

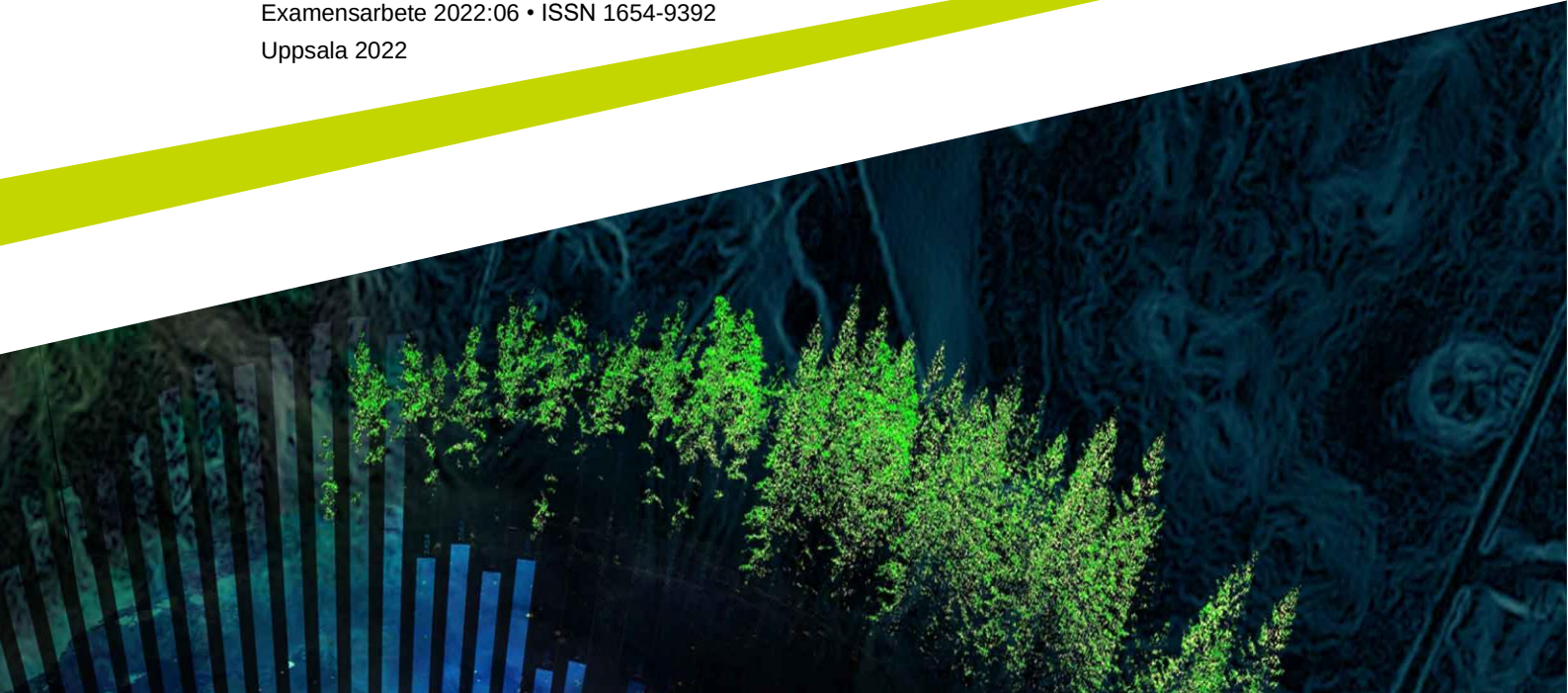


Modellering och simulering av ett robust och resilient biogassystem för ökad försörjningstrygghet

Modeling and Simulation of a Robust and
Resilient Biogas System to Ensure Security of
Supply

Lovisa Forsell och Katja Orrenius

Examensarbete • 30 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institutionen för energi och teknik
Civilingenjörsprogrammet i energisystem
Examensarbete 2022:06 • ISSN 1654-9392
Uppsala 2022



Modellering och simulering av ett robust och resilient biogassystem för ökad försörjningstrygghet

Modeling and Simulation of a Robust and Resilient Biogas System to Ensure Security of Supply

Lovisa Forsell och Katja Orrenius

Handledare: Martin Ahrne, Biodriv Öst AB
Ämnesgranskare: Åke Nordberg, Institutionen för energi och teknik, SLU
Examinator: Per-Anders Hansson, Institutionen för energi och teknik, SLU

Omfattning: 30 hp
Nivå och fördjupning: Avancerad nivå, A2E, teknik
Kurstitel: Examensarbete i energisystem
Kurskod: EX0724
Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem
Kursansvarig inst.: Institutionen för energi och teknik
Utgivningsort: Uppsala
Utgivningsår: 2022
Upphovsrätt: Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.
Serietitel: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)
Delnummer i serien: 2022:06
ISSN: 1654-9392
Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Nyckelord: biogasanläggning, energiberedskap, krisberedskap, förnybar elproduktion, energilagring

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Publicering och arkivering

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

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

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

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

Abstract

Within the Swedish defense there is a clear target when it comes to strengthening the country's emergency preparedness. In connection to this, there are demands when it comes to the security of supply of fuel and electricity. This project has mainly focused on ensuring the supply of biogas from the local biogas plant in Uppsala (Kungsängens gård) during different levels of electricity shortage. In order to ensure the supply of biogas, different additional energy systems and components have been examined. The studied energy systems and components were: intermittent electricity production, energy storages and electricity production on site. The intermittent electricity production originated from a solar power plant (corresponding to 250 kW_p) and a wind turbine (corresponding to 700 kW at most). Since intermittent electricity production is unpredictable and variable, a battery (corresponding to 800 kWh) was used. A fuel cell, using hydrogen as fuel, as well as a biogas engine, using raw biogas as fuel, were used separately to supply the remaining power load of the biogas plant. The hydrogen was produced via PEM electrolysis and was stored in a tank at 70 MPa. In addition, biogas was stored in liquid form by producing liquified biogas (LBG) from the biomethane production on site and storing the LBG in a tank. The LBG could then be converted to CBG (compressed biogas) whenever the biomethane production was insufficient. The energy systems and components were modelled and simulated using MATLAB as well as MATLAB Simulink in three different modes: normal operation (when the power supply from the grid is sufficient), island operation (when the power must be supplied via electricity production on site) and shortage situation (during a power outage or during power and capacity shortages). In addition, since the power need of the biogas plant depended on the amount of upgraded biogas being produced, three different cases depending on the fuel consumption of biogas buses and garbage trucks were modelled and simulated in island operation. The results revealed that the most reliable energy system in island operation was the one with a biogas engine, since most of the power need over a year was fulfilled as well as the (upgraded) biogas need (for the buses and the garbage trucks). The energy system containing a fuel cell was the most efficient in a shortage situation where only a small power need is fulfilled. Both systems could be useful in normal operation since they could supply some power during peak loads as well as contributing with heat production and oxygen production (in the case with an electrolyzer). In addition, the capacities of the fuel cell as well as the biogas engine in the island operation and the shortage situation differed vastly, which should be taken into account when determining what kind of system that is the most suitable and when. Furthermore, a brief economic analysis revealed that the investment as well as the operating costs for the studied systems and components are quite high. However, these investments must be put in relation to what that can be achieved in order to improve the resilience of the biogas plant and to ensure that fuel and electricity production is possible during times of crisis.

Populärvetenskaplig sammanfattning

Inom det svenska försvaret finns det mål gällande stärkt krisberedskap och i samband med detta ställs det krav på försörjningstryggheten i bland annat drivmedel- och elproduktion. Stora produktionsanläggningar samt elnätet, som sträcker sig över långa avstånd från produktion till konsumtion, är mycket utsatta system om krig skulle uppstå. Dessutom är långväga transporter och import av exempelvis drivmedel inte önskvärt utan bör ske i direkt anslutning till konsumtion. I anslutning till stora eller mindre städer finns produktionsanläggningar såsom biogasanläggningar. Vid biogasanläggningar produceras biogas, som främst används som drivmedel i personbilar och i större fordon såsom bussar, sopbilar etcetera, och biogödsel vilket används som gödselmedel. Biogasen produceras genom så kallad rötning av organiskt substrat då mikroorganismer bryter ner materialet och producerar främst metan och koldioxid (de huvudsakliga beståndsdelarna i biogas). Det finns potential och möjligheter för att göra anläggningar såsom biogasanläggningar mer motståndskraftiga och robusta i tider av kris och bristsituationer och på så sätt säkra en del av energiförsörjningen lokalt.

Denna studie har utgått från förhållanden vid biogasanläggningen vid Kungsängens gård i Uppsala, som ägs av Uppsala Vatten & Avfall. Denna biogasanläggning producerar och uppgraderar biogas (renar gasen från koldioxid för att öka energiinnehållet i gasen) som sedan används främst som drivmedel i fordon. Biogasanläggningens elbehov försörjs i dagsläget av elnätet. När effektleveransen från elnätet inte är tillräcklig, måste elbehovet försörjas på annat vis. Detta kan ske vid exempelvis strömavbrott eller om effekten inte kan levereras till följd av effektbrist eller att kapaciteten hos elnätets kablar är maximerad (också känt som kapacitetsbrist). Denna studie har som mål att undersöka hur biogasproduktionen från biogasanläggningen kan säkerställas vid olika nivåer av störningar. Med olika nivåer av störningar menas om elnätets effektförsörjning är instabil (vid strömavbrott eller effekt- respektive kapacitetsbrist) respektive om elnätet inte kan förse elbehovet överhuvudtaget. För att tillgodose elbehovet hos biogasanläggningen har bland annat elproduktion från intermittenta energikällor, i detta fall sol- och vindkraft, studerats. Problemet med intermittenta energikällor är att elproduktionen inte alltid matchar elbehovet, också kallat lasten. Det är dock möjligt att ändå nyttja elproduktionen och senarelägga användningen genom ett batteri. Batteriet laddas med elenergi när produktionen överstiger behovet och laddas ur när behovet överstiger elproduktionen. Däremot är den intermittenta elproduktionen tillsammans med ett batteri inte tillräcklig för att tillgodose det totala elbehovet hos anläggningen. Därför behövs det ytterligare enheter som kan producera el och i detta arbete studerades en biogasmotor (som producerar el från biogas) respektive en bränslecell (som producerar el från vätgas). Utöver att säkra elförsörjningen till anläggningen med hjälp av nämnda komponenter, finns även andra möjligheter till att öka resiliensen. Energilagring via nyttjandet av ett batteri är ett exempel på hur ökad resiliens kan uppnås. I samband med detta studerades även vätgaslagring och så kallad LBG-lagring. Den typ av vätgasproduktion som studerats i detta arbete var elektrolys, där vatten spjälkas till vätgas och syrgas genom en kemisk redoxreaktion i en så kallad elektrolysör som drivs av en elektrisk ström. Den elektriska strömmen tillförs antingen genom elnätet eller genom intermittent energiproduktion, i detta fall solkraftanläggningen. Med LBG däremot menas "Liquified Biogas" som är biogas som har uppgraderats och förvätskas genom nedkyllning av gasen. LBG kan omvandlas till komprimerad biogas, eller CBG, genom LCBG-teknik (som står för "liquid to compressed biogas") för att användas som drivmedel i fordon. LBG-produktionen kan ske genom att uppgradera och förvätska en del av den biometan som produceras vid anläggningen alternativt den biogas som annars kommer att "facklas". Att "fackla" innebär att en del av den producerade biogasen måste förbrännas på plats till följd av driftfel, exempelvis när det uppstår

problem med uppgraderingstekniken på anläggningen.

Som tidigare nämnts har olika nivåer av störningar studerats och dessa benämns som ö-drift (då elnätet inte kan tillgodose elbehovet hos anläggningen överhuvudtaget) och bristsituation (när strömbrott sker eller vid effekt- respektive kapacitetsbrist). I denna studie har ovan beskrivna system och komponenter modellerats i två uppsättningar för dessa två nivåer av störningar. I den första uppsättningen ingår en solkraftanläggning, ett vindkraftverk, ett batteri, en bränslecell och ett LBG-lager. I den andra uppsättningen ingår samma komponenter men bränslecellen har istället bytts ut mot en biogasmotor. Därtill har även ett ytterligare driftfall undersökts, nämligen normal drift. Med normal drift menas att elnätet kan försörja det totala elbehovet för biogasanläggningen utan problem. Under normal drift undersöks hur respektive system kan bidra till att sänka lasttoppar på elnätet (när elnätet är som mest belastat) samt hur stora mängder av biprodukter (värme och syrgas) som kan produceras och därmed säljas vidare. I driftfallen med störningar behövde hänsyn tas till att elbehovet hos anläggningen beror av hur mycket uppgraderad biogas som ska produceras (detta avgörs av elbehovet för uppgradering av gasen samt tankning av fordon) och därför undersöktes tre olika fall där antalet bussar, och därmed bränsleförsörjningen, varierades mellan 60, 90 och 120 st. Ju fler bussar och ju större behov av uppgraderad biogas, desto större elbehov.

Resultaten visade att båda systemen kan nyttjas i samtliga tre driftfall. Däremot är fördelarna och nackdelarna med respektive system olika när det kommer till främst ö-drift och bristsituation. Systemet med en bränslecell kunde uppfylla anläggningens elbehov i ö-drift som mest under de 300 första timmarna av årets totalt 8 760 timmar. Bränslecellens prestation avgörs av hur mycket vätgas som finns lagrad i vätgaslagret och maxkapaciteten hos bränslecellen. Däremot, i bristsituation (då endast 5, 10, 15 och 20 % av elbehovet skulle tillgodoses) kunde bränslecellen uppfylla behovet betydligt fler timmar och i vissa fall kunde behovet förses under hela året. På samma sätt som i ö-driftsfallet beror också maxkapaciteten hos bränslecellen av elbehovet och kapaciteten blev ungefär fyrdubblad i fallet då 20 % av elbehovet skulle tillgodoses jämfört med då 5 % av elbehovet skulle förses. I systemet med en biogasmotor kunde samtliga behov uppfyllas samtliga timmar under året i bristsituationen. Maxkapaciteten hos biogasmotorn förhöll sig på samma sätt till elbehovet som för bränslecellen och blev alltså högre vid ett ökat behov, vilket var väntat. I ö-drift kunde systemet med en biogasmotor förse hela eller ungefär 90 % av det totala elbehovet under året. Det förekom ett fåtal timmar, sett till det totala behovet, då fordonsgasbehovet respektive elbehovet inte kunde tillgodoses. Eftersom biogasmotorn drivs av rågas som produceras vid anläggningen och som också ska användas för att förse biogasbehovet hos bussar och sopbilar, finns det en viss konkurrens emellan dessa ändamål (elproduktion respektive drivmedelsproduktion). Däremot, kan ett LBG-lager användas i båda systemen för att förse biogasbehovet hos bussar och sopbilar vid de fall då det sker driftstopp eller om otillräcklig mängd substrat för rötning levereras till biogasanläggningen. Således, för att uppnå ökad resiliens vid anläggningen kan systemet med en bränslecell användas i bristsituation medan ett system med en biogasmotor kan användas i ö-drift alternativt i bristsituation. LBG-produktion och lagring är fördelaktigt i båda systemen och möjliggör mer stabil försörjning av biogas som drivmedel i bussar och sopbilar.

En mindre ekonomisk analys genomfördes där det visade sig att vätgassystemet innebar högst kostnader (bränslecellen och vätgaslagret utgjorde de mest kostsamma komponenterna). Biogasmotorn och elektrolysören innebar liknande investeringskostnader. Däremot måste investeringar och kapaciteter sättas i ett större perspektiv och i förhållande till vilka möjligheter dessa komponenter bidrar med för att öka resiliensen samt för att göra biogasanläggningen mer robust i tider av kris och i bristsituationer.

Exekutiv sammanfattning

I denna studie har förutsättningarna och möjligheterna för att göra biogasanläggningen vid Kungsängens gård mer motståndskraftig i tider av kris och bristsituationer undersökts. Ett antal kompletterande energisystem och komponenter har studerats. Dessa inkluderar intermittent elproduktion (sol- och vindkraft), energilagring (batteri, vätgaslager och LBG-lager) och ytterligare elproduktion i anslutning till biogasanläggningen (kraftvärmeproduktion genom biogasmotor och bränslecell). Systemen har modellerats och simulerats i tre olika driftfall: normal drift, ö-drift och bristsituation (då strömbrott sker alternativt vid problematik rörande effekt- och kapacitetsbrist). Ett system bestående av intermittent elproduktion, batteri och vätgassystem, det vill säga med elektrolysör, vätgaslager och bränslecell, visade sig vara mest fördelaktigt i bristsituation. Detta eftersom bränslecellen, med den vätgasproduktion som undersöktes, lyckades förse det totala elbehovet hos anläggningen i ö-drift (på timbasis över ett år) i endast 150-300 timmar, men under bristsituation kunde behovet förses samtliga (8 760 timmar) eller flera tusen timmar i de flesta fall. Det andra systemet med intermittent elproduktion, batteri och biogasmotor visade sig vara fördelaktigt i både bristsituation och ö-drift. Systemet kunde förse det totala elbehovet hos anläggningen samtliga eller majoriteten av årets timmar samtidigt som fordonsgasbehovet säkrades större delen av tiden i ö-drift. Därtill kan LBG-produktion och lagring vara fördelaktigt i kombination med dessa system i ö-drift för att säkra fordonsgasbehovet vid driftstopp alternativt då substratmängden för biometanproduktion inte är tillräcklig. Samtliga system innebär stora investeringar, däremot bör detta sättas i perspektiv till möjligheterna och framförallt säkrandet av energiförsörjning och bidrag till samhällsviktiga verksamheter under kris- och bristsituationer.

Förord

Detta arbete hade inte varit möjligt att utföra utan det stöd och den hjälp vi fått från vår ämnesgranskare Åke Nordberg (Sveriges lantbruksuniversitet) och vår handledare Martin Ahrne (BioDriv Öst), stort tack till er. Vi vill även tacka vår kontakt på Uppsala Vatten & Avfall - Olle Levin för att du varit så behjälplig och svarat på alla våra frågor och bidragit med en stor del av den data som arbetet kretsat kring. Tack också till Beatrice Torgnyson Klemme (BioDriv Öst) för att vi fick chansen att utföra denna intressanta och viktiga studie. Vi vill också tacka Linus Engstam (Sveriges lantbruksuniversitet), Leandro Janke (Sveriges lantbruksuniversitet) och Erik Nordell (Tekniska verken) för er hjälpsamhet i vårt arbete. Slutligen vill vi tacka Tor Thomsson för att du varit en givande diskussionspartner och för det goda samarbete vi haft.

Fördelning av arbete

Detta examensarbete har utförts av två civilingenjörsstudenter i energisystem vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Fördelningen av arbetet har skett enligt följande. Katja Orrenius har utfört litteraturstudier relaterat till främst vätgasproduktion och lagring, solceller och solkraftanläggningar samt batterier. Katja Orrenius har också framställt modeller i MATLAB Simulink och simuleringar för solkraftanläggningen och vätgaslagret samt beräkningar i anslutning till dessa. Lovisa Forsell har utfört litteraturstudier relaterat till främst biogasmotorer för kraftvärmeproduktion, bränsleceller och LBG-produktion samt LBG-lagring. Lovisa Forsell har också framställt modeller i Simulink och simuleringar för LBG-produktion och LBG-lagring samt vindkraftverk och beräkningar i anslutning till dessa.

Katja Orrenius och Lovisa Forsell har gemensamt framställt modellen för elektrolysören samt skrivit algoritmer i MATLAB för simulering av batteri, biogasmotor, bränslecell och de tre olika driftlägena (normal drift, ö-drift och bristsituation). Därtill har resultaten som presenteras simulerats efter gemensam dialog. Diskussionen kring resultaten utfördes gemensamt där båda bidrog i lika stor mån.

Katja Orrenius och Lovisa Forsell har bidragit till rapportskrivandet i samma utsträckning. Båda har haft personlig kontakt med dem som listas i källförteckningen samt anges i förordet och båda har samlat in betydelsefull data för resultatframtagning.

