.

Den första kompromissen som gjordes utifrån den tillgängliga datan var att normalisera allt till samma tidsupplösning. Datan från såväl elnätsbolaget som växelriktaren var högupplöst med 15 respektive 5-minuters intervall. Biogasproduktionens data hade en upplösning som varierade mellan 13 – 35 timmar. Här introduceras en inbyggd felkälla eftersom att logiken för hur import och export samspelar sker momentant. Vid borttagning av dessa naturliga fluktuationer för att uppnå en gemensam timupplösning – så approximeras gårdens faktiska och momentana effektbehov bort.

En annan felkälla kopplat till tidsupplösningen är att biogasproduktionens precision är orimligt hög i modellen. Värdena angavs med ibland 35 timmars mellanrum och för att få detta till timupplöst data har biogasproduktionen fördelats jämnt över respektive tidsintervall. Denna felkälla antas trots detta inte vara särskilt stor eftersom att biogasproduktionen på gården trots allt är relativt jämn på en årsbasis. Detta har kunnat verifierats i intervjuer med lantbrukaren.

Nästa stora felkälla handlar om antaganden kring biogasens egenanvändning. Informationen gällande biogasens egenanvändning, beskriven under avsnitt 6.1.1, finns endast på årsbasis. Växelriktaren registrerar solproduktion, egenanvänd solel och import från elnätet för att beräkna totala effektbehov och kommer att exkludera biogasens egenanvändning. För att återskapa hela lastkurvan har referensvärden för gårdens totala årliga import, export, produktion och egenanvändning använts. Genom att härleda biogasens egenanvändning med timupplösning ur data för årsmängder så finns det inget sätt att kunna korrigera någon eventuell variation av egenanvändningen över dygnet eller årstiderna.

För att plocka fram timvärden för biogasens egenanvändning så har istället värdena för biogasproduktionen använts. För att se till att import- och exporteffektvärdena inte skulle ta ut varandra har den uppskattade egenanvändningen korrigerats enligt metodiken i 5.3.1. Där efter har den uppskattade biogasegenanvändningen adderats "ovanpå" växelriktarens lastkurva och

sedan komprimerats, tills dess att årstotalerna för produktion, import och egenanvändningen kom så nära referensvärdena som möjligt. För att se till att datan inte skenade iväg och genererade en enorm lastkurva applicerades både en dynamisk komprimering - samt ett maxeffektbehov givet av lantbrukaren och växelriktarens data. Kompressionen fungerade genom att trycka ihop de största överskjutande värdena i biogasdatan mer, medan lägre värden påverkades mindre samtidigt som växelriktarens angivna minimilast (sol och import) förblev helt intakt. Detta förväntas ha tagit ner felet i antagandet mycket och skapat en tekniskt rimlig lastkurva, men felet i de absolut högsta effekttopparna förblir stort och kommer att introducera en stor osäkerhet i driftsdimensioneringen senare.

Eftersom att ö-driftsdimensionering är känslig för specifikt maxlaster så kommer felet från detta utgöra en central osäkerhet i resultaten. Om den verkliga biogasanvändningen skiljer sig från den reproducerade serien, så kommer felet att fortplanta sig genom hela simuleringsmodellen.

7.2.2 Maskinkurvor

Att återskapa en fullständig maskinkurva utifrån gårdens totala nettolast endast med tillgång till en del maskiners maxeffekter och generella driftstider har visat sig vara en komplex process med många osäkerheter. Figurerna över gårdens energipussel illustrerar väl hur algoritmen iterativt identifierar driften för att minimera "overflow" och hålla den teoretiska förbrukningen under den uppmätta lastkurvan. Metoden bygger dock på definierade tidsfönster, konstanta effektvärden och klimatberoenden som tagits fram via intervjuer med lantbrukaren. Eftersom dessa regler är relativt statiska i modellen, är det svårt att fånga den flexibla dynamiken och det mänskliga beteendet som finns i verkligheten. Majoriteten av maskinerna kräver manuell hantering vilket i sig ökar svårigheten i att på ett verklighetstroget sätt kunna efterlikna de exakta processerna. En annan viktig osäkerhet att beakta är att modellen bygger på historisk data. Detta innebär att framtida variationer i exempelvis väder, belastning och arbetsrutiner inte fullt ut kan återges.

En betydande osäkerhetsfaktor är även de processer som inte har definerade tidsfönster samt de maskiner som inte kräver handpåläggning och i modellen kallas för klimatsystem. Ventilationen och värmepannan är definerade som klimatsystem, där värmepanna och ventilation har ett motsatt beteende i den mening att då det är varmare så körs ventilationen mer och vid kallare temperaturer körs värmepannan mer. Detta är för att spegla det beteendet som tolkats fram i intervjuer med lantbruket. Detta dynamiska beteende har efterliknats i algoritmen genom att sätta olika hög grad av uppfyllnad av ventilationen och värmepannan beroende på säsong och tid på dygnet. Men det utgör även en osäkerhet i hur exakt det blir, vilket även är svårt att validera. Driften av spannmålstorken utgör också en osäkerhet. Detta eftersom denna, enligt intervju med lantbruket, styrs av yttre väderförhållanden så som "vid låg luftfuktighet". För att hantera denna osäkra maskindrift så har antaganden gjorts. Istället för en väderstyrning har spannmålstorkens kapacitet begränsats till definierade halvfarts- eller fullfartsveckor med definerade tidsfönster, där algoritmen tillåts schemalägga antingen en (21 kW) eller två (42 kW) torkar. Man kan se att spannmålstorken ibland är en bidragande faktor till ett overflow, vilket visas i figur 9.