Förkortningar och definitioner

Rågas - biogas som varken uppgraderats eller trycksatts

CBG - "Compressed Biogas", uppgraderad och komprimerad biogas, kallas också fordonsgas

LBG - "Liquefied Biogas", uppgraderad biogas som genomgått förvätskning

Boil-off eller NER (Net Evaporation Rate) - avkok, när förvätskad LBG återgår till gasform vilket sker i LBG-lager

Normal drift - i denna studie innebär begreppet att elenergiförsörjningen från elnätet är obegränsad

Ö-drift - i denna studie innebär begreppet att elnätet inte kan förse elbehovet

Bristsituation - i denna studie innebär begreppet att elbehovet till största del kan förses genom effekt från elnätet, men en viss andel måste förses genom produktion på plats

Innehåll

1 Inledning	1
1.1 Syfte	1
1.2 Mål	2
1.3 Frågeställningar	2
1.4 Genomförande och avgränsningar	2
2 Bakgrund	3
2.1 Energiberedskap	3
2.2 Biogasanläggningen vid Kungsängens gård	4
3 Teoretisk bakgrund till studerade komponenter och system	6
3.1 Solceller och paneler	6
3.2 Vindkraft	7
3.3 Batterier	8
3.4 Produktion och lagring av vätgas	9
3.5 Biogasmotor för kraftvärmeproduktion	12
3.6 Produktion och lagring av LBG	12
4 Metod	14
4.1 Systembeskrivning	15
4.2 Data	17
5 Modeller	18
5.1 Modellering energisystem	18
5.1.1 Solkraft	18
5.1.2 Vindkraft	19
5.1.3 Batteri	19
5.1.4 Elektrolysör	20
5.1.5 Vätgaslager	21
5.1.6 Bränslecell	21
5.1.7 Biogasmotor	21
5.1.8 LBG	21
5.2 Modell normal drift	22
5.2.1 Elbehov	22
5.2.2 Avlastning elnät	23
5.2.3 Sol, vind och vätgas	23
5.2.4 Sol, vind och biogasmotor	25
5.2.5 LBG	25
5.3 Modell ö-drift	26
5.3.1 Elbehov och fordonsgasproduktion	26
5.3.2 Sol, vind, batteri och vätgas	27
5.3.3 Sol, vind, batteri och biogasmotor	28
5.3.4 LBG	29
5.4 Modell vid bristsituation	30
6 Resultat	30
6.1 Normal drift	30
6.1.1 Sol, vind och vätgas	30

6.1.2 Sol, vind och biogasmotor	32
6.1.3 LBG	32
6.2 Ö-drift	33
6.2.1 Sol, vind, batteri och vätgas	33
6.2.2 Sol, vind, batteri och biogasmotor	35
6.2.3 LBG	36
6.3 Bristsituation	38
6.3.1 Sol, vind, batteri och vätgas	38
6.3.2 Sol, vind, batteri och biogasmotor	39
6.4 Ekonomi	40
7 Kärlighetsanalys	42
8 Diskussion	43
8.1 LBG	43
8.2 Biogasmotor	44
8.3 Intermittenta energikällor och batteri	45
8.4 Elektrolsör och bränslecell	45
8.5 Kärlighetsanalys	46
8.6 Ekonomi	46
8.7 Rekommendation för ökad resiliens	46
8.8 Val av metod	47
8.9 Felkällor	47
9 Slutsats	48
9.1 Vidare studier	50
10 Litteraturförteckning	51
10.1 Personlig kommunikation	56
11 Appendix	56
11.1 A	56
11.1.1 A.1	56
11.1.2 A.2	57

1 Inledning

Inom det svenska försvaret finns en tydlig målsättning gällande att stärka landets krisberedskap. I samband med detta ställs det krav på försörjningstryggheten i livsmedel, drivmedel och el. När det kommer till att öka försörjningstryggheten är energiberedskap ett centralt begrepp. Med detta menas att kunna säkra samhällets energiförsörjning under brist- och krissituationer vilket i praktiken kan innebära att elnätet inte kan prestera som det normalt gör och att försörjningen av drivmedel etcetera är i riskzon. Utbredda och storskaliga energisystem såsom produktionsanläggningar och elnätet är mycket utsatta system om exempelvis krig skulle uppstå.

För att kunna säkra försörjningen lokalt och regionalt krävs att de etablerade energisystemen ses över och att dessa utvärderas för att kunna öka resiliensen. Att förlita sig alltför mycket på import och långväga transporter av drivmedel och energikällor är inte önskvärt om en brist- eller krissituation skulle uppstå. För att stärka resiliensen krävs att Sverige minskar importberoendet och istället ökar användandet av lokala drivmedel och energikällor. Förnybara energikällor och drivmedel är centralt för att Sverige både ska kunna förbättra sin krisberedskap och samtidigt uppnå de svenska miljö- och energimålen.

Lokala produktionsanläggningar i anslutning till städer och kommuner har potential när det kommer till att minska importberoendet och att möjliggöra lokal energiförsörjning. En biogasanläggning är ett exempel på dessa anläggningar. Vid en biogasanläggning finns det ofta outnyttjade ytor som istället skulle kunna användas för exempelvis intermittent elproduktion. En biogasanläggning i kombination med exempelvis förnybar elproduktion, vätgasproduktion och lagring skulle bidra till ökad resiliens och minskat beroende av import. Detta för att kunna garantera att systemet är tillförlitligt och kan säkra försörjning vid mildare och svårare bristsituationer samt vid ö-drift.

Detta arbete har utgått från förutsättningarna hos biogasanläggningen vid Kungsängens gård i Uppsala. Eftersom Uppsala har en medelstor biogasanläggning och staden är jämförbar respektive har liknande väderförhållanden som många andra städer i Sverige och med problematik kring effekt- och kapacitetsbrist, anses just Uppsala kunna representera ett slags "medel" för många av Sveriges städer idag och i framtiden. De energisystem och komponenter som studerats i detta arbete anses vara implementerbara idag med marginal fram till 2030. Ett alltför långt framtidsperspektiv försvårar val av system och deras förutsättningar samt brister.

1.1 Syfte

Syftet är att genom modellering och simulering utreda vad som krävs för att säkerställa en biogasanläggnings drift och produktion av fordonsgas då olika nivåer av störningar uppstår. Olika energisystem och komponenter simuleras i olika driftlägen. Studien omfattar huvudsakligen två driftsituationer, det vill säga ö-drift respektive då elnätet är överbelastat eller då det sker strömavbrott (härefter benämnt som bristsituation). Samtidigt bör systemen som presenteras också kunna bidra i situationer som kan ses som "normala", härefter benämnt som normal drift, för att på så vis även visa på behov och möjligheter för systemen i dessa fall. Dessutom undersöks systemens potential att bidra med samhällsnyttiga tjänster, såsom syrgas och värme.

1.2 Mål

Det huvudsakliga målet med detta arbete är att ge förslag på hur energisystem kan utformas för att göra biogasanläggningen vid Kungsängens gård mer resilient och säkerställa drift samt försörjning av fordonsgas vid olika nivåer av störning.

1.3 Frågeställningar

Frågeställningarna baseras på syftet och målet med denna rapport och är uppdelade i en huvudfrågeställning och fyra delfrågeställningar. Huvudfrågeställningen lyder enligt:

- Hur ska en biogasanläggning och ett lokalt biogassystem utformas för att kunna bidra till en ökad lokal resiliens?

Delfrågeställningarna lyder enligt följande:

- Vad krävs i termer om lager och produktion för att en biogasanläggning ska kunna drivas i ö-drift och hur länge fungerar systemet i ö-drift?
- Hur kan maximal kapacitet och nytta för respektive produktion uppnås i normal drift?
- Vad krävs för att kunna nyttja ett oförutsägbart och instabilt elnät?
- Vilka kostnader kan relateras till de förändringar som krävs för att skapa detta system?

1.4 Genomförande och avgränsningar

Denna studie har baserats på en utförlig litteraturstudie samt modellering respektive simulering av olika energisystem vid olika driftlägen. I litteraturstudien undersöktes vilka system och komponenter som ansågs vara relevanta för studiens syfte och mål. Litteraturstudien lade grunden för modellerings- och simuleringsstegen samt diverse antaganden och avgränsningar. Modelleringssteget utfördes med hjälp av programmet MATLAB där algoritmer för de tre driftlägena och matematiska modeller för vissa komponenter skapades. Simuleringsmodeller skapades för resterande komponenter i MATLAB Simulink (R2021a) av MathWorks. Utifrån simuleringsmodellerna tillsammans med matematiska modeller sammansattes olika energisystem som sedan testades i tre olika driftlägen; normal drift, ö-drift och bristsituation. Normal drift innebär att biogasanläggningen inte har begränsad energitillförsel, ö-drift innebär att biogasanläggningen endast har tillgång till egenproducerad el och bristsituation innebär att en andel av elbehovet måste tillgodoses från egenproducerad el på grund av effekt- och kapacitetsbrist eller strömavbrott. Samtliga simuleringar och scenarier har utförts på timbasis. Mer information om ovanstående finns i avsnitten *Metod* och *Modeller*.

Avgränsningar

Då detta arbete avser att simulera energisystem i olika situationer, det vill säga vid normal drift, vid bristsituation samt ö-drift, sker simulering av dessa olika situationer för ett år vardera. Därmed simuleras normal drift och produktion under ett år för att sedan simulera ö-drift respektive bristsituation. Detta innebär att de lager som byggs upp avser produktion under endast ett år och inte flera. Energibehovet som undersöks i denna studie utgår från anläggningens elbehov, inte värmebehovet. En ytterligare avgränsning berör reningsverket kallat Kungsängsverket i Uppsala. Biogasen som produceras i reningsverket uppgraderas i dagsläget vid Kungsängens gård och den totala biogasproduktionen från biogasanläggningen är på så vis större än om endast biogasen från Kungsängens gård skulle räknas med. Reningsverkets elbehov tas inte hänsyn till utan antas kunna förses med elkraft från annat håll

än det som avses att produceras på plats vid Kungsängens gård. Detta eftersom fokus i detta arbete ligger på Kungsängens gård och elbehovet för anläggningen tillsammans med annan verksamhet (tankstationer och tankning av bussar). Det slutgiltiga målet är inte att hela samhället ska kunna försörjas utan snarare vad som är möjligt att producera och vad som prioriteras för att försäkra fordonsgasförsörjning. Vid ö-drift med biogasmotor tas inte hänsyn till att det blir en minskning i anläggningens totala elbehov, som inkluderar tankning vid tankstation 3 och 4 (vid Kungsängens gård respektive Librobäck), när rågas istället används i biogasmotorn och inte avses att komprimeras vid tankstationerna. Däremot tas hänsyn till skillnaden i elbehov vid bussdepån då denna anses ha större påverkan. Vid försäljning av syrgas tas inte hänsyn till något tillfälligt lager av gasen innan försäljning. Detta då syrgasen antas kunna levereras omgående och inte kräva några större resurser eller kostnader.

2 Bakgrund

I detta avsnitt beskrivs först begreppet energiberedskap och vad det innebär. Därefter beskrivs biogasanläggningen vid Kungsängens gård vars produktion och förutsättningar arbetet har utgått från.

2.1 Energiberedskap

Energiberedskap handlar om att säkra samhällets energiförsörjning under brist- och krissituationer. Enligt rapporten “Motståndskraft” av Försvarsdepartementet är el, olja, drivmedel och fjärrvärme viktiga faktorer för försörjning av det svenska samhället. Så som energiförsörjningen ser ut idag fungerar systemet väl i tider av fred, men systemen är känsliga vid attacker mot Sverige (Försvarsdepartementet 2017). Bland samhällsviktiga funktioner hör elförsörjningen. Försvarsberedningen konstaterar att oberoende reservkraftförsörjning är en viktig faktor hos samhällsviktiga verksamheter. Dessutom kan reservverk för enskilda hushåll bli av vikt för egen försörjning. Försvarsberedningen konstaterar också att ett flertal av de samhällsviktiga verksamheterna idag inte har tillgång till reservkraft samt att uthålligheten i den reservkraft som finns är ofta undermålig. Försvarsberedningen anser vidare att det “kan finnas behov av att skapa ökade förutsättningar för lokal produktion och distribution av el som exempelvis genom lokala kraftverk”. För att avgöra prioritering av verksamheter vid brist av el har begreppet styrel framtagits. Försvarsberedningen tillägger att arbetet med framtagandet av rutiner och strukturer är väsentligt för att avgöra prioritering och ransonering i beredskapsläge (Sveriges Riksdag 2019).

Begreppet trygg energiförsörjning är något som diskuteras i samband med energiberedskap. Enligt Energimyndigheten (2022a) ska trygg energiförsörjning förhindra och mildra de negativa följderna för samhället och energianvändarna till följd av störningar och avbrott i tillförseln. Denward et al. (2019) anger i sin rapport “Sektorsansvar och energiberedskap” för FOI (Totalförsvarets forskningsinstitut) att de potentiella hot som finns mot energiförsörjningen av samhället är; “naturolyckor, tekniska fel, handhavandefel, marknadsstörningar, fysisk antagonism samt effekter av andra länders handels-, utrikes- och säkerhetspolitik”. För att lindra konsekvenserna av störningar anger Denward et al. (2019) flexibilitet, redundans och lagring som tre vitala faktorer hos energisystem. Begreppet flexibilitet innebär i detta fall hur utbytbara energislag och leverantörer är, vilket alltså är kopplat till ett minskat beroende av specifika energislag, anläggningar och leverantörer. Redundans innebär bland annat så kallade “parallella distributionskanaler” såsom ledningar och transportlösningar för drivmedel. Lagring innebär både på kort och lång sikt ett skydd mot störningar.

Bland de lösningar som kan implementeras för att säkra energiförsörjningen anger Denward et al. (2019) följande: "Ökad och bibehållen tillförlitlighet i systems enskilda komponenter, ökad redundans i olika distributionssystem, ökad diversitet i energitillförseln när det gäller energislag, tillförselmöjligheter (till exempel bränsleterminaler) och energileverantörer, ökad flexibilitet hos slutanvändarna (till exempel bränsleflexibla fordon), inhemsk produktionskapacitet, lagringskapacitet, backupsystem såsom till exempel reservkraftaggregat och fysiskt skydd".

För att avgöra vilka system och komponenter som bör implementeras vid biogasanläggningen vid Kungsängens gård, har främst flexibilitet och lagringsmöjligheter diskuterats. Flexibilitet kan uppnås genom att möjliggöra produktion av vätgas från biogas och vice versa genom metanisering och ångreforming. Dessutom möjliggörs elproduktion på plats vid anläggningen genom intermittenta energikällor, bränslecell och biogasmotor. Lagringsmöjligheter av vätgas i komprimerad form och uppgraderad biogas i flytande form är också möjligt. Därtill är batterier en möjlighet.

2.2 Biogasanläggningen vid Kungsängens gård

Uppsala Vattens biogasanläggning vid Kungsängens gård ligger ungefär 2,5 km sydost om Uppsala centrum. Biogasanläggningen uppfördes år 1996 och vid anläggningen produceras biogas som främst används för fordon (främst stads- och regionbussar) och biogödsel som sprids på åkrar omkring Uppsala. Biogasen produceras genom rötning av organiskt material. Materialet delas in i hushållsavfall (från hushåll, restauranger, storkök och handel) och industriavfall (slakteriavfall och avfall från livsmedelsförädling). Avfallet transporteras till anläggningen med sop- och lastbilar. Därefter överförs avfallet till tippfickor, tippficka 1 och 2, på anläggningen och avfallet delas upp i flytande och fast avfall. Från tippfickorna transporteras sedan avfallet till förbehandlingslinjer där avfallet sönderdelas och påsar respektive förpackningar öppnas upp för att frigöra det organiska materialet. I den ena förbehandlingslinjen, linje 1, avskiljs metallföremål genom en magnetavskiljare. I nästa steg avskiljs plaster och andra föroreningar i en separatorekvarn. I detta steg sönderdelas avfallet ytterligare tills att en partikelstorlek på mindre än 12 mm uppfylls hos materialet. Det finns också en ytterligare förbehandling som används i andra hand där organiskt avfall tillförs tippficka 3 och 4. Tippficka 3 tar emot källsorterat organiskt hushållsavfall där materialet genomgår en påsöppnare och därefter en trumsikt. I trumsiktet avlägsnas emballage och felsorterat avfall. Matavfallet transporteras vidare till tippficka 4 genom skruvtransportörer. Tippficka 4 har fyra bottentransportörer som antingen används för att blanda om avfallet eller att tömma tippfickan. I tippficka 4 blandas allt fast material och därefter transporteras det till omblandningstankar via transportskruvar. I omblandningstankarna späds materialet tills att en torrsustansnivå på 15 % uppnås. När detta steg har färdigställts, sönderdelas materialet återigen tills att en partikelstorlek på 1-5 mm uppnås. Detta sker i en dispergeringsmaskin. Sedan filtreras materialet genom ett silgaller. I nästa steg sker pumpning av materialet till bufferttank för lagring innan materialet går in för rötning. Innan rötning sker måste dock materialet genomgå hygienisering i en av de tre hygieniseringstankar som finns på anläggningen. Materialet transporteras via värmeväxlare. Hygiensieringsteget sker genom att ånga tillsätts och detta steg pågår under minst en timme. Temperaturen för hygienisering måste överstiga 70 °C. Därefter sker rötning av substratet i rötkammaren efter att substratet genomgår en silning en sista gång (detta för att avlägsna all plast). Vid rötning bryter mikrober ner substratet i anaerob miljö. I biogasanläggningen vid Kungsängens gård sker termofil rötning vilket innebär en temperatur på 52 °C. Substratet i rötkammaren blandas kontinuerligt genom omrörning. Biogasen produceras både i rötkammare och i rötrestlager och upptas

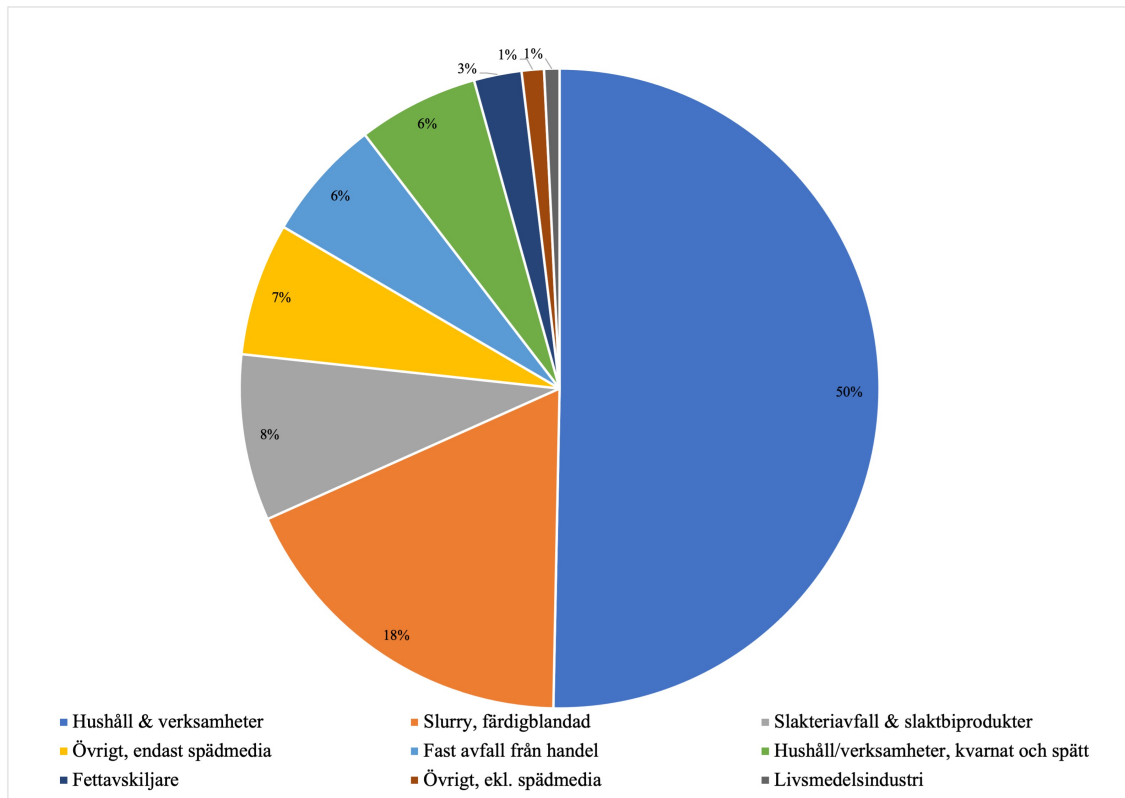
genom en gasdom. Därefter leds gasen till en vattenkyld gaskylare, för att kyla gasen som kan ha en temperatur över 50 °C, och vidare till gasuppgradering. En gasklocka används för att utjämna tryck och flöde i systemet. Gasklockan fungerar därmed som en buffert och från gasklockan transporteras gasen till en gasuppgraderingsanläggning. Under gasuppgraderingen sker en höjning av metanhalten till över 97 % genom att avlägsna koldioxid. När gasen uppgraderats transporteras den vidare till tankstationer via gasledningar (Uppsala Vatten och Avfall AB 2021).

Utöver den RTO som används för metanslipp, används även gasfackla för förbränning av biogas vid exempelvis driftstörningar, såsom problem med gasuppgraderingen och gasöverskott. Fullständig förbränning säkras genom hög temperatur i facklan (Uppsala Vatten och Avfall AB 2021).

Under 2019 färdigställdes den gasledning som sammankopplar Kungsängsverket med Kungsängens gård. Gasledningen möjliggör överförandet av rågas och främst transporteras gasen från Kungsängsverket till Kungsängens gård. Under samma år tillsattes en ny tankstation för fordonsgas vid Kungsängens gård. Året därpå, under hösten 2020, togs en ny gasledning mellan Kungsängens gård och den nya bussdepån i Fyrislund i drift där samtliga stadsbussar numera tankas (Uppsala Vatten och Avfall AB 2021).

Kungsängens gård har tillstånd att behandla 50 000 ton material (gödsel, slakteriavfall, livsmedelsavfall etcetera från industrier, handel, storkök och hushåll) och under 2020 behandlades ca 49 870 ton slakteriavfall och livsmedelsavfall etcetera. Av detta stod material från hushåll och verksamheter för 25 089 ton, färdigbehandlad slurry (extern) stod för 8 976 ton, slakteriavfall och slaktbiprodukter stod för 4 192 ton, fast avfall från handel stod för 3 070 ton, kvarnat och spätt avfall från hushåll och verksamheter stod för 3 046 ton, fettavskiljare stod för 1 201 ton, övriga restprodukter exklusive spädmedia stod för 561 ton, övriga restprodukter med endast spädmedia stod för 3 347 ton och livsmedelsindustrin stod för 387 ton. Anläggningen producerade 6,9 miljoner Nm³ biogas där 82,5 % användes som fordonbränsle, 10 % användes för intern uppvärmning och 7,5 % avfacklades (Uppsala Vatten och Avfall AB 2021).