En stor fördel med arbetsgången och något som varit väldigt uppskattat är en bra kontakt med ägarna av referensgården. Det har möjliggjort flera intervjuer, samtal och platsbesök. En begränsning har dock varit detaljnivån på datan för en del maskiner och processer. När modellen har schemalagt alla kända processer och därefter maximerat klimatsystemens kapacitet utifrån aktuell säsong, lyckas den inte alltid fylla hela utrymmet upp till referenskurvan. Det resulterar i att det kvarvarande överskottet klassificeras som ospecificerat brus, vilket många effekttoppar också kommer att bestå av.

Det ospecificerade bruset kan ha flera förklaringar. Det kan utgöras av tillfälligt inkopplad utrustning eller icke-specificerade händelser som orsakar ett ökat effektbehov. Eftersom datan inte innehåller alla maskiner på gården kommer det ospecificerade bruset även innehålla okända laster som körs. Det är också möjligt att kända laster tillfälligt körs under längre tidsperioder, eller vid en annan effekt, än vad som är definierats i modellen. Förutom detta så kan orsaken till det ospecificerade bruset även ha sin grund i hur lastkurvan byggdes upp i Excel, som beskrivet här ovan i diskussionsavsnittet 7.2.1. Det i sin tur försvårar nästa steg – att kunna kapa effekttoppar – eftersom den optimerade driften inte kan flytta på ospecificerat brus. Eftersom många toppar klassificeras som ospecificerat brus blir en optimal drift svår att fastställa eftersom den faktiska lasten/lasterna som orsakar effektoppen inte är identifierad.

I figur 11 är det ospecificerade bruset högre under vintern än under sommaren. Detta indikerar att gårdens faktiska effektbehov under specifika vintertimmar överstiger den teoretiska maxkapaciteten för både värmesystem och de kända maskinerna. Att nästan hälften av alla vinterpeaker (47,5 %) inträffar under morgonen beror troligtvis på en sammanlagt effekt från klimatsystem och schemalagda laster. Kombinationen av att det på vintern är som kallast under natten och morgonen och det faktum att flertalet av lantbrukets maskiner vanligtvis startar runt kl 6 på morgonen förklarar dessa effekttoppar.

I figur 12 där maxeffekttoppen oftast infaller mitt på dagen (39,3 %), medan nattliga toppar endast utgör 10,7 % har en logisk förklaring. Detta kan rimligtvis bero på ett ökat kylbehov under dagtid för att kyla stallarna då utomhustemperaturen stiger samt ett minskat under natten då temperaturen avtar. Ventilationen svarar mot det ökade kylbehovet.

Figur 9 belyser både att modellen har sina begränsningar för oväntade toppar men belyser även behovet av detaljerad indata i modellen för att minska ospecificerad data.

Figur 13: Eftersom algoritmen redan har schemalagt alla kända maskiner och maximerat klimatsystemens kapacitet, kan den inte härleda överskottet till någon specifik process på gården, varpå det av modellen klassificeras som oidentifierad last.

I samtliga figurer kan man där man ser att Blötläggning och Tvätt ibland sammanfaller så kan det framstå som en motsägelse mot det strikta beroendet. Förklaringen är att Tvätt och Blötläggning utförs oberoende av varandra i två olika stall på gården.

För att öka detaljnivån och minska osäkerheten i datan hade en mer omfattannde mätinstats krävts. Om separata elmätare hade installerats på samtliga kritiska maskiner och i de olika byggnaderna på gården, så hade den exakta timförbrukningen för respektive last kunnat utläsas. Detta hade både ökat detaljnivån men även kunnat validera resultatet av den simulerade maskindriften med större säkerhet.

Figur 14, som visar lastfördelningen per månad, visar på att de största lasterna utgörs utav ventilation och samt värmefläktar. Detta understryker osäkerheten som redan tagits upp. Men utifrån jämförelsen på lastfördelningen med siffror från Handboken tyder resultatet således på att modellen lyckas skapa en lastfördelning som inte skiljer sig så mycket från nyckeltalen. Differansen framkommer främst hos ventilationen och uppvärmningen. Jämfört med Handboken är modellens ventilation aningen låg och uppvärmningen aningen hög. Denna differans är rimlig med tanke på att både ventilation och värmesystem är det som kallas klimatsystem som styrs av perioder men som också inkluderar antaganden. Detta talar för att värmepannan troligtvis skulle aktiveras i större utsträckning och ventilationen i mindre. Men sedan är detta endast nyckeltal som tagits fram baserat på energikartläggningar. Att det diffar mellan olika lantbruk är därmed rimligt vilket för vårat resultat kan innebära att det faktiskt är rimligt med denna differans och omvända storleksordning mellan ventilation och värme för vårt resultat. Viktigt att beakta är även att referensgården bedriver smågrisproduktion vilket skiljer sig från Hand-

bokens framtagna nyckeltal som utgått ifrån integrerad produktion (kombinerad smågris och slaktsvin produktion). Detta kan förklara att modellens uppvärmning är högre än Handbokens, då smågrisar kräver högre temperaturer än slaktsvin.

Resultatet för helåret 2025 där det totala energibehovet mellan referenskurvan och modellens slutgiltiga lastkurva endast skiljde cirka 1% tyder också på att modellen återskapar referensgårdens totala energibehov med hög precision. Vidare har modellen identifierat och placerat ut 94,5% av den totala energiförbrukningen till kända maskiner. Det ospecificerade bruset utgör därmed en andel på 6,5%. Den totala överproduktionen (overflow) under året motsvarade ungefär 1% av gårdens totala årsförbrukning. Detta resultat visar på att modellens itererande algoritm fungerar väl.

Nämnvärt är att modellen innefattar en 10%-marginal. Detta innebär att modellens iterativa algoritm får möjligheten att tillfälligt gå över referenskurvan då maskinerna pusslas. Detta är ett sätt att hantera osäkerheter i den inmatade datan, dels från lastkurvan som är skapad i excel (referenskurvan) samt maskinernas effekter och tidsfönster. Eftersom det i flera steg under arbetets gång behövts göras antaganden är detta ett sätt att hantera denna osäkerhet. När det optimala schemat är färdigställt plockas därefter denna tolerans bort och det överskott som redovisas som overflow beräknas utifrån referenskurvan.

I figur 16 kan man se att modellen lyckas kapa en del effekttoppar genom en justering av maskinernas tidsfönster i kombination med effektvakten. Det är dock viktigt att beakta hur inställningarna för effektvakten och den tillhörande komfortspärren påverkar resultatet. I detta fall, med effektvakten inställd på 110 kW och komfortspärren satt till 2 timmar, uppnåddes en kapning av maxtoppen på 10,6 kW. Men dessa inställningar ska baseras på kraven hos lantbruket i fråga. Ett exempel är uppvärmningsbehovet, vilket skiljer sig åt beroende på typen av svinproduktion. Smågrisar är mer känsliga än slaktsvin och ställer därmed högre krav på temperaturhållningen. Referensgården som denna rapport utgår ifrån bedriver smågrisproduktion.

En annan begränsning i optimeringssteget är att de allra högsta effekttopparna ofta består av ospecificerat brus. När en topp utgörs av oidentifierad last kan algoritmen inte flytta på den för att platta ut kurvan. Detta innebär att om mer specifik mätdata hade funnits tillgänglig, och andelen ospecificerat brus därmed hade minskat, hade det möjliggjort en mer omfattande optimering. Detta hade i sin tur sannolikt resulterat i en större effektkapning och mer säkra resultat.

7.3 Ö-driftsimulering och dimensionering

Figur 24: Med tanke på att batteriet dimensionerades för endast en vecka i mars så har det ej tillräckligt med utrymme för att kunna nyttja den på ett effektivt sätt. Som figuren visar kommer batteriet vid flera tillfällen att laddas ur helt trots att det verkar finnas ett stort nettoöverskott från sol och biogas. Det beror på att batteriet är för litet för att kunna ta vara på det och snabbt laddas ur under nätterna när solen inte bidrar till energisystemet.

Figur 26: Anledningen till att den hybridanpassade *veckan med maxlasttimmen*-dimensioneringen inte klarar effektbristen i februari beror på hybriddimensioneringens funktionssätt. Systemet är utformat för att optimera det gemensamma utnyttjandet av dieselgeneratorn och batteriet, där lasten delas upp i två olika zoner vilket beskrivs närmare i avsnitt 5.4.5.2.3. När avbrottet inträffar vid timme 1075 är den nettoeffektbrist som generatorn momentant förväntas täcka högre än vid den timme som definierats som maxlasttimme. Även om maxlasttimmen representerar årets absoluta effekttopp, utgör den inte årets högsta nettoeffekttopp ur dieselaggregatets perspektiv, baserat på percentilmetodens definition inom ramen för hur hybriddimensioneringen beräknas.

Figur 19: Värt att notera i resultaten från *tuffaste veckan* och *veckan med maxlasttimmen* är att batteriet kan vara avsevärt mycket mindre för att hantera *veckan med maxlasttimmen*, vilket har sin grund i att de högsta 5 % effekttopparna för *veckan med maxlasttimmen* inte utgörs av lika höga toppar rent generellt och på så vis trycker ned maxeffekten som batteriet måste klara av att hantera.

En annan viktig aspekt utifrån resultaten är fördelningen, frekvensen och höjden på de så kallade "'bristtimmarna" med referensnamnet "otäckt last" i figurerna. Precis som resultatet visar för figur 28 att för att en krasch ska uppstå kan bristen vara så liten som 0,07 kW. Det är i sammanhanget inte realistiskt att nödvändigtvis anse att det i verkligheten faktiskt hade inneburit en krasch – givet att samtliga maskiner och generatorer oftast kan producera en högre maxeffekt än vad de är märkta för. Detta innebär alltså att trots att resultaten visar på en "krasch" för *veckan med maxlasttimmen*-dimensioneringen, så går det att anta att ö-driften kommer fungera även för detta fall.

7.4 Möjlighet till nettopositiv drift (trygghetspunkt)

Även om det i teorin skulle gå att applicera ABB:s zon-koncept för det presenterade förslaget att leda strömmen från lantbruket, via mottagningsstationen, och vidare till trygghetspunkterna, så går det inte att med säkerhet säga att detta skulle fungera i praktiken. För detta krävs det en mer djupgående analys över komplexiteten av matningsrutten, hur stor ombyggnation som skulle krävas för att genomföra detta samt hur zon-koncept skulle kunna tillämpas och utformas för att upprätthålla en stabil, enskild matningsrutt.

För detta skulle Borgholm Energi Elnät AB behöva ett kontrollsystem samt batterilagring. Kontrollsystemet är viktigt för att kunna styra och kontrollera balansen på nätet så att frekvens och spänningen hålls inom dess gränser, där Borgholm Energi Elnät AB då är ansvarig (som klargörs i avsnittet 4.5). På grund av begränsningar i tillgänglig tid har detta alternativ inte kunnat analyseras djupare inom ramen för detta arbete. Det finns dock en tydlig potential för framtida studier att undersöka hur ett sådant mikronät kan utformas, och i vilken utsträckning hela eller större delar av elnätet skulle kunna försörjas i ö-drift. I ett sådant utökat systemscenario skulle lantbruket kunna fungera som en viktig och integrerad stödproducent till det lokala mikronätet.