I Uppsala län existerar gasfordon och gasinfrastruktur. Antalet gasbilar år 2019 motsvarade 1 120 stycken och antalet gaslastbilar var totalt 213 stycken (inkluderar både lätta och tunga). Antalet gasbussar var 122 stycken (Biogas Öst u.å.).



Figur 1: Diagrammet visar den procentuella fördelningen av inkommande material för rötning år 2020. Data erhållen från Uppsala Vatten och Avfall AB (2021).

3 Teoretisk bakgrund till studerade komponenter och system

I detta avsnitt beskrivs teorin till energisystemen och komponenterna som undersökts i detta arbete. Avsnittet börjar med att beskriva de intermittenta energikällorna och batterier. Därefter beskrivs produktionen och lagring av vätgas, biogasmotorer och slutligen produktion och lagring av LBG.

3.1 Solceller och paneler

I Sverige har ändamål för solenergi utvecklats till att bli både tekniskt genomförbara och ekonomiskt lönsamma källor till förnybar energi. Detta tack vare utvecklingen av globala ändamål för solenergi och med hjälp av subventioner från myndigheter. I Sverige finns ett antal olika nationella system för subventioner för att uppmuntra till nya installationer av solcellsteknologi. Även faktorer som minskade priser för solcellsanläggningar, hög popularitet hos allmänheten, ökande intresse hos samhällsservice och arbete hos myndigheter för att förenkla reglerna för mikroproducenter har bidragit. I Sverige var den totala installerade kapaciteten år 2019 689 MW_p, vilket motsvarade 0,4 % av den totala elförbrukningen. Energimyndigheten har föreslagit att 5-10 % av den totala elförbrukningen kan komma från solceller år 2040. Större delen av den installerade kapaciteten står enfamiljshus och kommersiella byggnader för (65 %) medan centraliserade solkraftanläggningar representerade en betydligt lägre andel, ungefär 8 % (Yang et al. 2020).

De typer av solceller som är vanligast på marknaden är mono- och polykristallina solceller samt tunnfilmssolceller. Mono- och polykristallina solceller görs bland annat av kisel. Skill-

naderna mellan dessa är att monokristallina solcellsmoduler oftast är svarta i färgen och utgörs av celler med rundade kanter medan polykristallina solcellsmoduler oftast har blåaktiga solceller och utgörs av rektangulära celler. Verkningsgraden hos monokristallina celler kan vara något högre än polykristallina solceller. För monokristallina solcellsmoduler ligger verkningsgraden vanligtvis mellan 15-22 % medan den för polykristallina solcellsmoduler ligger mellan 15-17 %. Däremot är kostnaden för monokristallina solcellsmoduler högre än för polykristallina solceller. Den tredje typen, tunnfilmssolceller, har en något lägre modulverkningsgrad, motsvarande 10-16 %. Denna typ är mindre vanlig jämfört med kristallina solceller och generellt sett är en anläggning med tunnfilmssolceller också dyrare än om det vore kiselceller. Fördelen med tunnfilmssolceller är den låga materialåtgången och att de är böjbara, vilket gör att placeringen av dem kan vara mer flexibel jämfört med kristallina solceller. Däremot kan de innehålla kadmium, vilket är ett miljöfarligt ämne. Några solceller som är under utveckling är perovskitsolceller, dye-sensitized solceller (DSSC) samt nanotrådbaserade solceller. Tekniken hos dessa är under utveckling men det finns potential för att öka verkningsgraden, minska materialanvändningen och minska kostnaden hos solceller (Energimyndigheten 2019).

Solceller består huvudsakligen av ett halvledarmaterial, som exempelvis kisel. Halvledarmaterialet konverterar solljus till elektrisk energi genom strukturen hos deras elektronenergini-våer: Valensband och ledningsband. Skillnaden i energi mellan det övre lagret i valensbandet och det nedre lagret i ledningsbandet är känt som bandgapet. Bandgapet i halvledarmaterial gör det möjligt för elektroner att förflytta sig till ledningsbandet genom att injicera små mängder energi, vilket för vissa halvledarmaterial möjliggör elproduktion genom ljus. Om en foton med högre energi än bandgapet infaller på halvledarmaterialet kommer fotonen att absorberas och en elektron kan vandra från valensbandet till ledningsbandet, vilket är känt som excitation (Ossila u.å.).

Vid Kungsängens gård finns det potential för att installera solpaneler. Dimensionerna hos möjlig implementerabar anläggning beskrivs i avsnittet *Systembeskrivning*.

3.2 Vindkraft

Elproduktion från vindkraft utgör en allt större del av elsystemet. För att nå dagens klimatmål är vindkraft en viktig förnybar kraftkälla med stor potential. Uppbyggnad av vindkraftverk anses dessutom kostnadseffektivt i jämförelse med andra förnybara energikällor. Sverige som land har även många gynnsamma vindlägen för vindkraftsproduktion (Energimyndigheten 2022b).

De mest optimala förhållandena för vindkraftsproduktion finns i anslutning till hav, i fjällområden och i öppna landskap. Vindkraftverk placerade i bra vindförhållanden i Sverige kan förväntas producera vindeffekt motsvarande cirka 6 000 till 7 000 timmar under året (Energimyndigheten 2020).

Tillgången till vind på en specifik plats definieras antingen som vindhastighet (i m/s) eller utgående från energiinnehåll (i kWh/m²) vid en bestämd höjd. Den potentiella effekt som kan utvinnas från vindhastigheten ökar teoretiskt med höjden i kubik. Dock begränsas effektuttaget från ett vindkraftverk vid för höga vindar (Energimyndigheten 2020). Moderna vindkraftverk genererar som högst effekt när det blåser mellan 12-14 meter per sekund (Västra Götalandsregionen 2017).

3.3 Batterier

Användning av batterier i samband med intermittenta energikällor, såsom solpaneler, är vanligt förekommande. Bulkenergilagring kan användas för att lagra stora mängder intermittent el när den produceras för att sedan användas under perioder av låg produktion, exempelvis genom att lagra solen under dagen för att sedan använda den under kvällen. Den lagrade energin kan användas på olika sätt. Ett alternativ är att ladda och ladda ur lagret enligt lasten, vilket kallas lastföljning. Lagret laddas under tider av överskott av förnybar energi och laddas ur när lasten blir större. Ett annat sätt att använda bulkenergilagring är det som kallas energitidsförskjutning ("energy time shift"). Den lagrade energin, som vid solpaneler innebär nettoproducerad solen under en hel dag, används för att helt eller delvis täcka elbehovet eller reducera topplasten (Görtz 2015).

Batterier som används för att lagra intermittent energi kommer vara överksamma under dagar när det exempelvis är låg eller ingen solinstrålning eller när det blåser mycket lite eller inget alls. Genom att tillföra effekt från lagret under topplasten kan elkonsumtionen minskas och därmed minska kostnader relaterade till detta. Dessutom minskas elnätlasten under perioder med topplasten (Görtz 2015).

Användande av batterier innebär även att andra komponenter behövs. Den första är en växelriktare ("power inverter") vilket omvandlar likströmseffekt från batteriet till växelströmseffekt som kan matas in på elnätet eller laster som drar växelströmseffekt. Den andra komponenten är det som kallas batterihanteringssystem som försäkrar säker drift av batterilagersystemet genom att kontrollera värmehantering, ström- och spänningsgränser såväl som feldetektering och nedstängning. Detta motverkar den naturliga processen av batteriförsämring. Batteriernas livslängd är djupt beroende av de tillstånd som de verkar under. För höga eller för låga omgivande temperaturer eller inhomogena cellspänningar över batteriet såväl som "deep charging" kan försämra batteriets tillstånd. Överstigning av batteriernas drifttillstånd kan leda till avbrott i celler och slutligen systemet. Den tredje komponenten som behövs är det som kallas "system supervisory controller", vilket motsvarar en programmerbar ledare - en dator. Detta system kontrollerar laddnings- och urladdningsmönster enligt en bestämd lastprofil alternativt ett annat önskat ändamål. Systemet analyserar SOC (state of charge, se mer om detta nedan), batteriets temperatur och cellspänning och cellström som ges av batterihanteringssystemet och, om det är nödvändigt, ändrar laddnings- eller urladdningsströmmen och omgivande temperatur för att skydda cellerna från intern försämring och avtagande kapacitet (Görtz 2015).

Litiumjonbatteri är ett vanligt förekommande batteri när det kommer till användningsområden som personbilar, tunga fordon samt stationär energilagring. Det finns ett antal olika typer av litiumjonbatterier beroende på vilka sorters metaller som batteriet innehåller. Gemensamt för dem är naturligtvis att de innehåller litium. Nackdelarna med batterierna är framförallt den begränsade tillgången till metallerna, exempelvis litium och kobolt, samt att utvinningen av metallerna kan lokalt innebära väsentlig social och miljömässig påverkan. Återvinning av metaller i förbrukade batterier är ett sätt att minska utvinningen. I Europa sker återvinning i förhållandevis hög grad. De vanligaste typerna av batterier är: Litium-koboltoxid, litium-mangandioxid, litium-nickel-mangan-koboltoxid, litium-nickel-kobolt-aluminiumoxid samt litium-järnfosfat. Ämnet kobolt har uppmärksamats till följd av dess etiska och ekonomiska problematik då stor del av utvinningen sker i Kongo. Tillgången till kobolt är också begränsad vilket gör den dyrare än exempelvis mangan. Däremot har batterier med mangan (LMO) lägre livslängd än batterier med kobolt (LCO). Batterier där katodmaterialet består av nickel, mangan och kobolt (NMC) används oftast i hybrid- och el-

bilar. Litium-järnfosfat (LiFePO₄ eller LFP) är fördelaktigt tack vare dess höga effekttäthet och långa livslängd. Dessutom tål det höga temperaturer i bättre utsträckning jämfört med de övriga katodmaterialen. Däremot innebär denna typ av batteri en lägre cellspänning vilket i sin tur innebär att energitätheten påverkas (Energisamverkan Blekinge 2021). Gemensamt för litiumjonbatterier är deras höga energidensitet och urladdningshastighet samt att verkningsgraden är hög. En av utmaningarna med litiumjonbatterier är risken för överhettning. Kombinationen av hög energidensitet, brännbarheten hos litium samt syreinnehållet innebär att det finns risk för överhettning och därmed också brand (Nordling et al. 2015).

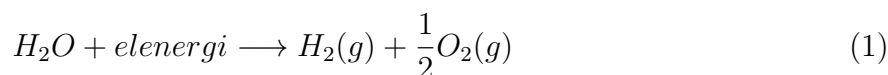
Begreppet “state of charge” eller SOC som det kallas är en viktig faktor när det kommer till driften av batterier. SOC är förhållandet mellan tillgänglig kapacitet och den maximalt möjliga laddning som kan lagras i ett batteri (Sundén 2019). I rapporten “Optimized Operating range for Large-Formal LiFePO₄/Graphite Batteries” av Jiang et al. (2013) undersöktes hur kapaciteten hos LiFePO₄-batterier försämrades vid olika SOC. I studien konstaterades att batterier som hade en SOC på mellan 25-50 % och 50-75 % visade överlägsen “cycling” prestanda med signifikant reducerad kapacitetsnedgång vilket tyder på att en SOC motsvarande 25-75 % kan komma att föredras vid drift av denna typ av batterier (Jiang et al. 2013). För just typen LiFePO₄ gäller att vid en högre SOC är också verkningsgraden högre, och kan beroende på strömmens storlek närma sig 99 %, och vid en lägre SOC är verkningsgraden något lägre (Safoutin et al. 2015). Litiumjonbatterier har vanligtvis en uppladdningseffektivitet på nära 99 % och väldigt låga “discharge”-förluster, vilket ger en “round-trip efficiency” på ca 98 % (Jansson 2019).

3.4 Produktion och lagring av vätgas

Vätgasproduktion

Vätgas kan produceras genom elektrolys i en elektrolysör. Elektrolysören utgörs av flertalet celler där varje cell består av två elektroder, en anod och en katod, som separeras av en elektrolyt. När elektrolysören förses med ström sker en redoxreaktion som leder till vätgasproduktion vid cellens katod och syrgasproduktion vid cellens anod. Elektrolys-processens verkningsgrad avgörs av elektrolyscellernas totala resistans som är beroende av resistanserna i elektroder, elektrolyt, membran och trefasövergång. Högre temperaturer i elektrolysen genererar högre verkningsgrader då sönderdelningen av vattenmolekyler sker lättare samt att mindre elektricitet krävs. Dock kan höga temperaturer resultera i en större andel ånga i produktgaserna, vilket kan leda till sämre konduktivitet och högre resistans i elektrolyscellerna (Avfall Sverige 2013).

Genom elektrolys sönderdelas vatten till vätgas respektive syrgas genom cirkulering av elektrisk ström i elektrolysören bestående av två elektroder (Bhuyan et al. 2018). Reaktionsformeln för elektrolys sker enligt ekvation 1 enligt Bhuyan et al. (2018).



Det produceras alltså hälften så många mol syrgas som vätgas, vilket tydligt kan ses i reaktionsformeln ovan.

Det finns flera tekniker för vätgasproduktion genom elektrolysceller. Alla tekniker består av samma grundkomponenter, det vil säga elektroder, elektrolyt och membran. De främsta idag är Alkaline Electrolysis (AEL), Polymer Electrolyte Membrane (PEM) och Solide

Oxide Electrolysis (SOEC). Alkalisk elektrolys (AEL) är den vanligaste tekniken för vätgasproduktion. Elektrolysen sker vid ca 70 °C och överföring av laddning sker med joner. Elektrolyscellernas elektroder har en livslängd kring fem år vid alkalisk elektrolys. Den alkaliska elektrolysen är enklare i jämförelse med andra elektrolys-tekniker. Dock medför detta att tekniken har en något lägre verkningsgrad, omkring 50–70 %. Alkalisk elektrolys kan endast ske åt ett håll, till skillnad från PEM och SOEC som även kan fungera som bränsleceller (Avfall Sverige 2013).

I PEM-elektrolysören utgörs elektrolyterna av polymerer. Detta ökar konduktiviteten och därav elektrolysörens verkningsgrad. Laddning överförs genom att vätejoner förflyttas från anod till katod. Polymeren försämras med tiden, vilket medför att elektrolyt och elektroder behöver bytas ut. Elektrolyterna och elektrodernas livslängd uppskattas ligga mellan fem och tio år. En PEM-elektrolysör kan fungera åt båda håll och kan alltså även nyttjas som bränslecell (Avfall Sverige 2013).

I en SOEC-elektrolysör överförs syrejoner från katod till anod genom cellernas elektrolyter. Elektrolyterna utgörs i detta fall av ett keramiskt material. Keramiska material har hög konduktivitet samtidigt som de klarar höga temperaturer. Elektrolysen kan därför ske vid högre temperaturer (till och med 800 grader) vilket genererar en högre verkningsgrad. Precis som för PEM-elektrolysören kan värmen nyttjas till att minska elproduktionen som behövs för sönderdelningen av vatten. Däremot kräver processen tillgång till högvärdig värme. En SOEC-elektrolysör har en verkningsgrad omkring 90 % (Avfall Sverige 2013).

Möjlig värmeåtervinning motsvarar 18,8 % av energibehovet för elektrolys som är ca 55 kWh/kg vätgas för PEM- respektive alkalisk elektrolysör. Detta innebär alltså en möjlig värmeåtervinning motsvarande 10,34 kWh/kg vätgas (Janke, personlig kommunikation), vilket har använts för beräkningar i resultatdelen.

Vätgaslagring

Intresset för vätgaslagring ökar i takt med att minska koldioxidutsläppen till följd av användning av vätgas som bränsle i fordon på land och marint såväl som långsiktig energilagring för att stötta intermittenta förnybara energikällor. Däremot används vätgas främst inom industrisektorn för exempelvis oljeraffinering. Till skillnad från batterier, kan vätgas lagras storskaligt och långsiktigt. I takt med att en större del förnybara energikällor såsom havsbaserad vindkraft och solpaneler avses att användas (kapaciteten för förnybara energikällor anses öka med 50 % mellan 2019 och 2024) ökar också behovet för vätgaslager. Vätgas anses ha potentialen att bli ett av de lägst kostnadsintensiva lagringsalternativen för elproduktion på dag-, vecko- och månadsbasis vilket gör det till ett av de mest framträdande alternativen för långsiktig lagring. Vätgas som genereras genom elektrolys kan också spela en viktig roll när det kommer till förnybar överskottsenergi (Elberry et al. 2021).

Vätgas kan lagras i tre former; som komprimerad gas, vätska eller på kemiskt vis. Att lagra vätgas i komprimerad form har utmaningar kopplade till det höga energibehovet till följd av vätgasens låga relativa densitet ("specific gravity"). Det finns även utmaningar kopplade till material i lagringstankarna. Däremot, att lagra vätgas i flytande form innebär ett 64 % högre energibehov jämfört med högt trycksatt vätgaskomprimering till följd av den energiintensiva kylningen som krävs då vätgas har en fryspunkt på -253 °C. Vätgas kan även bevaras på kemiskt vis genom att absorberas eller reagera med kemiska föreningar som metaller eller organiska substanser. Metallhydrid, som är ett av de vanligaste sätten att kemiskt lagra vätgas, har egenskapen att bevara vätgas vid hög densitet som kan överstiga det hos flytande vätgas. Däremot innebär lagring av vätgas på kemiskt vis utmaningar med hydrogenering och

dehydrogenering på grund av de krav gällande höga temperaturer och tryck vilket i sin tur gör att det kan vara ofördelaktigt för långsiktig lagring. Geologiska lager såsom saltgrottor, uttömt naturgas- eller oljereservoarer samt akvifärer anges som de bästa alternativen för långsiktig och storskalig lagring. Anledningen till detta beror bland annat på hög effektivitet utan kontaminering. Att bevara vätgas under lång tid beror av vätgasförluster såväl som tekniska och ekonomiska utmaningar kopplade till storskaliga lager (Elberry et al. 2021).

Lagring av komprimerad vätgas anses vara det mest relevanta alternativet för denna studie. När det kommer till lagring av komprimerad vätgas finns huvudsakligen tre alternativ: Geologiska lager, lagringskärl eller lagringstankar respektive lagringsformer under marknivå. Bland lagringskärl är trycksatta kärl vanligt förekommande i industriella, kommersiella och ändamål relaterade till rymdresor. Deras dimensioner kan variera från små flaskor till massiva tankar. Trycken 35 eller 70 MPa är fördelaktiga när det kommer till att använda vätgasen för ändamål relaterade till fordon med bränsleceller. Genom att ha ett tryck på 70 MPa ökar den volymetriska densiteten till ca 38 kg/m^3 jämfört med 23 kg/m^3 vid 35 MPa och med en försumbar ökning i energibehov för komprimering. Däremot leder ett högre tryck till en lägre gravimetrisk densitet vilket inte ett problem när det kommer till stationära vätgaslager utan är av väsentlig betydelse för mobila lager (Elberry et al. 2021).

Bränsleceller

I en bränslecell omvandlas den kemiska energin i ett bränsle, exempelvis vätgas, tillsammans med ett oxidationsmedel till elektricitet. Bränslecellen är energieffektiv och har en hög verkningsgrad vid omvandling från kemisk energi till elenergi. Den högsta teoretiska verkningsgraden för omvandlingen med vätgas som bränsle motsvarar cirka 83 % och de återstående 17 % utgör värme. Elproduktion via bränslecell producerar inte heller några biprodukter eller utsläpp såsom stoft och kväveoxider som tillkommer vid förbränning (Werner 2016).

En bränslecell består av två elektroder som separeras från varandra av ett membran. Sidorna utgör en anod- respektive en katod-sida. Vid anodsidan tillsätts bränsle (det vill säga vätgas) och vid katodsidan tillsätts syre. När vätgas tillsätts påbörjas oxidation vid anodsidan. En katalysator nyttjas ofta för att påskynda separationen av väteprotoner och elektroner som sker vid oxideringen. På grund av väteprotonernas och elektronernas olika laddning kan endast protonerna passera genom membranet medan elektronerna tvingas ta en annan väg innan de åter ansluter till protonen vid katodsidan. Denna externa krets genererar elektricitet som kan nyttjas för annat bruk. När elektronen sedan förenas med elektronen och syret, bildas vatten (Alfredson & Swenson 2017).

Det finns flera olika typer av bränsleceller som har varierande egenskaper och användningsområden. Den främsta skillnaden mellan bränslecellerna är vilken typ av elektrolyt som används. I dagsläget är bränsleceller av typen PEM (Polymerate Exchange Membrane) den mest använda teknologin (Alfredson & Swenson 2017). I en bränslecell av typen PEM består elektrolyten av en fast polymer och har en arbetstemperatur mellan 50 och 80 °C. En beläggning av platina utgör i detta fall katalysatorn för reaktionen. Den spänning som uppstår över en enskild cell motsvarar cirka 1,23 V. För att åstadkomma större spänningsnivåer byggs därför flera celler upp och kopplas i serie (Siden 2015).