Att överproduktionen endast täcker Trygghetspunkt 1 under 31 % av årets timmar, och Trygghetspunkt 2 under 23 % av timmarna, bekräftar att en el-ö baserad på enbart lantbruket faller. Något som skapar en osäkerhet i detta resultat är att en del förluster (exempelvis överföringsförluster) har exkluderats. I verkligheten skulle förluster minska den tillgängliga effekten från lantbruket, vilket hade visat på ytterligare underskott av nettoeffekt från lantbruket för att försörja trygghetspunkterna. Vidare måste felmarginalerna i den använda datan beaktas. Eftersom exakta, uppmätta data inte funnits tillgängliga för alla delar, baseras lantbrukets totala lastkurva och maskinkurva på estimeringar utifrån den data som kunnat anskaffas. Dessa uppskattningar medför en osäkerhet i baseline:n, vilket direkt påverkar hur ofta lantbruket faktiskt uppvisar en nettopositiv produktion. Det bör dock understrykas att trots att överföringsförluster och en el-ö som bevisligen fallerar under stora delar av året – så har simuleringen med dessa specifika dimensioneringsparametrar utförts utifrån att lantbruket mest troligen kommer dimensionera för att klara av sin egen drift och inte en trygghetspunkt. Resultaten från simuleringen där lantbrukets elproduktion ämnade till att även täcka trygghetspunkternas, det vill säga "steg 2", påvisade att gården klarade av att försörja trygghetspunkten för i princip hela året. Det i sig visar att det finns en stor potential för gårdar att kunna agera nettoproducenter av el – men i enlighet med tidigare beskrivning så behöver detta utredas djupare.

Denna rapport bör inte ses som absoluta eller definitiva rekommendationer för hur det specifika lantbruket måste byggas om. Resultaten är avgränsade till ett fåtal utvalda och konservativa scenarier (såsom *veckan med maxlasttimmen* och *tuffaste veckan*). Det huvudsakliga bidraget i detta arbete är istället den utvecklade simuleringsmodellen och dess tillhörande gränssnitt som tillsammans utgör en grund för hög flexibilitet och kapacitet att hantera en nästan obegränsad mängd olika scenarier. Användaren kan fritt justera parametrar för avbrottslängd och under vilken tidsperiod det sker, acceptabel felmarginal (percentiler), batteriegenskaper och maskinscheman. Huruvida lantbruket faktiskt bör investera i just de komponentstorlekar som resultatet visar är därför inte givet. Verktyget är utformat för att fungera som ett dynamiskt beslutsunderlag där beslutsfattare kan testa olika risknivåer och krisdefinitioner utifrån deras eget behov.

En intressant aspekt som framkommer vid analysen av Scenario C är den stora skillnaden i optimerad batteristorlek beroende på angiven avbrottstid. Eftersom modellens optimering är ämnar till att minimera den totala dieselanvändningen, skulle en dimensionering som avser ett helt års drift kräva en betydligt större batterikapacitet för att effektivt kunna lagra den. Den enorma dieselförbrukning som presenteras i resultatet för trygghetspunkterna är en direkt konsekvens av detta. Om modellen hade optimerat systemet utifrån målet att försörja både gården och trygghetspunkterna under ett helt år, hade batteristorleken ökat markant vilket går att utläsa av resultaten i avsnitt 6.4.0.3, vilket i sin tur hade pressat ned dieselförbrukningen avsevärt. Givet att studiens syfte var att undersöka krisberedskap, ansågs det mest relevant att utgå från att ö-driften ska klara en kortare tidsperiod (här dimensionerat för 1 vecka) och därefter optimera det efter lantbrukets eget behov i förstahand innan man utvärderar möjligheten till att försörja en trygghetspunkt. Resultatet visar att ett system optimerat för en kortare kris på gården inte blir effektivt över en längre period, om det skulle krävas i händelse av till exempel kris, eftersom att bränslebehovet blir enormt.

Vidare kan analysen av det enskilda lantbruket, som visar på ett för stort effektunderskott, bidra till att diskussionen om ett större mikronät i området blir intressant. Att expandera ön till att omfatta hela eller större delar av byn skulle öppna upp för att integrera områdets övriga lokala energiresurser, såsom den befintliga sol- och vindkraften, samt fjärrvärmenätet (som eventuellt ska bli kraftvärme). Detta är ett område som skulle behöva en närmare analys. Detta skulle kräva produktionsdata för den lokala sol- och vindkraften, lastdata för systemet, befintlig reservkraft samt en närmare analys av elnätets topologi. På grund av den begränsade tiden har denna studie inte kunnat fördjupa sig i hur ett sådant komplext system skulle utformas och styras. I ett sådant system skulle lantbruket inte behöva bära hela försörjningsbördan, utan istället spela en viktig roll som en integrerad stödproducent till ett lokalt energisystem.

En aspekt som inte analyserats vidare i denna rapport är dieselåtgången i relation till fysiska bränsleåtgången för aggregatet. Det kvarstår följaktligen en osäkerhet kring hur länge den föreslagna reservkraftlösningen, speciellt i extremfall, faktiskt hade kunnat upprätthålla driften som systemet anger.

7.5 Ekonomiska incitament

De befintliga ekonomiska incitamenten driver en förändring av lantbrukets roll i samhället, vilket i sig understryker hur viktig denna fråga är. Det bör dock lyftas att dessa incitament till stor del är politiskt betingade och har sin grund i både klimat- och säkerhetspolitik. Detta medför en osäkerhet inför framtiden, exempelvis gällande risken att nuvarande stöd dras in.

På samma sätt råder en viss osäkerhet kring den högaktuella stödtjänstmarknaden. Det är svårt att förutse marknadens framtida utveckling. Detta vare sig om andelen intermittent kraft i elnätet kommer att fortsätta öka, eller om efterfrågan och ersättningsnivåer för stödtjänster

kommer att minska i takt med att fler aktörer inkluderas och utbudet på marknaden växer.

8 Slutsats

Detta arbete visar att det är fullt möjligt att utveckla ett dynamiskt simulerings- och analysverktyg för att utvärdera elresiliens och ö-drift på lantbruk. Den största begränsningen i arbetet bedöms vara datamängden och upplösning på den – vilket krävde en mängd antaganden som i sig ger upphov till potentiellt stora fel i resultaten. Genom att integrera historisk data med kunskap om driftmönster hos maskiner på gården, har en Python-baserad modell möjligheten att demonstrera viktiga sårbarheter hos ett lantbruk, identifiera och kapa effekttoppar genom optimering samt modellera ö-drift med sektionering och där efter ge tekniska lösningsförslag för batterilager och reservkraft.

En betydande framgång i projektet är utvecklingen av en metodik för att uppskatta den verkliga maskinanvändningen på en gård, även utifrån mycket begränsad tillgång på data. Trots att verktygets slutgiltiga och specifika resultat i dagsläget inte kan överföras rakt av för användning på andra lantbruk, är principerna bakom fortfarande generaliserbara och återanvändbara. Modellens absoluta precision är fortfarande beroende av gårdsspecifik indata, såsom detaljerad information om lasterna, elinfrastrukturen och historiska förbrukningsmönster. Eftersom denna data ofta är bristfällig eller helt saknas hos många lantbruk begränsas verktygets omedelbara tillämpbarhet i stor skala. För att möjliggöra en fullt skalbar lösning krävs standardiserad datainhämtning och en mer generisk algoritm som kan anpassa sig efter andra maskiner och produktionsenheter.

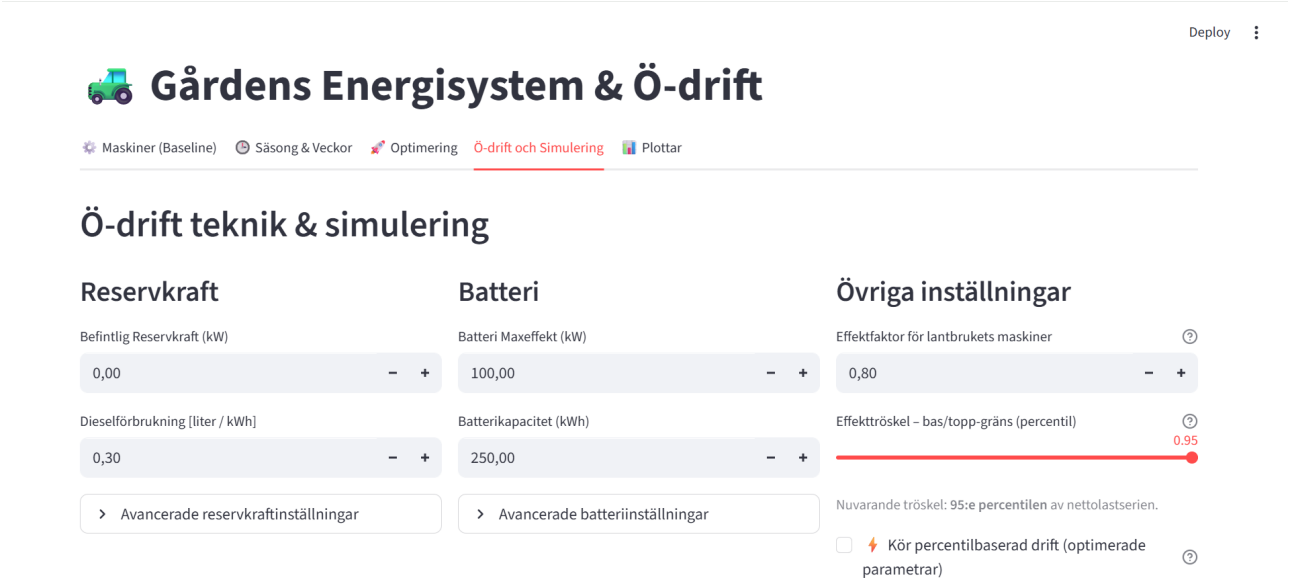
Det går dock att säga att verktyget fyller den lucka som lyfts fram i diskussioner gällande den befintliga rådgivningen. Intervjuer med bland annat experter på Greppa Näringen belyser att befintlig rådgivning är tidsbegränsad och översiktig, snarare än djupgående i sina analyser kopplade till elresiliens. Genom att erbjuda en metod för att komma närmre en mer kvantifierbar bedömning av ett lantbruks sårbarheter, nödvändiga tekniska förutsättningar och dimensionering av batterier och reservkraft så kan verktyget potentiellt fungera som en utgångspunkt för en i framtiden bättre rådgivning. Förutsatt att rätt förutsättingar för datainsamling finns – så kan verktyget bli en del i steget mot en mer robust elförsörjning och dessutom ligga till grund för investeringsplanering.