Vid drift av bränslecellen måste förhållandet mellan ånga och vatten kontrolleras samt gaserna tillföras med rätt tryck och koncentration. Vätgasen som bränsle tillförs vanligen från en trycktank som regleras med ventil. Syrgasen tillförs från luft som filtreras och pumpas in. Om den gasmängd av vätgas eller syrgas som tillsätts begränsas eller inte är tillräcklig, kan bränslecellen komma att skadas om ström fortfarande dras från cellerna. Därför används

vanligen ett elektroniskt styrsystem för att kontrollera och övervaka de ingående cellerna. Den spänning som produceras är likspänning och behöver därför omvandlas med en DC/AC-omvandlare för att kunna nyttjas i växelströmsnätet (Wiberg et al. 2020).

3.5 Biogasmotor för kraftvärmeproduktion

Ett alternativ till fordonsgasproduktion genom att uppgradera biogasen är att nyttja biogasen för produktion av el och värme. Värmeproduktion är ofta billigare att producera från andra förnybara bränslen såsom pellets, men i kombination med elproduktion som har ett högre ekonomiskt värde kan kraftvärmeproduktion vara fördelaktigt (Lantz 2012).

Biogasanläggningar för elproduktion kan dessutom från och med december 2021 få investeringsstöd från Klimatklivet, det vill säga ett stöd till investeringar som bidrar till att minska utsläppen av koldioxid och andra växthusgaser (Miljödepartementet 2021).

Kraftvärme från biogas kan framställas på flertalet sätt, men sker vanligen med en biogasmotor av typen ottomotor eller dieselmotor. Ottomotorer nyttjar tändstift för antändning av bränslet och dieselmotorer antänder bränslet via självantändning med hjälp av kompression. Dieselmotorer kräver dock att bränslet, det vill säga biogasen, har tillräckligt hög energidensitet för att kunna antändas med kompression. Enligt Lantz (2012) är det billigare att investera i en dieselmotor än en ottomotor i fallet för kraftvärmeproduktion. Däremot har ottomotorer längre teknisk livslängd än dieselmotorer. Den totala kostnaden för respektive motortyp påverkas dessutom mycket av lokala förutsättningar och kvaliteten på bränslet som nyttjas i motorn (Lantz 2012).

En biogasmotor kan använda både rå biogas och uppgraderad biogas som bränsle. Uppgraderad biogas har ett högre värmevärde än rå biogas, vilket medför att bränsleförbrukningen vid användning av uppgraderad biogas som bränsle blir lägre (Khymoroda 2022, personlig kommunikation). En renare gas kan dessutom potentiellt vara skonsammare för motorn (Lantz 2012). Detta måste dock ställas i relation till de ökade kostnader som uppgradering av biogasen medför. Rå biogas som bränsle har däremot inte tillräckligt hög energidensitet för att kunna antändas i en dieselmotor. Det krävs därför ett tändningsbränsle såsom diesel eller biodiesel vid användning av rå biogas i dieselmotorer. Dessa kombinerade motorer kallas "dual-fuel" motorer (Lantz 2012). En fördel med att använda rå biogas som bränsle är möjligheten att kunna ta hand om den biogas som i vanliga fall hade facklats bort. Elproduktion från en biogasmotor har vanligen en verkningsgrad mellan 30 % och 40 %. Den elektriska verkningsgraden är generellt något högre för dieselmotorer än för ottomotorer. Detta påverkas dock av många faktorer, såsom last, slitage, underhåll och bränslets energiinnehåll. Verkningsgraden för värmeproduktion varierar normalt mellan 35 % och 55 % (Lantz 2012). Biogasmotorn som simulerats i detta arbete antas ha en elverkningsgrad på 40 %, och att återbrukbar värme antas motvara 27 %. Båda baseras på uttalanden av Khymoroda (personlig kommunikation).

3.6 Produktion och lagring av LBG

Lagring av biogas i gasform är dyrt och dessutom svårt att distribuera. Genom att förvätska biogasen till flytande form blir lagringen mindre kostsam att implementera samt energitätheten i bränslet högre (Johansson & Nordell 2017). I samband med förvätskning av biogas minskar dessutom dess volym till ca en sexhundredel av dess ursprungliga volym (Energigas Sverige 2017). Precis som flytande naturgas kan även biogas förvätskas till flytande metan, även kallat flytande biogas eller LBG. Inom naturgasindustrin har förvätskning av naturgas

(LNG) utvecklats som en alternativ metod för att kunna distribuera naturgas längre sträckor. Flertalet biogasanläggningar i Sverige använder redan LNG som alternativ bränslereserv då biogasen inte räcker till. I samband med utvecklingen av förvätskningstekniker för flytande biogas kommer stora delar av infrastrukturen avsedda för LNG att kunna nyttjas till LBG i framtiden (Energimyndigheten 2017). En ökad produktion av LBG som kan komma att ersätta användning av LNG skulle dessutom leda till ökad självförsörjning vilket eftersträvas utifrån ett beredskapsperspektiv (Isaksson 2018).

Val av systemkedja för produktion av LBG

Det finns flera tekniker för produktion av LBG. I en systemstudie för storskalig LBG-produktion utförd av RISE genomfördes en teknoekonomisk analys för fem olika systemkedjor för LBG-produktion. Systemkedjorna bestod av konventionella reningstekniker med aaminskrubber eller vattenskrubber, konventionella tekniker inklusive askfilter för polering (uppgradering) av gasen, samt ett fall med ett integrerat kryogent processteg för uppgradering och förvätskning av LBG. Resultaten från analysen visade att konventionella tekniker utan värmeåtervinning leder till likvärdiga produktionskostnader. Däremot var aaminskrubber ekonomiskt fördelaktigt vid värmeåtervinning. Det kryogena processteget hade lägst produktionskostnad inom det undersökta kapacitetsområdet, men detta processteg utgör ny teknik på marknaden och saknar referenser för storskaliga driftfall (Tamm 2018).

Uppgradering med vattenskrubber är en mogen teknik inom vilken det finns hög erfarenhet i Sverige (Bauer et al. 2013). Vid användning av vattenskrubber krävs dock ytterligare uppgradering av gasen för att uppnå godkänd kvalitet för förvätskningssteget. Uppgraderingen sker vanligtvis med polering med TPSA (Temperature Pressure Swing Adsorption). Därefter förvätskas gasen till LBG där det finns främst två etablerade tekniker för förvätskningssteget; Brayton-cykeln och Mixed-Refrigerant-cykeln (MRC). Båda teknikerna har dock bedömts ha likvärdiga funktioner (Tamm 2018). Konventionell framställning av LBG med askfilter eller kryogen framställning av LBG kan dock sannolikt ses som konkurrenskraftiga alternativ i framtiden (Tamm 2018).

I detta projekt antas förvätskningstekniken utgöras av Brayton-cykeln. Valet av teknik i projektet motsvarar samma teknik som används för LBG-produktion vid Lidköpings anläggning, vars komponenter kommer användas som referens vid validering av energibehov i samband med simuleringar. Uppgraderingstekniken, vattenskrubbern, finns på Kungsängens gårds biogasanläggning och avses att användas även för LBG-ändamål.

Process för framställning av LBG

För att biogas ska kunna förvätskas måste koldioxidhalten i gasen vara nästintill noll. Rågas har vanligtvis en metanhalt på 40 % och en koldioxidhalt på 60 %. Gasen uppgraderas därför genom gasrening i vattenskrubber samt torkas med en TPSA-tork. I samband med uppgraderingen sker en tryckhöjning till ca 6 bar. Den uppgraderade gasen har en metanhalt på ca 97 % vilket medför att den har tillräckligt hög energidensitet för att kunna nyttjas som fordonsgas efter komprimering (Tamm 2018).

Vid uppgraderingen renas gasen även från andra föreningar såsom vätesulfid och vatten. Vid de låga temperaturer som förvätskningssteget kräver är de ingående föreningarna i fast tillstånd vilket skulle medföra en begränsad löslighet i det flytande metanet. För att undvika problematik kring frysning och igensättning på grund av detta gäller specifika renhetskrav för metangasen innan den kan förvätskas (Bauer et al. 2013). I tabell 1 redovisas godkända nivåer för respektive förening.

Tabell 1: I tabellen presenteras de godkända nivåerna, eller kraven, för respektive förening som finns i metangasen.

Förening	Krav
Vatten, H ₂ O	0,5 ppm
Vätesulfid, H ₂ S	3,5 ppm
Koldioxid, CO ₂	50-125 ppm

På grund av dessa renhetskrav måste uppgradering med vattenskrubber kompletteras med ett ytterligare reningssteg för att minska främst koldioxidhalten till godkänd nivå. Därför renas gasen med hjälp av ett poleringssteg. I samband med poleringen sker ännu en tryckhöjning till ca 9 bar, vilket är det tryck som krävs för förvätskningsprocessen. Efter polering har den renade gasen en metanhalt på 99,995 %. För att gasen sedan ska övergå till flytande fas måste den kylas ned till en temperatur omkring -161 °C (det vill säga kokpunkten för metan vid atmosfärstryck) (Tamm 2018).

Lagring LBG

Vid lagring av LBG krävs välisolerade tankar som tål höga tryck. Beroende på användningsområde för producerad LBG kan antingen tankcontainrar eller stationära lager nyttjas (Tamm 2019).

I samband med lagring av LBG sker en viss förångning, så kallad boil-off av vätskan. Detta beror på att en viss mängd värme läcker in i lagringstanken. Mängden vätska som förångas benämns som Net Evaporation Rate (NER) och beräknas i procent på dygnsbasis utifrån lagrets totala kapacitet (Tamm 2018). NER blir generellt högre för små tankar. För stationära tankar blir mängden boil-off lite högre. Detta beror på att det sker en viss förångning när LBG pumpas in och ur tankcontainern (Tamm 2018).

Kompression och tankning

LBG kan förångas efter lagring för att återigen nyttjas som fordonsgas (CBG). Detta kan göras antingen med "Liquified to compressed gas"-teknik, även kallat LCBG-teknik där bränslet trycksätts till 300 bar med en kryopump för att sedan förångas i en värmeväxlare. LBG kan även förångas via direkt komprimering till CBG från lagret. Energibehovet för tankning är lägre för en LCBG-tankstation än för en CBG-tankstation. Detta beror på att trycksättningen av flytande biogas innan förångning kräver mindre energi än komprimering av gas vid en CBG-tankstation (Levin 2019).

4 Metod

Metoden som legat till grund för detta arbete och rapport baseras på huvudsakligen fem olika huvudsteg: Litteraturstudie, dataframtagning, modellering, simulering och beräkningar. I litteraturstudien togs relevant information fram genom att främst undersöka tidigare genomförda studier samt hitta information om energiberedskap, systembeskrivningar av energikomponenter och system i drift eller som finns på marknaden, ekonomiska analyser etcetera. Litteraturstudien låg till grund för att ta fram vilka komponenter och system som ansågs vara relevanta för denna studie och hur de skulle utformas för att tillgodose försörjning vid ö-drift och samtidigt bidra med tjänster under normal drift. Dataframtagningen handlade till störst del om att lokalisera sol- och vinddata, Uppsalas energiförbrukning, elpriser samt data gällande biogasanläggningen (energiförbrukning för anläggningen, produktion av rå-

gas respektive biometan). I avsnittet kallat *Data* presenteras samtlig data som använts och källorna till dessa.

I modellering skapades både Simulink-modeller och algoritmer i MATLAB. Simulinkmodeller för elektrolysören, solkraftanläggningen, LBG-lagret och vätgaslagret baserades på matematiska modeller, antaganden och dataframtagningen (dessa beskrivs ingående under avsnittet *Modeller*). Därtill skapades algoritmer för driften och dimensioneringen av de olika komponenterna beroende av driftläget (normal drift, ö-drift eller bristsituation). Slutligen gjordes simuleringarna där resultaten togs fram och känslighetsanalysen genomfördes. Beräkningar gjordes samtidigt men också på sidan av vad gäller de ekonomiska beräkningarna där investerings- och driftkostnader togs fram. Beräkningarna baserades således på litteraturstudien samt resultaten.

I avsnitt, *Modeller*, beskrivs modellering av energisystemen samt de olika driftlägena i ingående detalj.

4.1 Systembeskrivning

I detta avsnitt beskrivs systemen och komponenterna i mer detalj, främst kring dimensionering och viktiga parametrar för beräkningar.

Solkraftanläggningen

För att avgöra dimensioneringen av solkraftanläggningen användes två källor, dels ett uttalande av Marcus Nystrand i ett examensarbete från 2021, dels en utredning som gjorts av energi- och klimatrådgivaren Staffan Gunnarsson på uppdrag av Uppsala Vatten & Avfall AB. I Nystrands uttalande framgår det att Sveriges lantbruksuniversitet har planer på att implementera en anläggning motsvarande 254 kW_p vid Kungsängens gård (Carredano Robertsson & Nordin 2018). I utredningen av Gunnarsson framgick det att det skulle vara möjligt att installera en anläggning motsvarande ca 220 kW_p (Levin, personlig kommunikation). Därmed bestämdes att modellen av solkraftanläggningen skulle motsvara lite mindre än 250 kW_p när solinstrålningen var som högst.

Vindkraftverket

Vid Kungsängens gård finns i dagsläget ingen vindkraftsproduktion. Det finns inte heller någon möjlighet till utbyggnad av vindkraft i anslutning till Kungsängens gård. Detta beror på att Försvarsmakten har sekretessbelagda riksintressen som kommer i konflikt med vindkraftsutbyggnad i större delar av Uppsala och omkringliggande områden (Uppsala kommun 2011). Med hänsyn till detta arbetade Uppsala kommun fram ett förslag till vindbruksplan år 2011 som redovisar områden i främst nordvästra Uppsala som kan vara lämpliga för storskalig vindkraftsproduktion (Uppsala kommun 2015). Sedan dess är vindkraften till stor del utbyggd på de områden som presenterades på kommunens vindbrukskarta och kommunen ska fortsatt bevaka utvecklingen för möjligheten att bygga ut vindkraften ytterligare framöver (Uppsala kommun 2018).

Samtliga simuleringar i detta projekt utgår från förutsättningarna för biogasanläggningen vid Kungsängens gård sett till elbehov och fordonsgasproduktion. Däremot är det av intresse att se hur lokala förutsättningar påverkar möjligheterna till försörjningstrygghet vid en biogasanläggning. Av detta skäl har ett vindkraftverk dimensionerats och simulerats i modellerna för att kunna undersöka potentialen som bidrag från olika intermittenta källor kan ha för ökad försörjningstrygghet.

Vindkraftverket motsvarar storleken 700 kW främst baserat på den beräknade effekten genom ekvation [2](#). Eftersom vindhastigheten varierar, finns det vissa timmar då den levererade effekten övergår 700 kW (i teorin). Däremot, med tanke på batteriets kapacitet (maximalt 800 kWh) och elbehoven vid ö-drift (maximalt 800 kWh), dimensioneras vindkraftverket efter märkeffekten motsvarande 700 kW och regleras om vindhastigheten överstiger märkvind, se avsnitt [5.1.2](#).

Batteri

I denna rapport har batteriet som används ansetts motsvara ett litium-jonbatteri. Därmed har SOC och verkningsgrad bestämts efter denna typ. Resultaten som presenteras i följande rapport har utgått från att batteriet ska hålla en SOC på ca 50 % under majoriteten av tiden. Därmed kan SOC både vara lägre eller högre för att kunna ta tillvara på överproduktion, men för att minska skada batteriet och för att få så lång livslängd som möjligt hålls SOC oftast på 50 %. För att hålla SOC på 50 % majoriteten av timmarna då intermittent energi laddar batteriet beslutades att den maximala kapaciteten hos batteriet skulle motsvara 800 kWh. Verkningsgraden, också kallad round-trip efficiency, hos batteriet har inte varierats beroende på SOC eller ingående ström utan har antagits vara 98 % konstant.

Produktion och lagring av vätgas

Eftersom detta arbete utgår från Uppsalas förutsättningar, vilka anses representera en stor del av svenska städer med biogasanläggning, är inte geologiska lager inom rimligt avstånd från biogasanläggningen möjliga. Dessutom anses inte vätgaslagring på kemiskt vis vara av intresse till följd av de utmaningar som finns. Lagring av flytande vätgas anses inte vara tillämplbart i det system som studeras i detta arbete då flytande vätgas främst används för ändamål relaterade till rymdresor och rymdfarkoster. Därmed finns endast ett alternativ kvar, nämligen lagring av vätgas i komprimerad form.

Vätgasen genereras via en PEM elektrolysör (se avsnitt [5.1.4](#)) och produktionen sker antingen genom att utnyttja solen respektive solen tillsammans med el från elnätet för elektrolysören. Som mest, när solinstrålningen är som högst, producerar elektrolysören ca 3,6 kg/h. När el från elnätet används antas elektrolysören kunna prestera på samma nivå som den gör när solinstrålningen är som högst. Detta för att elektrolysören skulle hålla samma kapacitet oavsett elens ursprung. Därtill används endast elnätet när det är som lägst belastat (och har lägst elpris), vilket antas ske under nätterna och därför sker ingen överlappning av vätgasproduktion från solen och el från elnätet. Vindkraftverket producerar elektricitet som används direkt och inte indirekt genom att producera vätgas. Tanken med att inte ansluta vindkraftverket till elektrolysören handlar till störst del om att vindelsproduktionen ibland är väsentligt högre än solelsproduktionen och att detta i sin tur leder till att elektrolysörens kapacitet hade tvingats ökas för att överhuvudtaget kunna använda vindelsproduktionen. Alternativt hade kapaciteten hos elektrolysören tvingats höjas och därmed även kostnaderna.

Beroende på produktionen av vätgas och eventuell försäljning av vätgas, dimensioneras vätgaslagret. Komprimeringen av vätgasen likaså. Bränslecellens dimensionering beror till störst del av elbehovet och eftersom behovet varierar samtidigt som vätgasproduktionen varierar, beror bränslecellens kapacitet på detta (detta är tydligt i *Resultat* avsnitt [6.2.1](#)).

Komprimerad vätgas anses vara det mest lämpliga alternativet för lagring i detta fall. Ett tryck på 70 MPa valdes eftersom detta anses vara fördelaktigt vid lagring över en längre tid (exempelvis säsongslagring). Trycket innebär att volymen hos det slutgiltiga lagret blir mindre än det skulle vara vid ett lägre tryck, vilket också är fördelaktigt för den slutliga investeringskostnaden.

Biogasmotorn

För att kunna dimensionera biogasmotorn i simuleringar samt ta hänsyn till motorns prestanda i olika driftlägen så har motormodellens parametrar bestämts efter kontakt med KTS Engineering. KTS Engineering är samarbetspartner med företaget Jenbacher som designar och tillverkar gasmotorer, därav baseras biogasmotorn på motortyper av motsvarande design (Khymoroda, personlig kommunikation).

Jenbacher tillverkar gasmotorer med Otto-cykelenheter som antänds med industriella tändstift (Nordberg 2006). I projektet har främst Jenbacher gasmotorer från serie 3 och 4 granskats. Rekommenderad minsta effekt under kontinuerlig drift (mer än två timmar) för dessa bör motsvara 50 % av motorernas totala kapacitet. Val av driftläge påverkar även motorernas verkningsgrad som kan komma att skilja sig med några procentenheter mellan 50 % last och fullast (Khymoroda, personlig kommunikation).

Bränsleförbrukningen per timme för motormodellen har beräknats utifrån energiinnehållet i rå biogas. Energiinnehållet beror av rågasens sammansättning och varierar mellan 4,5 kWh/Nm³ och 8,5 kWh/Nm³ (Jarmander & Sjöberg 2015). I modellen har därför det lägre värmevärdet antagits, det vill säga ett energiinnehåll på 4,5 kWh/Nm³ rågas, vilket även är det värde som utgås från i Jenbachers modeller (Khymoroda, personlig kommunikation).

Produktion och lagring av LBG

I dagsläget nyttjas en vattenskrubber för gasuppgradering till fordonsgaskvalitet på anläggningen vid Kungsängens gård. I projektet kommer därför antagandet göras att samma vattenskrubber kan nyttjas till uppgraderingen av gas avsedd för produktion av LBG.

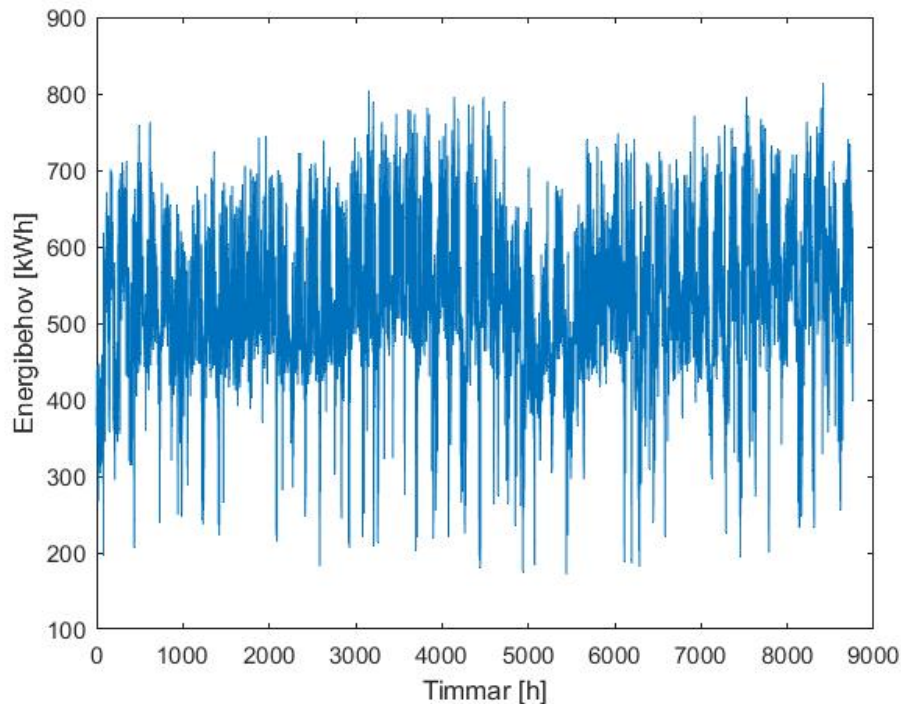
Mängden producerad LBG beror på om endast rågas som annars skulle avfacklas används eller om denna gas tillsammans med en del av producerat biometan används. Kapaciteten hos vattenskrubbern antas vara tillräcklig för att hantera rågasen som annars skulle facklas bort eftersom denna mängd varierar från år till år och vattenskrubbern ska kunna hantera den totala rågasproduktionen. TPSA-poleringen och förvätskningsanläggningen har kapaciteten för att producera LBG oavsett var rågasen kommer från. LBG-lagret beror på hur produktionen ser ut och presenteras i *Resultat* avsnitt [6.1.3](#).