9 Bilagor

9.1 Intervjufrågor om lantbrukets verksamhet och driftsmönster

- Hur många slaktgrisar/suggor/smågrisar har ni? Har ni ett helintegrerat system eller inte?
- Har ni data över er konsumtion på timbasis över ett år som vi kan ta del av?
- Har ni data över er produktion på timbasis över ett år som vi kan ta del av?
- Vad är er totala konsumtion på ett år?
- Vad är er totala produktion på ett år?
- Exporterar ni el? Om ja, hur mycket?
- För produktionsenheter: Hur stor är er egenanvändning? Har ni data över er egenkonsumtion per produktionsenhet på timbasis över ett år som vi kan ta del av?
- Vad har ni för laster (maskiner) på gården som använder el?
- För varje last, om möjligt: Vad är dess maxeffekt? När körs den och hur länge?
- Vad är det för prioriteringsordning på lasterna? (Dvs. vilken/vilka måste köras hela tiden, kan någon last gå på lägre intensitet eller kopplas bort helt?)

9.2 Bild på gränssnittet



Figur 40: Skärmbild från "flik 4" i gränssnittet som beskrivs i avsnitt 5.4.6

10 Referenser

[1] MSB. *Viktigaste samhällsfunktionerna*. URL: https://www.mcf.se/sv/amnesomraden/beredskap-for-kris-och-krig/beredskap-for-aktorer/samhallsviktig-verksamhet/viktiga-samhallsfunktioner/.

[2] Camilla Eriksson. *Livsmedelsförsörjning ur beredskapsperspektiv: forskningsprojekt slutrapport*. SLU. URL: https://pub.epsilon.slu.se/16018/1/eriksson_c_190304.pdf.

[3] Greppa Näringen. *Beredskapskollen*. URL: https://adm.greppa.nu/radgivning/beredskapskollen.html.

[4] Livsmedelsverket. *Kartläggning av kritiska och strategiska varor*. 2024. URL: https://www.livsmedelsverket.se/4991f1/globalassets/publikationsdatabas/rapporter/2024/2024-kartlaggning-av-kritiska-och-strategiska-varor.pdf.

[5] MSB. *Livsmedelsproduktion ur ett beredskapsperspektiv*. 2018. URL: https://rib.msb.se/filer/pdf/28493.pdf.

[6] Energimyndigheten. *Styrel, prioritering av elanvändare*. 2026. URL: https://www.energimyndigheten.se/energiberedskap/energiberedskap-for-offentlig-sektor/styrel/.

[7] Emergency information from Swedish authorities. *Reservkraft och Styrel-systemet*. 2025. URL: https://www.krisinformation.se/en/hazards-and-risks/solar-storms-and-space-weather/reserve-power-and-the-styrel-system/.

[8] Jordbruksverket. *Rapport Jordbruksverket (ra10_16)*. Jordbruksverket. URL: https://www2.jordbruksverket.se/webdav/files/SJV/trycksaker/Pdf_rapporter/ra10_16.pdf.

[9] SVA. m. fl. *Om krisen eller kriget kommer – till Sveriges lantbruksföretagare. SVA:s rapportserie 106*. SVA, 2024. URL: https://www.sva.se/media/lx4clyms/naer-krisen-eller-kriget-kommer.pdf.

[10] SVA. m. fl. *Rusta gården- Om krisen eller kriget kommer.SVA:s rapportserie 133.* SVA, 2025. URL: https://www.sva.se/media/g5bjbhhg/svakom231v4-rusta-garden.pdf.

[11] SVA. m. fl. *Checklistor- Stärk ditt företags motståndskraft med hjälp av checklistor*. SVA, 2025. URL: https://www.sva.se/beredskap/livsmedelsberedskap/kom-igaang/checklistor/.

[12] Lantbrukarnas riksförbund. *Beredskapshandbok*. Lokal filreferens. 2025. URL: file:///C:/Users/SE3A2L/Downloads/Beredskapshandbok.pdf.

[13] Greppa näringen. *Fakta om Greppa Näringen*. URL: https://greppa.nu/om-greppa-naringen/fakta-om-greppa-naringen.

[14] Greppa näringen. *Greppa näringen i Stockholms län*. URL: https://greppa.nu/ditt-lan/stockholm.

[15] hushallningsallskapet Beredskapskollen. *Intervju Energirådgivare*. Intervju utförd av författarna. 2026.

[16] Maria Källming. *Intervju*. Intervju utförd av författarna. 2026.

[17] Hushållningssällskapet. *Handbok om energieffektivisering*. URL: https://hushallningssallskapet.se/wp-content/uploads/2024/03/handbokomenergieffektivisering.pdf.

[18] Hushållningssällskapet. *Robusta gården – våra projekt*. URL: https://hushallningssallskapet.se/vara-projekt-och-uppdrag/robusta-garden/.

[19] Hushållningssällskapet. *Robusta gården*. 2025. URL: https://hushallningssallskapet.se/wp-content/uploads/2023/11/slutrapport-robusta-garden.pdf.

[20] Jordbruksverket. *Investeringsstöd för robust primärproduktion*. 2025. URL: https://jordbruksverket.se/stod/jordbruk-tradgard-och-rennaring/investeringsstod-for-jordbruk-tradgard-och-rennaring/robust-primarproduktion.

[21] Naturvårdsverket. *Regler för Klimatklivet*. 2026. URL: https://www.naturvardsverket.se/vagledning-och-stod/luft-och-klimat/regler-for-klimatklivet/.
[22] Naturvårdsverket. *Klimatklivet*. URL: https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/klimatklivet/.
[23] Naturvårdsverket. *Hur mycket stöd kan jag få?* 2025. URL: https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/klimatklivet/sa-fungerar-klimatklivet/hur-mycket-stod-kan-jag-fa/.
[24] Energimyndigheten. *Klimatklivet*. URL: https://www.energimyndigheten.se/klimat/transporter/transporteffektivt-samhalle/klimatpremie/.
[25] Energimyndigheten. *Klimatpremie för miljöarbetsmaskiner*. 2026. URL: https://www.energimyndigheten.se/klimat/transporter/transporteffektivt-samhalle/klimatpremie-for-miljoarbetsmaskiner/.
[26] Regeringskansliet. *Regeringen satsar på gödselbaserad biogas*. 2023. URL: https://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2023/10/regeringen-satsar-pa-godselbaserad-biogas/.
[27] Energimyndigheten. *Stöd till produktion av biogas*. 2025. URL: https://www.energimyndigheten.se/utlysningar/stod-till-produktion-av-biogas/.
[28] ATL. "Expert: Batteri och solceller garant för stabilare elpris". I: *ATL* (). URL: https://www.atl.nu/expert-batteri-och-solceller-garant-for-stabilare-elpris.
[29] Energimyndigheten. *Löpande intäkter efter installation*. 2026. URL: https://www.energimyndigheten.se/effektiv-energianvandning/guider/solelportalen/vilka-stod-och-intakter-kan-jag-fa/lopande-intakter-efter-installation/.
[30] Energimyndigheten. *Det här ingår i en solcellsanläggning*. 2026. URL: https://www.energimyndigheten.se/effektiv-energianvandning/guider/solelportalen/har-mitt-hus-ratt-forutsattningar/det-har-ingar-i-en-solcellsanlaggning/.
[31] Solkraft Sverige. *Stödtjänster - ekonomisk ersättning för batterilagring*. URL: https://www.solkraftsverige.se/artiklar/stodtjanster.
[32] Svenska kraftnät. *Allt fler leverantörer av stödtjänster för det svenska elsystemet*. URL: https://www.svk.se/press-och-nyheter/nyheter/balansansvar/2024/allt-fler-leverantorer-av-stodtjanster-for-det-svenska-elsystemet/.
[33] Svenska kraftnät. *Så kan du som privatperson bidra med stödtjänster*. 2025. URL: https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-systemansvaret/verktyg-for-systemdrift/stodtjanster-och-avhjalpande-atgarder/sa-kan-du-som-privatperson-bidra-med-stodtjanster/.
[34] Svenska kraftnät. *Leverantörer av balanstjänster*. 2026. URL: https://www.svk.se/4994be/siteassets/aktorsportalen/bidra-med-reserver/leverantorer-av-balanstjanster.pdf.
[35] Hushållningssällskapet. *Tabell 6. Energinyckeltal kWh/kg slaktvikt. Baserat på data från 25 företag med integrerad produktion. Data inhämtad 2021*. URL: https://hushallningssallskapet.se/wp-content/uploads/2024/03/handbokomenergieffektivisering.pdf.
[36] T. Råberg m. fl. *Eko lantbruk*. SLU. URL: https://pub.epsilon.slu.se/37251/1/raberg-t-et-al-20250602.pdf.
[37] Energimyndigheten. *Statistikdatabas: Jordbrukets energianvändning (EN0202)*. URL: https://pxexternal.energimyndigheten.se/pxweb/sv/Energimyndighetens_statistikdatabas/Energimyndighetens_statistikdatabas__Officiell_energistatistik__Jordbrukets_energianvandning/EN0202_A_20251114-142128_v2.px/table/tableViewLayout2/?rxid=500b004e-7586-4511-91a7-c5f07d179919.
[38] Joakim Johansson. *Intervju Joakim Kolstad gård*. Intervju utförd av författarna. 2026.

[39] Energimyndigheten. *Statistikdatabas: Jordbrukets energianvändning (EN0119)*. URL: https://pxexternal.energimyndigheten.se/pxweb/sv/Energimyndighetens_statistikdatabas/Energimyndighetens_statistikdatabas__Officiell_energistatistik__Jordbrukets_energianvandning/EN0119_5.px/.
[40] Energy Information Administration. *Solar explained: Photovoltaics and electricity*. 2024. URL: https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php.
[41] Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut. *Variationer i mängden solstrålning*. URL: https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/stralning/variationer-i-mangden-solstralning.
[42] Energimyndigheten. *Så undersöker du förutsättningarna för solel*. 2026. URL: https://www.energimyndigheten.se/effektiv-energianvandning/guider/solelportalen/har-mitt-hus-ratt-forutsattningar/sa-undersoker-du-forutsattningarna/.
[43] Rasmus Luthander m. fl. *Photovoltaic self-consumption in buildings: A review*. 2015. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914012859.
[44] Faschrizal. *Synergy between Photovoltaic Power Generation and Electrical Vehicle Charging in Urban Energy Systems*. 2023. URL: https://uu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1749520&dswid=9512.
[45] Sobhan Dorahaki m. fl. *A robust optimization approach for enabling flexibility, self-sufficiency, and enviromental sustainability in a local multi-carrier energy community*. 2025. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261925007275.
[46] International Energy Agency. *An introduction to biogas and biomethane*. URL: https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane.
[47] Energiforsk. *More efficient use of biogas at waste water treatment*. 2018. URL: https://sv.overleaf.com/project/69ea19f08e35c005acbdf76e.
[48] Energimyndigheten. *Biogasproduktionen ökade i Sverige under 2024*. 2025. URL: https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2025/biogasproduktionen-okade-i-sverige-under-2024/.
[49] Christiana Honsberg och Stuart Bowden. *Basic Battery Operation*. URL: https://www.pveducation.org/pvcdrom/battery-basics/basic-battery-operation.
[50] Martin Andersson och Martin Hägerström. ”Sammanställning av utbildningsmaterial om reservkraft med inriktning dieselaggregat”. Examensarbete. URL: https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:850354/FULLTEXT01.pdf.
[51] Kent Mayer. *Elkraftnät Faktabok: Uppbyggnad, funktion, hjälp- och kringsystem*. 4. utg. Stockholm: kemaKonsult AB, 2026.
[52] Hans Hedlund. *Dimensionering av reservkraftsaggregat för kopplings- och transformatorstationer*. 2010. URL: https://www.svk.se/siteassets/5.jobba-har/dokument-exjobb/2010-dimensionering-av-reservkraft.pdf.
[53] Stockholm marin-& industrimotor AB. *Så dimensionerar du reservkraft korrekt: kVA, startströmmar och driftstid*. URL: https://smim.se/blogs/reservkraft-och-elverk/dimensionera-reservkraft-ratt-kva-startstrommar-drifttid.
[54] Svenska kraftnät. *Om ö-drift*. URL: https://www.svk.se/sakerhet-och-beredskap/elberedskap/om-odrift/.
[55] Lund University. *Kortslutning*. URL: https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOId=9206715&fileOId=9206716.
[56] Elinstallatören. ”Elektrikerns åskvarning: Blixtnedslag i datahall kan bli extremt kostsamt”. I: (). URL: https://www.elinstallatoren.se/2025/08/elektrikerns-askvarning-blixtnedslag-i-datahall-kan-bli-extremt-kostsamt/.