4.2 Data

I detta arbete har en mängd olika data använts för att slutligen kunna simulera systemen och få fram resultaten. För att kunna simulera de intermittenta energikällornas, det vill säga solkraftanläggningen och vindkraftverket, krävdes solinstrålningsdata respektive vinddata. Solinstrålningsdata togs från STUNS Energi där mätningen gjorts över solinstrålningen från Region Uppsalas soleanläggning. Data hade mätts med fem minuters upplösning under 2019-2021 i W/m². År 2020 valdes då denna data var den senast uppmätta och helt komplett till skillnad från år 2021. Vinddata hämtades från SMHI och gällde år 2020.

Från biogasanläggningen vid Kungsängens gård som ägs av Uppsala Vatten och Avfall mottogs information och data om anläggningens elenergianvändning (se figur [2](#)), tankningen vid tankstationerna TK3 och TK4, biogasanläggningens och Kungsängsverkets (reningsverket) rågasproduktion och biometanproduktionen vid Kungsängens gård (som också uppgraderar rågasen från reningsverket). Elpriser, spotpriser för elområde 3, mottogs från Carl Flygare (personlig kommunikation) och Uppsalas energianvändning inklusive schablonavräknade timmar för elområde UPP för Uppsala mottogs också från Carl Flygare (personlig kommunikation). I databasen Mimer av Svenska kraftnät inkluderas inte schablonavräknade timmar

enligt Flygare, vilket var anledningen till att data från Flygare istället användes.



Figur 2: I figuren presenteras elbehovet för biogasanläggningen i normal drift. Med energibehov avses elbehovet.

5 Modeller

För att undersöka potentialen för energisystem, samt kombinationer av energisystem vid varierande energitillförsel utvecklades simuleringsmodeller i MATLAB. En modell skapades för simulering av respektive system och beskrivs i kap. 5.1.

Utifrån dessa simuleringar skapades sedan två huvudmodeller som prioriterade de valda ingående energisystemen för ett angivet elbehov och driftfall, d.v.s. normal drift eller ö-drift. Prioriteringsordningen avgjorde vilket energisystem som nyttjades samt hur mycket effekt som nyttjades från respektive energisystem och baserades på tillgänglig effektproduktion på timbasis. Modellen för normal drift beskrivs i avsnitt 5.2, modellen för ö-drift i avsnitt 5.3 och modellen för bristsituation i avsnitt 5.4.

5.1 Modellering energisystem

I detta avsnitt beskrivs modelleringen av respektive energisystem och komponenter.

5.1.1 Solkraft

I detta arbete modellerades solkraftanläggningen i MATLAB Simulink (R2021a). För att bygga modellen användes paketet som kallas Simscape Electrical. Paketet innehåller färdigbyggda komponenter såsom en solcell, diod, resistans, voltmeter och amperemeter varav samtliga komponenter användes för solkraftanläggningen. Modellen innehåller sex solpaneler som innehåller tre parallellkopplade strängar som vardera innehåller 290 solceller. Antalet

solceller bestämdes genom upprepade test för att uppnå ca 250 kW_p. Varje solcell har en kortslutningsström motsvarande 9,79 A och en tomgångsspänning motsvarande 0,644 V baserade på parametrar för polykristallina celler (Rajan & Aruna 2021). För varje panel parallellkopplas en diod som har en inneboende resistans, kapacitans och konduktans. Värdena på dessa hade redan implementerats i den färdiga komponenten och var på så sätt "default"-värden. Samtliga solpaneler parallellkopplas med en föränderlig resistans ("variable resistor") som har minimumresistansen noll. Detta för att efterlikna de reella förhållandena i en solcell där resistansen ändras beroende av solinstrålningen. I Appendix bilaga 11 syns Simulinkmodellen av solkraftanläggningen.

Den resulterande likströmmen från solkraftanläggningen matas in i elektrolysören. Elektrolysören kräver likström (Guilbert et al. 2017). En växelriktare (kallad "inverter"), som konverterar DC till AC, används för batteri och elnätet.

5.1.2 Vindkraft

Modellen av vindkraftverket som simulerats har utgått från en matematisk modell där den möjliga producerade effekten varierar beroende på vinddata. Utgående elektrisk effekt från ett vindkraftverk har beräknats enligt ekvation 2 (MathWorks u.å.).

$$P = \frac{C_{tot}\rho Au^3}{2} \quad (2)$$

Parameter A utgör den area som sveps av turbinbladen och bestäms utifrån rotorbladens längd. Parametern ρ utgör densiteten för luft i normala förhållanden det vill säga havsnivå och 15 °C, vilket motsvarar 1,225 kg/m³. C_{tot} utgör den totala verkningsgraden för vindkraftverket och varierar normal mellan 30 och 50 %. Den totala verkningsgraden är beroende av förluster, omvandling samt av vindhastigheten och turbinens rotationshastighet. I simuleringarna har en total verkningsgrad på 50 % antagits. Parameter u utgör vindhastigheten i m/s (The Royal Academy of Engineering u.å.).

Ett vindkraftverk genererar el vid en vindhastighet mellan 3 och 25 meter per sekund. Understiger vindstyrkan 3 m/s produceras ingen el och överstiger vindstyrkan 25 m/s slås verket av för att förhindra skador (Västra Götalandsregionen 2017). I modellen nollställs därför all effektproduktion som sker då vindhastigheten understiger 3 m/s (vindhastigheten översteg inte 25 m/s vid något tillfälle och därför implementerades inget krav för detta). I projektet simulerades ett vindkraftverk motsvarande 700 kW genom att skapa en algoritm i MATLAB baserad på ekvation 2. Som mest levererar vindkraftverket alltså 700 kW och detta sker vid en vindhastighet motsvarande märkvinden, vilket var 12 m/s (baserat på vinddata som erhöles). Vid högre eller lägre vindhastigheter regleras vindkraftverkets effektleverans.

5.1.3 Batteri

Modellen av batteriet har skapats i MATLAB genom en algoritm som avgör när och hur mycket som ska laddas in och ur batteriet. Vid överproduktion av intermittent energi, alltså när behovet understiger produktionen, laddas batteriet. Då behovet överstiger produktionen laddas batteriet ur. Eftersom samtliga simuleringar görs på timbasis tar ingen hänsyn till eventuell fördröjning hos batteriets in- och urladdning.

I denna rapport har batteriet som används antagits motsvara ett litium-jonbatteri. Därmed har SOC och verkningsgrad bestämts efter denna typ. Resultaten som presenteras i följande rapport har utgått från att batteriet ska hålla en SOC på ca 50 % under majoriteten av tiden,

baserat på Jiang et al. (2013). Därmed kan SOC både vara lägre eller högre för att kunna ta tillvara på överproduktion, men för att minska skada batteriet och för att få så lång livslängd som möjligt hålls SOC oftast på 50 %. Den maximala kapaciteten hos batteriet bestämdes till 800 kWh baserat på den intermittenta elproduktionen och att hålla SOC på 50 % större delen av tiden. Batteriet har en "round-trip efficiency" motsvarande 98 % baserat på Jansson (2019).

5.1.4 Elektrolysör

I detta arbete skapas simuleringar utgående från de förutsättningar som ges vid användning av en elektrolysör av typen Polymer Electrolyte Membrane (PEM).

Energibehovet för en elektrolysör av typ PEM är ca 55 kWh/kg vätgas. Detta medför en möjlig värmeåtervinning motsvarande 10,34 kWh/kg vätgas (Janke, personlig kommunikation). Verkningsgraden för PEM elektrolysör motsvarar 72,2 % (Janke et al. 2020).

Vid modellering av en elektrolysör användes MATLAB Simulink (R2021a). Modellen av elektrolysören är en matematisk modell som baserades på två ekvationer av Faraday. I den första ekvationen beräknas Faradays effektivitet, n_F , enligt ekvation 3 nedan från Bhuyan et al. (2018):

$$n_F = 96,5e^{0,09i_e - 75,5i_e^2} \quad (3)$$

Där i_e är elektrolysörens ström mätt i ampere [A]. I den andra ekvationen används Faradays effektivitet för att beräkna produktionen av vätgas enligt ekvation 4 nedan från Bhuyan et al. (2018):

$$n_{H_2} = \frac{n_F n_c i_e}{2F} \quad (4)$$

Där n_{H_2} är produktionen av vätgas [mol/s], n_c är antalet seriekopplade celler i elektrolysören och F är Faradays konstant [C/kmol] (Bhuyan et al. 2018).

Antalet celler i elektrolysörmodellen bestämdes genom att jämföra med rapporten av Bhattacharyya et al. (2017) där en 120 kW_p solkraftanläggning använts för att producera vätgas. Eftersom solkraftanläggningen i denna rapport är ungefär dubbelt så stor borde också vätgasproduktionen bli det (vid maximum). Därmed ökades antalet celler fram till att önskad maximal vätgasproduktion uppnåts. Resterande värden, som inte var maximala, följde på så sätt en jämn kurva.

Eftersom elektrolysören till största del ska försörjas genom strömmen som genereras från solkraftanläggningen (likström) motsvarar elektrolysörens ingående ström denna och det är därför denna ström som dimensionerar elektrolysören. Antagandet som görs är därför att det inte sker några förluster gällande strömmen från solkraftanläggningen och att den direkt kan användas i elektrolysören. Eventuella förluster antas vara så små för att göra någon egentlig skillnad. Vätgasen som produceras är tänkt att främst användas i bränsleceller för elproduktion. Vätgasen kan också säljas under normala förhållanden för olika industriella processer eller som drivmedel.

I Appendix bilaga 10 visas Simulinkmodellen av elektrolysören.

5.1.5 Vätgaslager

För att modellera vätgaslagret tas hänsyn till energibehov för komprimeringen, energidensitet hos vätgasen och volym hos den slutgiltiga gasen. Energibehovet utgörs endast av energiåtgången för komprimering. Här antas att ingen energitillförsel krävs till lagret under drift. Dessutom antas att de förluster som sker beror till störst del av komprimeringen av vätgasen till trycket 70 MPa och endast en liten del under lagring. Vid komprimering av vätgas till 70 MPa har kompressorn ett energibehov motsvarande 6,0 kWh/kg vätgas (Sheffield et al. 2014). Densiteten för vätgas vid 70 MPa och 25 °C är 39,3 kg/m³ (Hirscher 2010). Modellen över vätgaslagret byggs upp i Simulink.

5.1.6 Bränslecell

Eftersom bränslecellen främst nyttjas i ö-drift och bristsituation anpassas dess drift efter elbehovet varje timme. Det maximala elbehovet för respektive driftfall avgör därför bränslecellens kapacitet för respektive scenario. I simuleringarna kommer en bränslecell av typen PEM (Polymerate Exchange Membrane) att nyttjas som har en elektrisk verkningsgrad motsvarande 55 % (Knosala et al 2021).

I samband med omvandlingen till elenergi genereras även en större andel värme, vanligen motsvarande 45 till 60 % av den totala energimängden i vätgasen. Den alstrade värmen bör avlägsnas från bränslecellen genom tillsättning av kylmedel för att förlänga bränslecellens tekniska livslängd (Nugyen & Shabani 2020).

I detta projekt har modellen avgränsats till att inte ta hänsyn till den restvärme som produceras i samband med elproduktionen i bränslecellen. Att nyttja denna värme skulle dock förbättra bränslecellens totala verkningsgrad samt minska driftkostnader (Nugyen & Shabani 2020).

5.1.7 Biogasmotor

Modellen för biogasmotorn avgränsades till att nyttja ett medelvärde för motorns verkningsgrad baserad på olika driftlägen. Därför angavs en konstant verkningsgrad till 40 % för elproduktion och till 60 % för värme utgående från Jenbachers motormodeller, se avsnitt [3.5](#). Verkningsgraden för värme utgör den totala produktionen spillvärme från biogasmotorn under drift och representerar inte den mängd värme som kan återvinnas från biogasmotorn. Mängden återvunnen värme angavs till 27 % (Khymoroda, personlig kommunikation).

Vid modellering anpassades motorns totala kapacitet efter effektbehovet för respektive simuleringsfall. För samtliga simuleringsfall sattes en minsta kapacitet till 50 % av motorns totala kapacitet. För alla drifttimmar då effektbehovet understeg minsta kapacitet, men inte var noll, kördes motorn på det driftläge som motsvarade minsta kapacitet. Detta medförde att en överproduktion av el skedde för alla timmar då effektbehovet understeg motorns minsta kapacitet (men inte då effektbehovet var noll).

För alla drifttimmar då effektbehovet översteg minsta kapacitet så producerade motorn den effekt som motsvarade effektbehovet.

5.1.8 LBG

Vid simulering av LBG-produktionen skapades flera olika fall där produktionen varierades i normaldrift. I grundfallet nyttjades endast rågas som annars skulle facklas för produktion av LBG, medan även en procentuell andel av biometan nyttjades till LBG-produktion i övriga

fall. Elbehovet för framställningen av LBG skiljer sig därför mellan fallen vilket togs hänsyn till vid beräkningar.

Eftersom LBG-produktionen och därav lagerkapaciteten varierades i detta projekt antogs ett konstant värde för NER för samtliga simuleringar på 0,2 % av kapaciteten per dygn. Detta värde har antagits begrundat på litteraturstudier samt efter samtal med Tekniska Verken i Linköping (Nordell, personlig kommunikation). Vid Linköpings biogasanläggning nyttjas en lagertank om 60 ton vilket motsvarar ett värde för NER på ca 0,11 % per dygn (Nordell, personlig kommunikation). I ”Delrapport 5: Systemstudie för storskalig LBG-produktion” används ett värde för NER på 0,2 % per dygn för en 40-fots-tankcontainer med en lagerkapacitet på 18 ton (Tamm 2018). I detta projekt är lagret stationärt och lagerkapaciteten förväntas bli större än ovanstående fall vilket bör resultera i en lägre NER. Med tanke på att hänsyn till NER endast tagits vid lagringen av LBG samt att lagerkapaciteten kommer att varieras, har NER därför valts något högre.

För att återkyla vätskan i LBG-lagret och förhindra att förångning sker antogs en viss mängd LBG omsättas i normal drift. I ö-drift sker ingen LBG-produktion. För kylning av lagret antogs i stället att återförvätskning av all boil-off skulle vara tillräckligt (detta baserat på personlig kommunikation med Nordell). Detta medförde att ett ytterligare elbehov för förvätskning tillkom i beräkningar.

Modellen har avgränsats till att inte ta hänsyn till energibehovet för LCBG-tankning i ö-drift. I stället har energibehovet för CBG-tankning för mängden producerad fordonsgas tagits hänsyn till i samtliga fall. På grund av det lägre energibehovet som LCBG-tankning kräver i jämförelse med CBG-tankning så bör denna avgränsning endast resultera i en något högre energiförbrukning än förväntat i alla simuleringar i ö-drift.

I tabell 2 nedan redovisas energibehov, tryck samt eventuell värmeåtervinning för respektive processsteg i simuleringarna (Tamm 2018).

Tabell 2: I tabellen presenteras de olika stegen för produktion av LBG och deras egenskaper.

Processteg	Energiförbrukning [kWh/Nm ³]	Tryck in/ut [bar]	Värmeåtervinning [kWh/Nm ³]
Vattenskrubber	0,22	-/6	-
TPSA-polering	0,04	6/8	-
Förvätskning (Brayton)	0,67	8/1	0,14

5.2 Modell normal drift

I detta avsnitt beskrivs modellering av fallet normal drift. Med normal drift menas att energitillförseln från elnätet är obegränsad. Energisystemen innehållande en biogasmotor respektive bränslecell används för att bidra med effekt under höglasttimmar och på så vis avlasta elnätet. Vätgasproduktionen genom elektrolys sker under normal drift och via el från solkraftanläggningen respektive el från elnätet under låglasttimmar. LBG-produktionen sker genom att uppgradera, polera och förvätska rågas som annars skulle facklas bort respektive genom att polera och förvätska en del av biometanproduktionen.

5.2.1 Elbehov

I modellen för normal drift togs ingen hänsyn till elbehov då antagandet gjordes att energitillförseln var obegränsad, det vill säga att det inte uppstår problematik kring effekt- eller

kapacitetsbrist. Däremot beräknades det ökade elbehovet för ingående energisystem för att kunna uppskatta de drift- och underhållskostnader som redovisas i avsnittet *Ekonomi*.

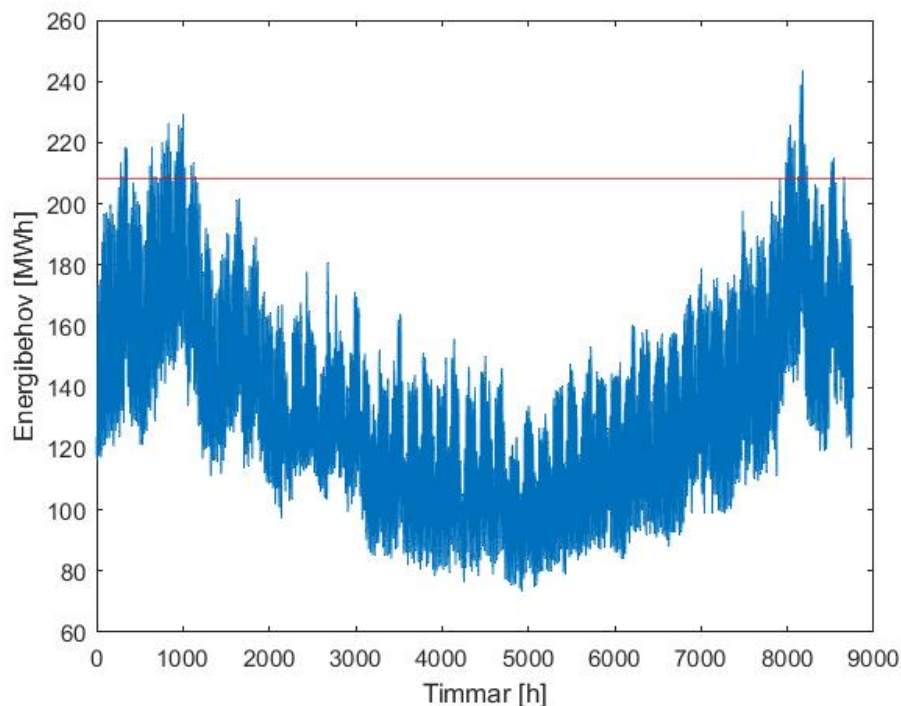
5.2.2 Avlastning elnät

För att kunna generera ytterligare intäkter till anläggningen samt potentiellt avlasta nätet vid hög last skapades en algoritm som beräknar vilka timmar på året som effektbehovet i Uppsala stad översteg en bestämd effektgräns. Valet av höglasttimmar påverkade sedan driften av energisystemen i simuleringarna. Två olika effektfall beräknades och ses i tabell 3. Val av effektgräns baserades på data för elområde UPP från år 2021.

Tabell 3: I tabellen presenteras effektgränserna för att uppnå de 200 respektive 300 högsta lasttimmarna.

Effektgräns [MW]	Höglasttimmar [h]
208	200
203,6	300

I figur 3 visas Uppsalas elbehov där de 200 högsta lasttimmarna har markerats med en röd horisontell linje. Timmarna ovanför denna linje är därmed de 200 högsta lasterna, vilket tydligt kan ses ske under vinterhalvåret.



Figur 3: I figuren visas Uppsalas energibehov där den röda horisontella linjen markerar de 200 högsta effektopparna vid en gräns på 208 MW. Med energibehov avses elbehovet.

Vid konvertering av DC till AC antas resulterande AC-effekten från växelriktaren vara 95 % av den inkommande DC-effekten från solkraftanläggningen, alltså antas växelriktaren ha en verkningsgrad på 95 %.

5.2.3 Sol, vind och vätgas

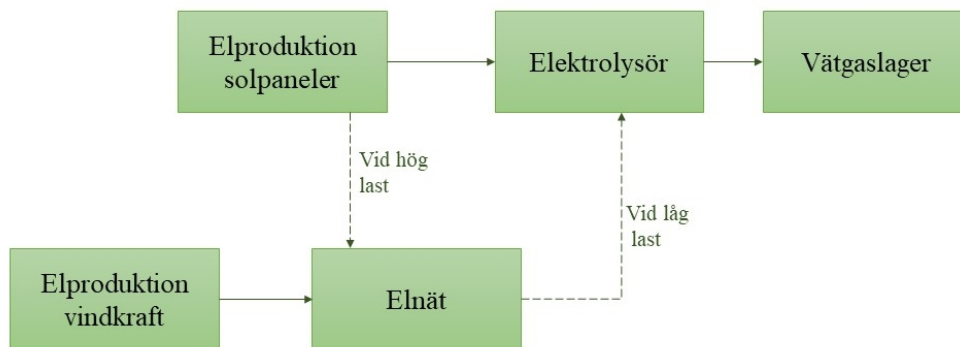
I detta scenario modellerades huvudsakligen två fall som påverkade vätgasproduktionen och mängden vätgas som lagrades under året.

Vätgas från solcellsanläggning

I det första fallet producerades vätgas genom elektrolys av all elproduktionen från gårdens solcellsanläggning motsvarande 250 kW_p . Under höglasttimmar prioriterades elproduktionen från solcellsanläggningen till försörjning av biogasanläggningens elbehov. På grund av detta producerades ingen vätgas under årets höglasttimmar. Vindproducerad el prioriterades oavbrutet till anläggningens elbehov eller nätet.

Vätgas från solcellsanläggning samt elnät

Samma förutsättningar som i föregående fall simulerades även i detta fall. Utöver vätgasproduktionen från solcellsanläggningen tillkom i detta fall ytterligare vätgasproduktion från inköpt el från nätet. En förenklad bild över processflödet för vätgasproduktionen kan ses i figur 4.



Figur 4: Processflöde för vätgasproduktion i normal drift.

Effektuttaget från nätet per timme anpassades efter elektrolysörens maxkapacitet. I modellen dimensionerades elektrolysören efter den maximala elproduktion som kan fås från solcellsanläggningen vilket motsvarade en kapacitet på 270 kW , se avsnitt 5.1.4.

För att avgöra för vilka timmar effektuttag skulle ske användes data för spotpriset för el på timbasis för elområde 3 från år 2021. Effektuttag skedde de timmar under året som elpriset understeg $0,2 \text{ kr per kWh}$ vilket motsvarade totalt 926 timmar.

Valet av elpris samt antal timmar kan inte till fullo likställas med verkliga förhållanden men har nyttjats för att ge en uppfattning om vilken påverkan effektuttag kan tänkas ha med avseende på möjlig vätgasproduktion i relation till investeringskostnader för alternativa energisystem.

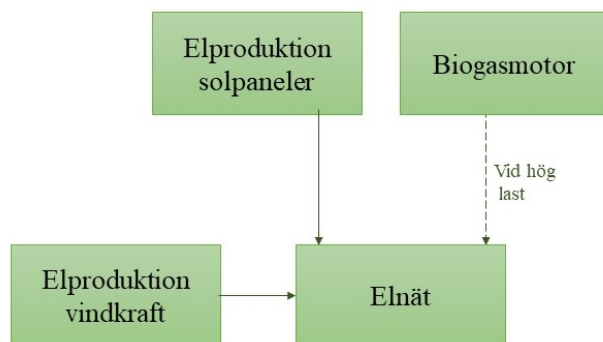
De antaganden som gjorts i anslutning till vätgasproduktionen och lagret i normal drift är följande:

- I vätgaslagret antas inga förluster ske kontinuerligt utan förlusterna som sker i kompression och lager beräknas tillsammans när vätgasen når lagret

- När strömmen från solkraftanläggningen används direkt för vätgasproduktion i elektrolysören antas denna vara densamma, alltså att det inte sker några förluster emellan

5.2.4 Sol, vind och biogasmotor

I detta scenario togs endast hänsyn till vilken inverkan en biogasmotor kan ha under höglast-timmar, se figur 5. Resterande timmar skulle biogasmotorn eventuellt kunna användas till elproduktion från gas som annars skulle facklas som bränsle.



Figur 5: Processflöde för nyttjande av biogasmotor i normaldrift

Tre olika fall simulerades baserat på antal höglasttimmar i tabell 3. Varje höglasttimme producerades effekt motsvarande biogasmotorns maxkapacitet. Biogasmotorns dimensioner och maxkapacitet bestämdes utifrån elbehovet i ö-drift, se kap. 5.3. Utifrån elpriset för ingående timmar i varje höglastfall beräknades ett medelvärde som användes för att estimerar möjlig årlig inkomst.

5.2.5 LBG

Vid simuleringen av produktion och lagring av LBG skapades fyra olika scenarier där tillgänglig biogas för produktion varierades. I det första fallet nyttjades endast rågas som annars skulle facklas för LBG-produktionen medan produktionen i resterande fall bestod av den facklade rågasen samt en procentuell andel av biometanproduktionen. Den totala LBG produktionen för scenarierna beräknades utifrån metanhalten i rågasen respektive biometanen.

För att återkyla vätskan i LBG-lagret och förhindra att förångning sker så antogs en viss mängd LBG omsättas och säljs av i normal drift. Mängden LBG som skulle omsättas varierades och redovisas i tabell 12.

De antaganden som gjordes för LBG-produktion och lagring i normal drift är följande:

- Anläggningen för uppgradering på Kungsängens gård är tillräckligt stor för att klara av att behandla rågas som annars skulle facklas, därmed behövs inga ytterligare investeringar

- Inga massförluster sker när CBG skapas från LBG
- Tillräcklig nedkylning av LBG-lagret sker genom att tillföra LBG konstant
- Boil-off motsvarar 0,2 % per dygn oavsett storlek på lager

5.3 Modell ö-drift

I detta avsnitt beskrivs modellering av fallet ö-drift. Med ö-drift menas att det totala elbehovet måste tillgodoses. Energisystemen med biogasmotor respektive bränslecell avser att tillgodose detta elbehov i fallen med olika fordonsgasbehov. Elbehovet beror av tankningen av fordon och uppgradering av biometan. LBG-lagret nyttjas när fordonsgasbehovet inte kan förses.

5.3.1 Elbehov och fordonsgasproduktion

Inför simuleringen i ö-drift skapades tre olika driftfall med olika fordonsgasbehov. Behovet av fordonsgas var beroende av antalet bussar och sopbilar i respektive driftfall.

I tabell 4 presenteras behovet av fordonsgas per fordon och vecka. Data för bränsleförbrukning och körning av sopbilar baseras på medelvärden för biogassopbilar som tagits fram efter dialog med Ohlssons som är entreprenör för insamling av hushållsavfall i Uppsala C (Lindqvist, personlig kommunikation).

Tabell 4: I tabellen presenteras bränsleförbrukningen och körsträcka för en biogasdriven buss och sopbil.

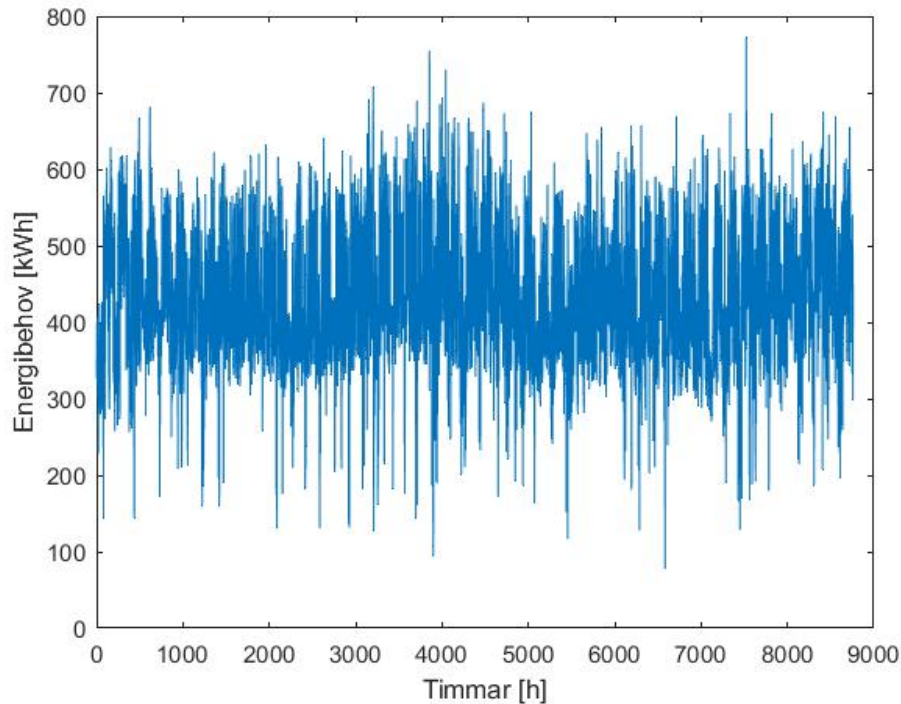
Fordon	km per vecka	Bränsleförbrukning [kWh/km och fordon]	Bränsleförbrukning [kWh/vecka och fordon]	Referens
Buss	1154	4,88	5633	Jonersholm et al. (2010)
Sopbil	405	9,55	3865	Lindqvist (2022)

Mängden fordonsgas som behöver produceras i varje driftfall påverkar även elbehovet för uppgraderingen av gasen vilket medför att det totala elbehovet för anläggningen skiljer sig mellan fordonsfallen. I tabell 5 presenteras antalet fordon och det totala årliga elbehovet för anläggningen anpassat efter respektive fordonsfall. På grund av beroendet av substrattillförsel för att kunna ha biogasanläggningen i drift under ö-drift har antalet sopbilar inte varierats i driftfallen. I simuleringarna beräknas det totala elbehovet på timbasis.

Tabell 5: I tabellen presenteras antalet sopbilar och bussar i de tre fordonsfall som simulerats för energisystemen i ö-drift samt motsvarande energiförbrukning

Driftfall	Sopbilar/Bussar [st]	Total energiförbrukning anläggning inkl. tankning [GWh/år]
1	19/60	3,76
2	19/90	4,13
3	19/120	4,51

I respektive fordonsfall inkluderas elbehov för komprimering och tankning av fordonsgasen samt ytterligare elbehov för de specifika energisystem som tillkommer i respektive simuleringsfall. Dessa presenteras mer ingående i respektive kapitel. Ett exempel på hur det totala elbehovet för anläggningen ser ut när 60 bussar respektive 19 sopbilar (det vill säga det lägsta totala elbehovet) som ska försörjas helt i ö-drift presenteras i figur 6.



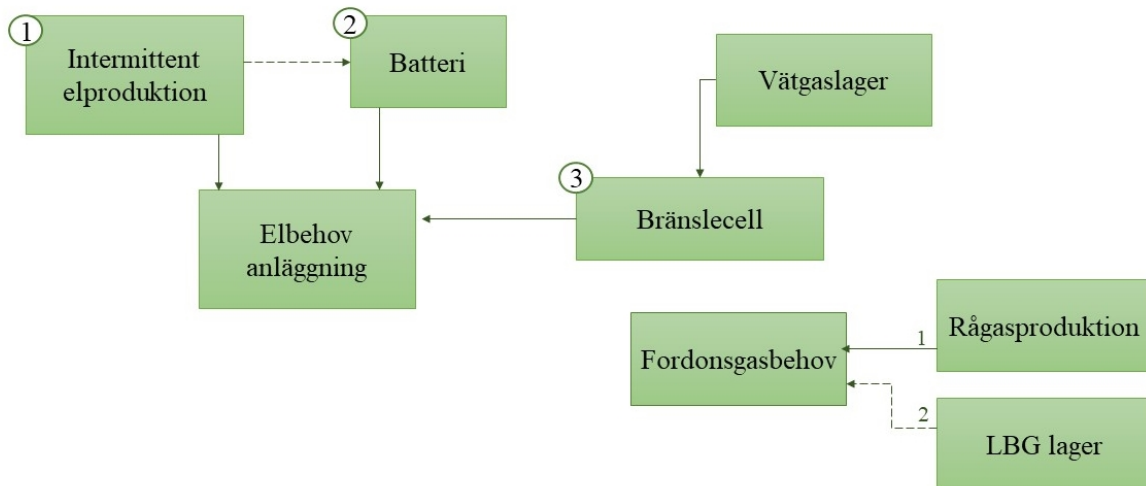
Figur 6: I figuren presenteras energibehovet för anläggningen när 60 bussar och 19 sopbilar ska försörjas med fordonsgas. Med energibehov avses elbehovet.

De antaganden som är relevanta vid ö-drift är följande:

- Det finns tillräckliga vattenresurser för samtliga processer inklusive elektrolys och biogasanläggningen även under brist/kris
- Substrattillgången är oförändrad under kris
- Normal biogasproduktion sker från vattenreningsverket
- Vid konvertering av DC till AC antas resulterande AC-effekten från växelriktaren vara 95 % av den inkommande DC-effekten från solkraftanläggningen och vindkraftverket, alltså antas växelriktaren ha en verkningsgrad på 95 %.

5.3.2 Sol, vind, batteri och vätgas

I ö-drift modellerades effektbidrag från solkraft, vindkraft och batteri i kombination med effektbidrag från de vätgaslager som skapades i normal drift. Processflöde och prioritetsordning kan ses i figur 7.



Figur 7: Processflöde för de ingående energisystemen enligt angiven prioritetsordning för att uppnå elbehovet på timbasis. Den streckade linjen mellan 1 och 2 sker endast vid överproduktion av effekt. Den streckade linjen från LBG-lagret påvisar möjlig användning.

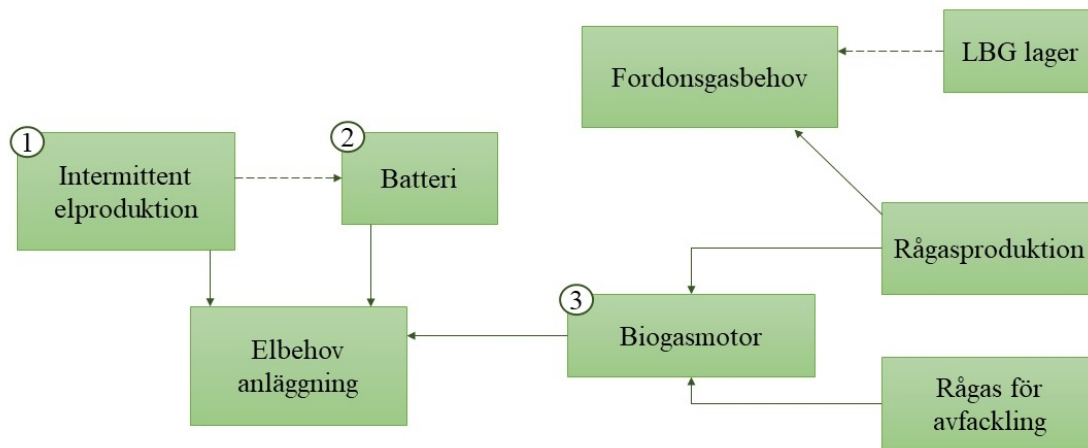
Energikällorna nyttjades i prioritetsordning för att uppnå elbehovet på timbasis och elbehovet utgjordes av det totala elbehovet för respektive fordonsfall. Prioritetsordningen var upplagd enligt följande algoritm:

- Varje timme nyttjades tillgänglig effekt från solkraft och vindkraft för att tillgodose elbehovet.
- Fanns ett överskott av effekt från sol och vind laddades batteriet tills maxkapacitet var nådd. Om effekttillskottet från de intermittenta energikällorna inte räckte för att uppnå elbehovet urladdades batteriet med behövd effekt.
- Om effekttillskottet från intermittenta energikällor, samt tillgängligt batteriladdning inte tillgodosåg elbehovet nyttjades tillgängligt vätgaslager.

I vätgaslagret antas inga förluster ske kontinuerligt utan förlusterna som sker i kompression och lager beräknas tillsammans när vätgasen når lagret.

5.3.3 Sol, vind, batteri och biogasmotor

Effekt från drift av en biogasmotor modellerades i kombination med effektbidrag från sol, vind och batteri i ö-drift. Biogasmotorn modellerades efter samma prioritetsordning som algoritmen i kap. 5.3.2, men istället för elproduktion från bränslecell nyttjades i detta fall en biogasmotor. Biogasmotorn var därmed i drift alla timmar då effektbidrag från sol, vind och batteriladdning inte var tillräcklig för att tillgodose elbehovet. Processflöde och prioritetsordning av energikällorna kan ses i figur 8.



Figur 8: Processflöde för de ingående energisystemen enligt angiven prioritetsordning för att uppnå elbehovet på timbasis. Den streckade linjen mellan 1 och 2 sker endast vid överproduktion av effekt. Den streckade linjen från LBG-lagret påvisar möjlig användning.

Beroende på fordonsfall så varierade elbehovet, se avsnitt 5.3.1. Detta medförde att biogasmotorns nödvändiga maxkapacitet skilde sig mellan fordonsfallen. I tabell 6 presenteras biogasmotorns max- och minkapacitet för respektive fordonsfall.

Tabell 6: I tabellen redovisas biogasmotorns kapacitet för respektive fordonsfall

Fordonsfall	Bussar/sopbilar [antal]	Maximal kapacitet [kW]
1	60/19	700
2	90/19	750
3	120/19	800

Mängden rågas som kunde nyttjas som bränsle i biogasmotorn var beroende och begränsad av mängden rågas som behövdes till fordonsgasproduktion för respektive fordonsfall.

5.3.4 LBG

I ö-drift simulerades de lagerkapaciteter som tagits fram för LBG-produktionen i normal drift. Den totala LBG-produktionen i respektive lager antogs kunna förgasas och nyttjas som fordonsgas. Därför testades varje lagerkapacitet tillsammans med bränsleförbrukningen i respektive fordonsfall. Detta för att skapa en uppfattning kring hur länge ett LBG-lager skulle kunna räcka beroende på lagrets volym och antal fordon i drift.

De antaganden som gjorde för LBG-lagret och användandet vid ö-drift är följande:

- Tillräcklig nedkylning av LBG-lagret genom att återföra förvätskad boil-off (energianvändningen motsvarar förvätskningssteget). Ingen ny produktion av LBG sker.
- Inga massförluster sker när CBG skapas från LBG
- Boil-off motsvarar 0,2 % per dygn oavsett storlek på lager

5.4 Modell vid bristsituation

I detta fall utgår simuleringarna från samma förhållanden som vid ö-drift, det vill säga att elbehovet ska försörjas varje timme, med tillägget att endast en procentuell andel av det totala elbehovet ska försörjas. Varje timme ska därmed ska 5, 10, 15 och 20 % av det totala elbehovet täckas i energisystemet med bränslecell. I energisystemet med biogasmotorn testas endast att försörja 10, 15 och 20 % av det totala elbehovet. Kvarvarande elbehov utöver dessa procentuella andelar anses täckas med hjälp av effekt från elnätet.

6 Resultat

I detta avsnitt presenteras resultaten för de olika driftlägena och för de olika energisystemen. Först tas driftläget normal drift upp, därefter ö-drift och till sist bristsituation. Respektive energisystem tas upp separat i respektive driftläge.

6.1 Normal drift

I följande avsnitt presenteras resultaten för energisystemen i normal drift, det vill säga när energitillförseln antas vara obegränsad.

6.1.1 Sol, vind och vätgas

I detta avsnitt presenteras resultaten för produktion av vätgas genom elektrolys vid normal drift. Tabellerna visar resultatet för produktion av vätgas, syrgas och värme i olika fall, med och utan försäljning samt olika energikällor. Dessutom presenteras maximala inkomster för försäljning av produkter och biprodukter. Resultaten som presenteras visar på hur en elektrolysör kan användas vid normal drift och hur en bränslecell kan användas vid bristsituation och ö-drift. Därmed hålls vätgasproduktion och omvandling av vätgas till elektricitet, separat beroende på ändamålet. En bränslecell hade även kunnat användas vid normal drift, däremot, med tanke på att just mängden vätgas och därmed också vätgaslagret är avgörande för hur länge som elbehovet kan tillgodoses vid ö-drift, togs beslutet att inte omvandla vätgas till el för att stödja elnätet. I tabell 7 visas resultatet för om vätgas produceras från solen respektive solen tillsammans med el från elnätet vid låglasttimmar. Detta är alltså den maximala produktionen som simulerats. De maximala mängderna syrgas och värme samt inkomsterna för dessa om produkterna säljs redovisas i tabell 8. Om solen nyttjas för att sänka lasttoppar blir inte vätgasproduktionen särskilt mycket mindre, vilket visas i tabell 9. Detta eftersom solesproduktionen är så pass liten vid lasttopparna som sker oftast under vinterhalvåret. Genom att nyttja el från elnätet under tider då elnätet är lågt belastat kan mer vätgas produceras. En knappt dubblerad produktion av vätgas är möjlig om elektrolysören producerar lika mycket dessa timmar som den producerar som mest när solen nyttjas, vilket kan ses i tabell 7. I samtliga fall då vätgas som producerats från elnätet säljs, kommer kostnaden för el som köpts in vara lägre än försäljningsintäkterna från vätgasen (enligt tabell 7 och 10). Utöver detta fås även intäkter från syrgas och värme, vilket redovisas i tabell 10.

Värt att beakta är att värmeproduktionen beräknats enligt det som är möjligt att omhänderta från en elektrolysörs värmeproduktion. Däremot har ingen hänsyn tagits till återvinningssystem, endast vad som är möjligt. Övrig värme räknas som spillvärme/förluster.