[57] Svenska kraftnät. *Spänningsstabilitet*. 2025. URL: https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-systemansvaret/kraftsystemstabilitet/spanningsstabilitet/.
[58] R. Serway, R. Beichner och J. Jewett. *Physics for scientists and engineers*. 5. utg. Philadelphia: Holt Rinehart & Winston, 2000.
[59] Pieter Tielens, Van Hertem och Dirk. "The relevance of inertia in power systems". I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2016). URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211501268X.
[60] J. D. Glover m. fl. *Power system analysis and design*. 7. utg. Cengage Learning, 2022.
[61] SEK Svensk elstandard. *Kabeldimensionering - Vägledning för dimensionering av ledningsnät för lågspänning*. 2023. URL: https://elstandard.se/documents/preview/2973701.
[62] SEK Svensk elstandard. *Elinstallationer för lågspänning – Utförande av elinstallationer för lågspänning*. 2023. URL: https://elstandard.se/documents/preview/2998601.
[63] MDPI. "Grid-forming inverter/droopcontrol study". I: *Sustainability* (). URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/15/11712.
[64] Senergia. *Inlägg 45 - Ödrift i praktiken*. 2025. URL: https://senergia.se/teknikblogg/inlagg-45-o-drift_i_praktiken/.
[65] Senergia. *Inlägg 42 – Jämförelse av EMS-lösningar*. 2025. URL: https://senergia.se/teknikblogg/inlagg43_jmf_av_ems/.
[66] Svensk solenergi. *Fem steg till beredskapsdrift*. URL: https://svensksolenergi.se/att-installera-solenergi/fem-steg/.
[67] Simon Iindroth. *Ödrift kompetenspass*. Ödrift kompentenspass på Sweco. 2026.
[68] Svenska kraftnät. *Tillfälliga driftomläggningar*. 2025. URL: https://www.svk.se/4a4c0d/siteassets/2.utveckling-av-kraftsystemet/systemansvar-o-elmarknad/kraftsystemhubben/informationsblad/tillfalliga-driftomlaggningar_infoblad_v1.1-2025-08-12.pdf.
[69] Energiforsk. *Felbortkoppling i mikronät*. 2023. URL: https://energiforsk.se/media/32767/2023-957-felbortkoppling-i-mikrona-t.pdf.
[70] ABB. *Intelligenta lösningar för elkraftdistribution Zon-konceptet*. URL: https://library.e.abb.com/public/dac4a817351941e3a8b7acbc3be4e5be/ZonKoncept_broch_756781_LRSVa.pdf?x-sign=ZA4szzf9zVIlw2M22I3hhJNQIjIGbwEfVXdTxpKZVmLREEzyrQqJoojiTaPAh8Tc.
[71] ABB. *Illustration grid version 4*. URL: https://resources.news.e.abb.com/attachments/published/37761/sv-SE/29BD72AF80B6/Illustration.pdf.
[72] Mälarenergi elnät AB. *Nätutvecklingsplan*. 2025. URL: https://www.malarenergi.se/globalassets/dokument/elnat/natutvecklingsplan-malarenergi-elnat-2025-2034.pdf.
[73] Simon Hedman. *Optimala placeringar av fjärrstyrda lastfrånskiljare och nätbrytare i distributionsnätet*. 2020. URL: https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/9e979357-18a7-4bbd-bb83-c05fc5e5677a/content.
[74] Vattenfall. *Mikronät tryggar elförsörjningen på Arholma*. URL: https://www.vattenfalleldistribution.se/var-verksamhet/vart-arbete/innovation/arholma/.
[75] Vattenfall. *Mikronät säkrar skärgårdsön från strömavbrott*. 2023. URL: https://www.vattenfall.se/fokus/trender-och-innovation/mikronat-arholma/.

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU kan publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver i sådana fall godkänna publiceringen. I samband med att du godkänner publicering kommer SLU även att behandla dina personuppgifter (namn) för att göra arbetet sökbart på internet. Du kan närsomhelst återkalla ditt godkännande genom att kontakta biblioteket.

Även om du väljer att inte publicera arbetet eller återkallar ditt godkännande så kommer det arkiveras digitalt enligt arkivlagstiftningen.

Du hittar länkar till SLU:s publiceringsavtal och SLU:s behandling av personuppgifter och dina rättigheter på den här sidan:

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

☒ JA, jag, Tilde Örn har läst och godkänner avtalet för publicering samt den personuppgiftsbehandling som sker i samband med detta

☒ JA, jag, Ellen Nymo har läst och godkänner avtalet för publicering samt den personuppgiftsbehandling som sker i samband med detta

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