Tabell 7: I tabellen presenteras resultaten för vätgasproduktion, lagret och eventuella kostnader för vätgas producerad från solen respektive solen och elnätet vid låg last.

Energikälla	Vätgas [kg]	Energiinneh. lager [kWh]	Syrgas [kg]	Värme [kWh]	Energibehov elektrolysör [kWh]	Energibehov kompressor [kWh]	Lager-volym [m ³]	Kostnad el [kr]
Solen	2 733	94 745	21 687	28 255	150 293	14 430	61	0
Solen + elnät	5 139	178 190	40 789	53 141	282 670	27 136	115	23 684

Tabell 8: I tabellen presenteras resultaten försäljning av värme och syrgas då både solen respektive solen tillsammans med el från elnät används för elektrolysören.

Energikälla	Syrgas [kg]	Värme [kWh]	Inkomst syrgas [kr]	Inkomst värme [kr]
Solen	21 687	28 255	7 374	23 452
Solen + elnät	40 789	53 141	13 868	44 107

Tabell 9: I tabellen presenteras resultaten för vätgasproduktion, lagret och sol- och vindel som använts för att kapa lasttoppar.

Last-timmar [h]	Vätgas [kg]	Energiinneh. lager [kWh]	Syrgas [kg]	Värme [kWh]	Energibehov elektrolysör [kWh]	Energibehov kompressor [kWh]	Lager-volym [m ³]	Anv. sol- och vindel [kWh]
200	2 728	94 568	21 647	28 203	150 010	14 401	61	14 229
300	2 724	94 462	21 622	28 170	149 820	14 385	61	22 962

Tabell 10: I tabellen presenteras resultaten för försäljning av vätgas producerad genom el från elnätet, inkomst och slutlig lagervolym.

Andel till försäljning [%]	Försäljning vätgas [kg]	Inkomst vätgas [kr]	Lagervolym [m ³]
100	2 407	216 621	61
50	1 204	108 315	88
30	722	64 986	99

6.1.2 Sol, vind och biogasmotor

I detta avsnitt presenteras resultatet för biogasmotorn tillsammans med övriga system vid normal drift. Biogasmotorn kan användas för att kapa lasttoppar på elnätet om elnätet annars är stabilt. Detta skulle generera en viss inkomst beroende på driften och kapaciteten hos biogasmotorn. Följande snittpris för elpriset har använts:

- Snittpris under de 200 högsta timmarna: 1,9972 kr/kWh
- Snittpris under de 300 högsta timmarna: 1,9455 kr/kWh
- Snittpris under de 500 högsta timmarna: 1,7054 kr/kWh

Resultatet redovisas i tabell 11. Nyttjandet av en biogasmotor för att sänka lasttoppar innebär inte någon större minskning av den totala rågasproduktionen. Konsekvenserna av att använda en biogasmotor är alltså inte särskilt betydande för mängden producerad biometan. Som mest minskar produktionen med 2,4 % för att kapa lasttoppar. Kapaciteten hos biogasmotorn och antalet lasttimmar är avgörande för hur mycket som biogasmotorn kan producera och därmed hur mycket lasttopparna minskar. Därtill är elproduktionen för en biogasmotor med maxkapacitet 700 kW som körs under elnätets 500 högst belastade timmar ungefär densamma som för en biogasmotor med maxkapacitet 1100 kW som körs under elnätets 302 högst belastade timmar. Därmed är detta värt att beakta när det kommer till att avgöra vilken kapacitet som bör investeras i och hur driften bör se ut.

Tabell 11: I tabellen presenteras resultaten för användandet av en biogasmotor i normal drift. Antalet lasttimmar (timmar med topplast) och maxkapaciteten hos biogasmotorn har varierats.

Last-timmar [h]	Nyttjad rågas [Nm ³]	Andel av total rågasproduktion [%]	Maxkapacitet [kW]	Elproduktion [MWh]	Värme [kWh]	Inkomst såld el [kr]
500	194 440	2,40	700	350,00	236 250	596 880
200	78 556	0,97	700	141,40	95 445	282 410
200	84 167	1,04	750	151,50	102 260	302 580
200	89 778	1,11	800	161,60	109 080	322 750
300	117 440	1,45	700	211,40	142 690	411 280
300	125 830	1,55	750	226,50	152 890	440 650
300	134 220	1,66	800	241,60	163 080	470 030
300	184 560	2,28	1100	332,20	224 235	646 290

6.1.3 LBG

I detta avsnitt presenteras resultaten för hur mycket LBG som produceras, baserat på om avfacklad rågas respektive avfacklad rågas tillsammans med en del av biogasanläggningens biometanproduktion används. Procentsatserna 1, 5 och 10 % anger andelarna av biogasanläggningens totala biometanproduktion som används för att producera LBG (avfacklad gas inkluderas inte i denna). Procentsatserna 0, 50 och 100 % anger hur stor del av LBG:n som producerats från biogasanläggningens totala biometanproduktion som säljs under året. Lagervolymen samt energiinnehållet i lagret anger det slutliga lagrets storlek och energiinnehåll under årets sista timme, det vill säga att volymen LBG som ska ha sålts, har sålts. Värt att notera är att mängden avfacklad gas endast baseras på data från ett år (2020) och att mängden gas som facklas bort kan skilja sig från år till år.

Tabell 12: I tabellen presenteras resultaten för LBG-lagret samt försäljning av LBG.

Fall	Försäljning LBG* [%]	Volym försäljning [m ³]	Lagervolym [m ³]	Energiinnehåll i lager [GWh]	Inkomst [SEK]
Avfackling	0	0	358	2,10	0
Avfackling + 1 %	0	0	451	2,65	0
	50	47	405	2,37	295 849
	100	93	358	2,10	591 742
Avfackling + 5 %	0	0	825	4,84	0
	50	234	592	3,47	1 479 369
	100	467	358	2,10	2 958 710
Avfackling + 10 %	0	0	1292	7,58	0
	50	467	825	4,84	2 958 710
	100	934	358	2,10	5 917 419

*Anger hur stor del som går till försäljning av LBG:n som producerats från den totala biometanproduktionen.

Resultatet i tabell 12 visar att om endast avfacklad rågas används för att producera LBG uppnås ungefär en tredjedel så stort lager som om både avfacklad rågas tillsammans med 10 % av den totala biometanproduktion hade använts (i fallet då ingen LBG säljs under året). Volymen hos lagret om endast avfacklad rågas används är ungefär lika stor som i fallet med avfacklad rågas tillsammans med 1 % av den totala biometanproduktionen. Därmed bör det övervägas om det är värt att utnyttja 1 % av den totala biometanproduktionen för att producera LBG eller om det är mer rimligt att prioritera fordonsgasproduktion. Därtill bör det övervägas huruvida det är rimligt att producera en större mängd LBG från den totala biometanproduktion och sälja en del eller om det är mer rimligt att producera en mindre mängd LBG från den totala biometanproduktion och inte sälja LBG alls (som i fallet där den slutgiltiga volymen blir 825 m³). Priset för fordonsgas respektive priset för LBG samt kostnader relaterat till lagret bör övervägas för detta beslutsfattande. Om den extra producerade LBG:n ger större intäkter än om biometanet hade använts för fordonsgasproduktion, bör detta vara ett argument för att producera mer LBG från biometanproduktion.

6.2 Ö-drift

I detta avsnitt presenteras resultaten för energisystemen vid ö-drift, det vill säga när elbehoven baserade på de olika fordonsgasbehoven måste tillgodoses genom egen produktion.

6.2.1 Sol, vind, batteri och vätgas

I detta avsnitt presenteras resultatet för om en bränslecell används i ö-drift tillsammans med intermittent elproduktion och batteri. I tabellerna 13 och 14 visas resultatet för antalet timmar som behovet uppfylls baserat på olika elbehov. I tabell 13 tas ingen hänsyn till att elbehovet för tankningen och elbehovet för uppgraderingen varierar beroende på fordonsgasbehovet (här ska alltså det ursprungliga elbehovet vid normal drift försörjas). I tabell 14 tas hänsyn till variationerna beroende av fordonsgasbehovet. Tabell 13 visar resultatet för hur vätgasen har producerats, maxkapaciteten för bränslecellen, värmeproduktionen och antalet timmar som det totala elbehovet uppfylls. Resultatet visar inte fallen då solex använts för toppreduceringar under normal drift eftersom skillnaden var så liten i den totala vätgasproduktionen. De timmarna det fanns lasttoppar var ändå solexbidraget så litet så det fanns

inte så mycket att bidra med, därav ingen större skillnad i resulterande vätgasproduktion.

Högsta antalet timmar som elbehovet uppfylls i fallet med elbehovet som inte tar hänsyn till fordonsgasbehovet, i tabell 13, är lägre än i fallet med elbehov som baseras på fordonsgasbehovet, i tabell 14 (209 timmar jämfört med 297). Därmed är elbehovet större i fallet då fordonsgasbehovet inte tas hänsyn till. Det är också tydligt att ett ökat elbehov innebär en högre kapacitet för bränslecellen och färre antal timmar som elbehovet uppfylls, vilket kan ses i tabell 14. Vid samma elbehov, 19 sopbilar och 60 bussar i tabell 14, blir maxkapaciteten hos bränslecellen något högre om vätgas från solex tillsammans med 100 % av vätgasen från elnätet används. Eftersom antalet timmar som elbehovet uppfylls är högre i fallet med vätgas från solex tillsammans med 100 % av vätgasen från elnätet, tyder detta på att elbehovet ökar något när det närmar sig 297 timmar.

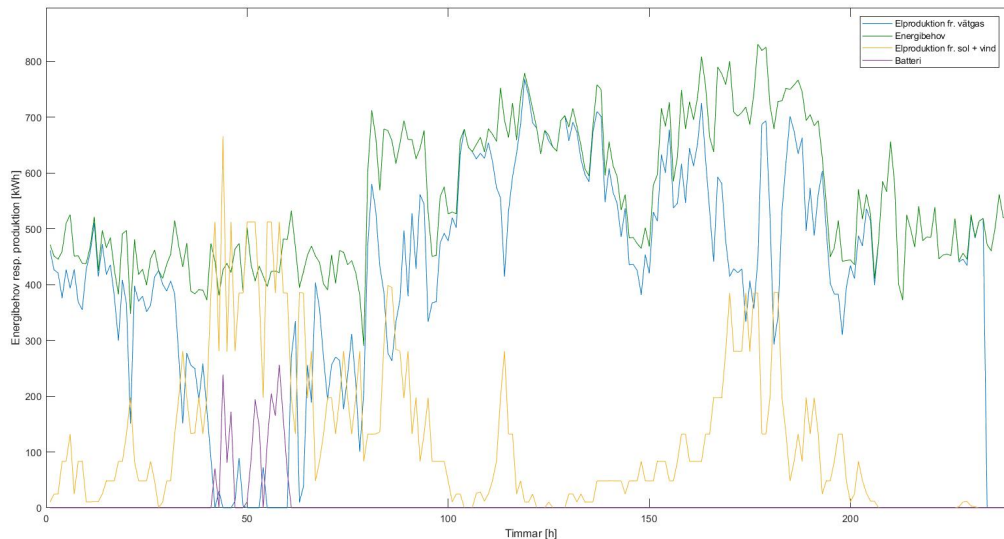
I figur 9 visas fallet med högst fordonsgasbehov (det vil säga 19 sopbilar och 120 bussar) och nyttjande av vätgaslager vid vätgasproduktion från solex och el från elnätet (när inget säljs). Antalet timmar som behovet uppfylldes var 242. Vid timme 242 går alltså effektbidraget från bränslecellen ner till noll eftersom att vätgaslagret tar slut (vilket kan ses som en lodrät blå linje i figuren). Figuren visar tydligt hur bränslecellen arbetar för att förse elbehovet och hur denna förhåller sig till övriga bidrag från intermittent energi och batteri. Det är tydligt att bidraget från bränslecellen är som störst då bidraget från intermittenta energikällor och batteriet är som lägst. Driften av bränslecellen förhåller sig på så sätt till elbehovet.

Tabell 13: I tabellen presenteras resultaten för om en bränslecell används för att producera el från vätgas för att uppfylla elbehovet i ö-drift. De procentuella andelarna, 100, 70 respektive 50 %, anger hur stor del av den vätgas som producerats från el från elnätet som finns kvar i lagret. Vid 100 % har ingen vätgas sålts, medan vid 50 % har 50 % av denna vätgas sålts under året.

Fall	Vätgas [kg]	Maxkapacitet [kW _{el}]	Värmeproduktion bränslecell [kWh]	Antal timmar uppfyllt elbehov [h]
Vätgas från solex	2 733	769	615	130
Vätgas från solex + 100 %	5 139	769	615	209
Vätgas från solex + 70 %	4 417	769	615	184
Vätgas från solex + 50 %	3 936	769	615	166

Tabell 14: I tabellen presenteras resultaten för om en bränslecell används för att producera el från vätgas för att uppfylla elbehovet i ö-drift vid ett elbehov som baseras på fordonsgasbehovet. Resultaten inkluderar inte såld vätgas, utan endast vätgas från solex respektive vätgas från solex tillsammans med 100 % av vätgas producerad genom el från elnätet.

Sopbilar/Bussar [st]	Vätgas från solex		Vätgas från solex + 100 %	
	Maxkapacitet [kW _{el}]	Antal timmar uppfyllt elbehov [h]	Maxkapacitet [kW _{el}]	Antal timmar uppfyllt elbehov [h]
19/60	590,67	178	595,55	297
19/90	634,09	158	634,09	273
19/120	677,52	143	677,52	242



Figur 9: Figuren visar fallet med högst fordonsgasbehov och hur bränslecellen arbetar i förhållande till energibehovet och bidraget från intermittenta energikällor och batteriet. Med energibehov avses elbehovet.

6.2.2 Sol, vind, batteri och biogasmotor

I detta avsnitt presenteras resultaten för om en biogasmotor används i ö-drift för att förse det totala elbehovet tillsammans med intermittent elproduktion och batteri. I simuleringarna används det nuvarande lagret, eller gasklockan, på 400 m³ för att kunna kortsiktigt lagra producerad rågas som blir över efter att producera biometan och utnyttjande i biogasmotor. Den överblivna rågasen i lagret används i de fall där biometanbehovet alternativt elbehovet inte kan tillgodoses med den rågas som produceras just den timmen eller de timmarna. Maxkapaciteterna för biogasmotorn är 700, 750 respektive 800 kW_{el} för fordonsgasbehovet för fallen med 60, 90 respektive 120 bussar. I tabell 15 redovisas resultatet för utnyttjande av en biogasmotor där endast vanlig rågasproduktion nyttjas. I tabell 16 redovisas resultatet för utnyttjande av en biogasmotor där vanlig rågasproduktion tillsammans med gas som normalt sett avacklas, nyttjas.

Resultaten i tabell 15 och 16 visar på att mängden rågas som inte omhändertas samt överproduktionen av elektricitet minskar ju högre fordonsgasbehovet är. Dessutom är det tydligt att ju högre fordonsgasbehovet är, desto större del av det totala elbehovet uppfylls inte. Ju fler bussar, desto större del av rågasen prioriteras för att uppfylla fordonsgasbehovet och desto mindre del av den producerade rågasen kan användas av biogasmotorn. Därmed finns det risk för att biogasmotorn inte får tillräckligt med rågas för att kunna förse elbehovet. Däremot är mängderna lägre i fallet där avacklad gas nyttjas. Antalet timmar då det inte finns tillräckligt med rågas för att både uppfylla fordonsgasbehovet och elbehovet ökar ju större fordonsgasbehovet är, men minskar om även avacklad gas används. Det enda fallet där detta inte stämmer är när 19 sopbilar och 90 bussar ska försörjas. I detta fall ökade antalet timmar där gasbehovet inte uppfylls när avacklad gas används. Anledningen till detta har att göra med själva behandlingen av indatan.

Eftersom den data som fanns tillgänglig redovisar mängden gas som skickas till gasreningen innehåller denna också driftstopp och extremt låga värden. Däremot är rågasproduktionen betydligt jämnare (så länge substrat finns tillgängligt). Därmed byttes de värden som var låga respektive noll ut mot ett värde som motsvarade medelproduktionen av rågas. I fallet då

avfacklad rågas adderas till den vanliga rågasproduktionen är det tydligt att det fanns några värden som precis översteg gränsen för att ett värde skulle räknas som lågt och därmed inte byttes ut mot medelvärdet. Därmed tillkom det 3 timmar då det inte fanns tillräckligt med rågas (se tabell 16).

Det framgår också att samtliga tre fordonsgasbehov resulterar i att en stor mängd rågas inte hanteras vilket beror på att lagret blir fullt. I praktiken skulle denna rågas kunna nyttjats till ökad elproduktion för vissa timmar under året. Överproducerad elektricitet kan utnyttjas inom andra verksamheter, exempelvis sjukhus, skolor etc. Därtill är det tydligt att i fallet med 90 bussar är värmeproduktionen högre än i resterande fall. Detta beror på att biogasmotorn inte klarar att köra alla drifttimmar i fallet med 120 bussar då rågasmängden vissa timmar är för låg. Om rågasmängden varit tillräckligt stor för att täcka den bränslemängd som behövs till biogasmotorn för fallet med 120 bussar, hade också värmeproduktionen varit större än för fallet med 90 bussar. Värt att tänka på är att om elbehovet inte kan tillgodoses, kan inte heller fordonsgasbehovet tillgodoses eftersom denna process är beroende av att det finns tillräckligt med eleffekt för att försörja verksamheten. Därmed finns det en begränsning i de redovisade resultaten (detta förklaras ytterligare i avsnittet *Felkällor*).

Tabell 15: I tabellen presenteras resultaten för om en biogasmotor används för att producera el från rågas för att uppfylla elbehovet i ö-drift vid ett behov som baseras på fordonsgasbehovet.

Sopbilar/Bussar [st]	Behov fordonsgas [Nm ³]	Ej hanterad rågas* [GWh]	Överproduktion el [MWh]	Värme [GWh]	Ej uppfyllt elbehov [MWh]	Antal timmar otillräcklig rågas** [h]
19/60	2 218 500	5,70	256,86	2,32	0	0
19/90	3 129 800	2,98	200,21	2,47	50,38	0
19/120	4 041 000	0,72	123,11	1,96	604,15	498

*Rågas som inte används eftersom lagret blir fullt.

**Antalet timmar som fordonsgasbehovet, och därmed också elbehovet, inte uppfylls.

Tabell 16: I tabellen presenteras resultaten för om en biogasmotor används för att producera el från rågas för att uppfylla elbehovet i ö-drift vid ett elbehov som baseras på fordonsgasbehovet. Rågasen som används för att förse fordonsgasbehovet och elbehovet kommer från den ursprungliga produktionen och rågas som annars skulle facklas bort.

Sopbilar/Bussar [st]	Behov fordonsgas [Nm ³]	Ej hanterad rågas* [GWh]	Överproduktion el [MWh]	Värme [GWh]	Ej uppfyllt elbehov [MWh]	Antal timmar otillräcklig rågas** [h]
19/60	2 218 500	5,95	256,86	2,32	0	0
19/90	3 129 800	3,20	210,88	2,53	9,92	3
19/120	4 041 000	0,81	134,30	2,08	439,17	272

*Rågas som inte används eftersom lagret blir fullt.

**Antalet timmar som fordonsgasbehovet, och därmed också elbehovet, inte uppfylls.

6.2.3 LBG

I detta avsnitt presenteras resultaten för användning av LBG-lagret där LBG:n producerats från avfacklad gas respektive avfacklad gas tillsammans med en andel av den totala biometanproduktionen (med och utan försäljning av LBG). Tanken med LBG-lagret är att kunna

använda det i fallen när rågasproduktionen vid biogasanläggningen inte räcker till för att förse fordonsgasbehovet. Alternativt kan LBG-lagret användas för att förse fordonsgasbehovet samtidigt som rågasen från biogasanläggningen används i en biogasmotor för att producera el och värme.

Tabell 17, 18 och 19 visar resultatet för hur länge LBG-lagret räcker om lagret skulle tömmas konstant med fordonsbehovet varje timme. Resultatet i tabell 17 blir detsamma som i fallen där 100 % av LBG:n som producerats från total biometanproduktion säljs under året. Därmed presenteras inte en separat tabell för de fallen.

Tabell 17: I tabellen presenteras resultaten för LBG-lagret vid olika fordonsbehov där LBG:n endast producerats från avfacklad rågas.

Energiinnehåll, lager [GWh]	Sopbilar/Bussar [st]	Bränsleförbrukning [MWh/h]	Antal timmar uppfyllt behov [h]
2,10	19/60	2,45	857
2,10	19/90	3,45	608
2,10	19/120	4,46	471

Tabell 18: I tabellen presenteras resultaten för LBG-lagret vid olika fordonsbehov där LBG:n producerats från avfacklad rågas tillsammans med olika procentuella andelar (1, 5 respektive 10 %) av den totala biometanproduktionen. I detta fall har ingen LBG sålts under året.

Fall	Energiinnehåll lager [GWh]	Sopbilar/Bussar [st]	Bränsleförbrukning [MWh/h]	Antal timmar uppfyllt behov [h]
Avfackling + 1 %	2,65	19/60	2,45	1 082
	2,65	19/90	3,45	767
	2,65	19/120	4,46	594
Avfackling + 5 %	4,84	19/60	2,45	1 976
	4,84	19/90	3,45	1 401
	4,84	19/120	4,46	1 085
Avfackling + 10 %	7,58	19/60	2,45	3 095
	7,58	19/90	3,45	2 194
	7,58	19/120	4,46	1 699

Tabell 19: I tabellen presenteras resultaten för LBG-lagret vid olika fordonsbehov där LBG:n producerats från avfacklad rågas tillsammans med olika procentuella andelar (1, 5 respektive 10 %) av den totala biometanproduktionen. 50 % av LBG:n från den totala biometanproduktionen har sålts under året i respektive fall.

Fall	Energiinnehåll lager [GWh]	Sopbilar/Bussar [st]	Bränsleförbrukning [MWh/h]	Antal timmar uppfyllt behov [h]
Avfackling + 1 %	2,37	19/60	2,45	968
	2,37	19/90	3,45	686
	2,37	19/120	4,46	531
Avfackling + 5 %	3,47	19/60	2,45	1 417
	3,47	19/90	3,45	1 004
	3,47	19/120	4,46	778
Avfackling + 10 %	4,84	19/60	2,45	1 976
	4,84	19/90	3,45	1 401
	4,84	19/120	4,46	1 085

Från tabell 17, 18 och 19 framgår det tydligt att LBG-lagret inte kan tillgodose något av fordonsgasbehoven under ett helt år. Som mest kunde 19 sopbilar och 60 bussar förses med fordonsgas under 3 095 timmar, vilket motsvarar ca 18 veckor, då avfacklad gas tillsammans med 10 % av den totala biometanproduktionen användes för att producera LBG. Antalet timmar som behovet av fordonsgas uppfylls är märkbart fler om LBG produceras både från avfacklad gas tillsammans med en del av den totala biometanproduktionen. Dessutom, med tanke på att mängden avfacklad rågas kan variera från år till år, skulle eventuell LBG-produktion vid biogasanläggningen behöva övervägas komma från den totala biometanproduktionen.

För att kunna använda LBG:n som fordonsgas krävs att LBG:n konverteras till CBG. Detta sker, som tidigare nämnts, genom LCBG-teknik. Då det totala elbehovet som ska förses är av stor betydelse när det kommer till ö-drift krävs att detta tas hänsyn till. Enligt Svenskt Gastekniskt Center (2006) är behovet för en LCNG-tankstation lägre än för en CNG-tankstation. Tankstationerna TK3 och TK4, där det tankas fordonsgas i dagsläget i Uppsala, har ett högre energibehov än vad en LCNG-tankstation, eller LCBG-tankstation i detta fall, skulle kräva.

6.3 Bristsituation

I detta avsnitt presenteras resultaten för om en bränslecell respektive biogasmotor används för försörjning av olika andelar av elbehovet vid bristsituation (effekt- och kapacitetsbrist samt strömavbrott).

6.3.1 Sol, vind, batteri och vätgas

I detta avsnitt presenteras resultaten för användning av en bränslecell vid bristsituation. Detta simuleras genom att bränslecellen ska täcka 5, 10, 15 respektive 20 % av anläggningens elbehov varje timme. I resultatet, som visas i tabell 20, är det tydligt att elbehovet uppfylls endast i ett fall, nämligen vid 5 %. Därtill finns det en del outnyttjad energi i lagret vilket kan nyttjas till annan verksamhet om bränslecellen överproducerar el. Däremot när vätgas från både solel och el från elnätet används uppfylls elbehovet nästan under årets alla timmar (8 473 timmar totalt). I detta fall är också bränslecellens kapacitet relativt låg, något som bör tas hänsyn till när det kommer till vilken kapacitet som bör investeras i. Vid test för att se vid vilken gräns som elbehovet uppfylls under årets alla timmar och det samtidigt inte finns outnyttjad energi kvar i lagret, visade sig gränsen ligga på 9,7 % av elbehovet.

Tabell 20: I tabellen presenteras resultaten för om en bränslecell används för att producera el från vätgas för att uppfylla en viss procentuell andel av det totala elbehovet för anläggningen. Detta kan ske om elnätet inte kan tillgodose det totala elbehovet.

Vätgas	Andel av elbehov [%]	Maxkapacitet [kW_{el}]	Antal timmar uppfyllt elbehov [h]	Återstående energi i lager [MWh]
Vätgas från solet	5	38,50	8 760	33,96
Vätgas från solet + 100 %	5	38,50	8 760	75,68
Vätgas från solet	10	73,58	6 790	0
Vätgas från solet + 100 %	10	77,03	8 473	0
Vätgas från solet	15	114,42	1 598	0
Vätgas från solet + 100 %	15	114,42	4 056	0
Vätgas från solet	20	152,56	940	0
Vätgas från solet + 100 %	20	152,56	1 919	0

6.3.2 Sol, vind, batteri och biogasmotor

I detta avsnitt presenteras resultaten för användning av en biogasmotor vid bristsituation (effekt- och/eller kapacitetsbrist samt strömavbrott). Detta simuleras genom att biogasmotorn ska täcka 10, 15 respektive 20 % av anläggningens elbehov varje timme.

Resultatet redovisas i tabell 21. Då biogasmotorns försörjning av rågas sker genom att använda en del av biogasanläggningens rågasproduktion, alternativt gas till avfackling, uppfylls elbehovet varje timme. Därtill sker det överproduktion av el då behovet understiger 50 % av maxkapaciteten. Det är tydligt att ju högre behovet är och ju högre kapacitet som behövs för biogasmotorn, desto högre blir också överproduktionen av el. För att kunna täcka 20 % av elbehovet krävs ungefär en dubbelt så hög kapacitet jämfört med i fallet med 10 %.

Tabell 21: I tabellen presenteras resultaten för om en biogasmotor används för att förse en viss procentuell andel av det totala elbehovet för anläggningen. Detta kan ske om elnätet inte kan tillgodose det totala elbehovet.

Andel av elbehov [%]	Mängd rågas [Nm^3]	Maxkapacitet [kW_{el}]	Överproduktion el [kWh]	Värme [kWh]
10	24 892	77,03	16 129	75 609
15	65 121	115,55	41 374	197 806
20	114 980	154,07	70 201	349 245

6.4 Ekonomi

I detta avsnitt presenteras en kort ekonomisk analys över investeringskostnader samt underhålls- och driftkostnader. Tillgänglig information kring detta område har i vissa fall varit bristfällig, vilket är anledningen till att inte samtliga kapaciteter för respektive komponent och deras kostnader presenteras. Den ekonomiska analysen avser endast att ge en uppfattning om de ungefärliga beloppen gällande investering och drift. Resultatet för den ekonomiska analysen presenteras i tabell 22.

För att beräkna respektive komponents tillhörande kostnader har ett antal viktiga parametrar tagits med. Modulkostnaden, installationskostnaden och transportkostnaden, vilka tillsammans räknas som den totala investeringskostnaden, för biogasmotorn har beräknats enligt ekvation 5, 6 och 7 hämtade från ASUE (2014). Underhållskostnaden för biogasmotorn har beräknats enligt ekvation 8 hämtad från ASUE (2014). P_{el} är den maximala eleffekten som biogasmotorn levererar.

$$Modulkostnad = 4,276 \cdot P_{el}^{-0,325} \quad (5)$$

$$Installationskostnad = \frac{60}{100} \cdot modulkostnad \quad (6)$$

$$Transportkostnad = \frac{6}{100} \cdot modulkostnad \quad (7)$$

$$Underhållskostnad = 6,869 \cdot P_{el}^{-0,287} \quad (8)$$

Drift- och underhållskostnaderna för LBG (polering, förvätskning och lager) beräknas genom antagandet att de motsvarar 2,5 %/år av investeringskostnaden (den mekaniska investeringen). Detta enligt Tamms (2018) beräkningar för en LBG-anläggning motsvarande drygt 30 GWh/år, vilket är väsentligt högre än resultaten för LBG-lagret i denna studie. Underhållskostnaden, eller OPEX, för elektrolysören har beräknats enligt att OPEX motsvarar 1-3 % av CAPEX (investeringskostnaden) (Christensen 2020).

Investerings- och driftkostnaden för bränslecellen är något överdimensionerade då en kapacitet på 1000 kW_{el} inte förekommer i resultaten i denna rapport (närmast är ca 700 kW_{el}). Däremot borde dessa motsvara de verkliga värdena ungefär, om än något i överkant. Batteriets kostnad har tagits från ett examensarbete av Andersson (2018) där ett 400 kWh-batteri undersöktes. I rapporten angavs att ett batteri på 400 kWh borde innebära en investeringskostnad på 450 \$/kWh. Denna kostnad dubblerades för att motsvara batteriet på 800 kWh. Enligt NREL (u.å.) motsvarar OPEX 2,5 % av kapitalkostnaden.

Investeringskostnaden för ett vätgaslager med tryck 700 bar kunde inte lokaliseras genom de eftersökningar som gjordes. Därmed presenteras investeringskostnaden för ett lager med trycket 950 bar enligt Energimyndigheten (2021). OPEX för vätgaslagret antas motsvara 1 % av CAPEX enligt Ek (personlig kommunikation).

Investeringskostnaden för ett vindkraftverk motsvarande 700 kW beräknades genom att använda investeringskostnaden för vindkraftverk motsvarande 0-50 MW på 12 308 kr/kW enligt Energiforsk (2021). I rapporten av Energiforsk (2021) angavs även en drift- och underhållskostnad på 8 öre/kWh vilket användes för denna beräkning.

För LCBG-tankstationen har en investeringskostnad baserad på en LCNG-tankstation med kapacitet 400 Nm³/timme tagits med. Därtill har drift- och underhållskostnaden baserats på den förebyggande underhållskostnaden 0,05 kr/Nm³ enligt Svenskt Gastekniskt Center (2006). Vid beräkning av drift- och underhållskostnaden togs även hänsyn till volymökningen från LBG till CBG samt resultaten för den lägsta och maximala innehållet i LBG-lagret.

Övriga resultat, det vill säga kostnader, som presenteras i tabell 22 har tagits direkt från källorna som anges.

Tabell 22: I tabellen presenteras komponenternas ungefärliga investerings- samt drift- och underhållskostnader.

Komponent	Kapacitet	Investerings- kostnad [MSEK]	Drift- och underhållskostnad [SEK]	Källor
Biogasmotor	700 kW _{el}	6,18	31 620 - 37 095	ASUE (2014)
	750 kW _{el}	6,48	31 884 - 36 718	ASUE (2014)
	800 kW _{el}	7,10	32 386 - 36 465	ASUE (2014)
LBG - polering	5 GWh/år	1,40	35 000	Tamm & Andersson (2019) Tamm (2018)
LBG - förvätskning	5 GWh/år	4,00	100 000	Tamm & Andersson (2019) Tamm (2018)
LBG - lager	5 GWh/år	1,50	37 500	Tamm & Andersson (2019) Tamm (2018)
Solkraftanläggning	250 kW	1,75	Inget underhåll	Tang et al. (2021)
Vindkraftverk	700 kW	8,62	33 102	Energiforsk (2021)
Elektrolysör	270 kW	6,80	68 000 - 204 000	Tang et al. (2021) Christensen (2020)
Bränslecell	1000 kW _{el}	45,65	628 200	Ammermann et al. (2015)
Batteri	800 kWh	3,51	87 840	Andersson (2018) NREL (u.å.)
Vätgaslager, inkl. kompressor (900 bar)	5000 kg	83,85	8 384 500	Energimyndigheten (2021) Ek, personlig komm.
LCBG - tankstation	400 Nm ³ /h	3,70	10 239 - 36 951	Svenskt Gastekniskt Center (2006)

7 Känslighetsanalys

Alla simuleringar i studien utgår från beräkningar vars ingående parametrar har uppskattats från litteraturstudier. Därför bör hänsyn tas till de osäkerheter som beräkningarna medför vid analys av resultaten. Samtliga simuleringar i ö-drift har baserats på elbehoven för de tre fordonsfall som presenterades i tabell 5. Elbehoven beror av mängden producerad fordonsgas och därav bränsleförbrukningen för respektive fordonsfall.

På grund av detta har en känslighetsanalys utförts för att undersöka vilken osäkerhet parametern för bussarnas bränsleförbrukning medför i resultaten.

I tabell 23 redovisas resultaten för nyttjandet av en biogasmotor i ö-drift för fordonsfallet med 19 sopbilar och 90 bussar. I analysen har bränsleförbrukningen per buss (i kWh per timme) minskats respektive ökats med 20 %. I tabellen redovisas endast de resultat som direkt påverkar elenergiförsörjningen.

Resultaten visar att bränsleförbrukningen har väldigt stor påverkan på elenergiförsörjningen. Antalet timmar som mängden rågas inte räckte till efterfrågad fordonsgasproduktion ökade kraftigt vid 20% ökning av bränsleförbrukningen. Däremot medförde en minskning med 20% att mängden rågas alltid var tillräcklig för efterfrågad fordonsgasproduktion. Som följd minskade respektive ökade storleken på det elbehov som inte kunde tillgodoses enligt samma mönster. Trots att rågasmängden var tillräcklig för fordonsgasproduktionen i fall (-20%) räckte den kvarvarande rågasen inte som bränsle för att tillgodose det kvarstående elbehovet vilket kan ses i tabellen.

Tabell 23: Nyttjandet av biogasmotor i ö-drift för fordonsfall (19 sopbilar/90 bussar) vid $\pm 20\%$ variation av bussarnas bränsleförbrukning

Variation [%]	Antal timmar otillräcklig rågas [h]	Ej uppfyllt elbehov [MWh]	Ej hanterad rågas [GWh]
- 20	0	0,24	4,86
0	3	9,92	3,20
+ 20	60	131,00	1,64

I tabell 24 presenteras samma fordonsfall (19/90) och den påverkan som variationen $\pm 20\%$ har för nyttjandet av bränslecell och vätgaslager. I detta fall motsvarar lagret vätgasproduktionen från solel och 100% av bidraget från elnätet (se tabell 24).

Tabell 24: Nyttjandet av bränslecell och vätgaslager i ö-drift för fordonsfall (19 sopbilar/90 bussar) vid $\pm 20\%$ variation av bussarnas bränsleförbrukning

Variation [%]	Maxkapacitet [kW _{el}]	Antal timmar uppfyllt elbehov [h]
- 20	608	287
0	634	273
+ 20	660	251

Bränsleförbrukningen påverkar även hur länge LBG-lagret kan nyttjats. I tabell 25 presenteras resultaten för samma fordonsfall (19/90) vid variation med $\pm 20\%$. LBG-lagret i detta fall antas motsvara produktion av LBG från gas som annars facklas samt 10 % av den vanliga

biometanproduktionen i normal drift, se tabell 18. Även i detta fall är skillnaden mellan fallen relativt stor vilket tyder på att bränsleförbrukningen är en avgörande faktor.

Tabell 25: I tabellen redovisas antalet timmar ett LBG-lager kan tillgodose fordonsgasbehovet för fordonsfall (19/90) vid $\pm 20\%$ variation i bränsleförbrukning.

Variation [%]	Antal timmar uppfyllt behov [h]
- 20	2660
0	2194
+ 20	1869

8 Diskussion

I detta avsnitt diskuteras resultaten som presenterats tillsammans med känslighetsanalysen och ekonomi. En rekommendation för ökad resiliens tas upp och slutligen felkällor. Frågor kring hållbarhet, samhällspåverkan och etik berörs.

8.1 LBG

Som presenterats kan LBG både komma till användning vid normal såväl som ö-drift. Genom att producera LBG möjliggörs både försäljning av LBG till tunga fordon samtidigt som biometanet kan lagras i flytande form för att användas i brist- och krissituationer. Det finns en efterfrågan på LBG och det är fördelaktigt att producera för att sälja av under normal drift. Lagrets volym påverkas naturligtvis, men det krävs att det görs en avvägning mellan hur stora mängder som avses att säljas och slutgiltig storlek på lagret. Ett större lager innebär ökade kostnader och kräver dessutom en viss omsättning i form av att ny LBG tillförs alternativt att boil-off återförvätskas. Samtidigt ger ett större lager fler möjligheter när det kommer till att använda lagret vid ö-drift och vid bristsituationer. Att investera i ett LBG-lager har därför både fördelar och nackdelar.

I bristsituationer och i ö-drift kan det ske driftstopp, om exempelvis inte gasreningen fungerar eller om substrattillgången är knapp. I de fall där fordonsgasbehovet inte kan försörjas bör LBG-lagret utnyttjas. LBG:n behöver i detta fall genomgå en process kallad LCBG för att bli till gas och för att komprimeras till rätt tryck. Om både ett LBG-lager nyttjas tillsammans med framförallt en biogasmotor kan det vara positivt för driften av biogasmotorn. De timmar då fordonsgasbehovet inte kan försörjas kan LBG omvandlas till CBG och biogasmotorn kan då försörjas med en större del av den rågas som produceras av biogasanläggningen. I fallet då det sker överproduktion kan eleffekten utnyttjas på annan verksamhet (exempelvis sjukhus). LBG:n kan också nyttjas i flytande form för att tillgodose ett visst behov för tunga fordon inom långväga transporter och sjöfart. Däremot, i en krissituation liknande ö-driftsfallet bör LBG prioriteras att omvandlas till CBG för att användas för bussar och sopbilar. Ett alternativ till att använda CBG som drivmedel är att utnyttja den i biogasmotorn. Eftersom energiinnehållet är väsentligt högre i CBG, som dessutom genomgått polering om den producerats från LBG, jämfört med rågas kan det vara intressant att överväga att använda det i en biogasmotor. Det kan vara möjligt att anläggningens elbehov skulle i högre mån uppnås om CBG används istället för rågas i biogasmotorn. Däremot, med tanke på de investeringar som LBG innebär är det förmodligen inte lönsamt att uppgradera, polera och förvätska rågas för att sedan omvandla LBG till CBG och slutligen använda den i en biogasmotor med en

relativt låg verkningsgrad. Detta motiverar varför biometan inte används i biogasmotorer i högre utsträckning i dagsläget.

8.2 Biogasmotor

En biogasmotor kan användas både i normal drift och i ö-drift samt vid bristsituation. Användandet av en biogasmotor för att reducera lasttoppar är möjligtvis inte det mest effektiva sättet då en stor del av ingående energi blir till värme. Däremot finns möjligheten att sälja värme via fjärrvärmenätet. Storleken, eller maxeffekten, på biogasmotorn är av väsentlig betydelse. Precis som tabell [11](#) visade kunde en biogasmotor med högre effekt som kördes under färre timmar och en biogasmotorn med lägre effekt som kördes under fler timmar, uppnå ungefär samma resultat. Med tanke på den lägre investeringskostnaden som krävs vid en lägre kapacitet kan det därför vara mer motiverat att nyttja en mindre motor i fler drifttimmar. Däremot kan en biogasmotor med högre kapacitet eventuellt ge större intäkter vid försäljning av effekt vid topplasttimmar då elpriset är högre.

En ytterligare faktor som är av väsentlig betydelse är ursprunget för rågasen som driver biogasmotorn. Att använda gas som normalt går till avfackling för att istället använda till en biogasmotor ger intäkter vid elproduktion. Däremot, om tanken är att producera LBG från avfacklad gas kommer denna produktion att bli mindre om rågasen förbrukas i biogasmotorn. Om istället rågas från vanlig rågasproduktion vid verket används kommer en mindre del kunna gå till biometanproduktion. Här blir det en avvägning mellan att sälja överskottsel respektive biometan.

Användandet av en biogasmotor i bristsituationer och ö-drift handlar till stor del om kapaciteten. När biogasmotorn används för att täcka en del av eller det totala elbehovet är avvägningen mellan kapaciteten för biogasmotorn och kostnaden för den av stor betydelse. Mängden producerad el, och överproducerad el, blir naturligtvis högre om kapaciteten hos biogasmotorn är högre, samtidigt som det krävs en större investering. Att dimensionera biogasmotorn för samhällets behov eller anläggningen tillsammans med annan verksamhet, skulle kräva en väsentligt högre kapacitet. Samtidigt är det inte helt rimligt med tanke på bland annat investeringskostnaden. En biogasmotor med så pass hög kapacitet och ett så pass högt försörjningskrav hade förmodligen inte heller kunnat drivas enbart på den rågasproduktion som sker vid biogasanläggningen och Kungsängsverket idag, även om rågas som annars går till avfackling skulle nyttjas. Det är också värt att beakta att användandet av rågas för att täcka den del av elbehovet som inte kan försörjas med hjälp av el från elnätet, skulle innebära att inte samma mängd fordonsgas kan produceras. Om gas som annars skulle facklas bort används, kan detta eventuellt bidra till att säkra elproduktionen genom biogasmotorn och därmed också biometanproduktionen.

Att använda rågas som annars går till avfackling även i ö-drift kan bidra till en ökad försörjning av fordonsgasbehovet och elbehovet. Mängden överproducerad el kan som tidigare nämnts nyttjas i annan verksamhet. Resultaten visade att det i ett flertal fall saknas tillräckligt med rågas för att uppfylla elbehovet samtidigt som det finns en stor del rågas som inte hanterats, vilket kan ses i tabell [15](#) och [16](#). I ett scenario där rågas som annars avfacklas också nyttjas kan ett större energi- och fordonsgasbehov täckas. Dessutom, tillsammans med ett större rågaslager än det nuvarande lagret, möjliggörs användning av rågas som annars går till spillo när behovet inte tillgodoses med direkt producerad rågas.

Som resultaten har visat, är rågasen som ska användas för att täcka fordonsgasbehovet och elbehovet inte alltid tillräcklig. Elbehovet försörjs däremot större delen av året (ca 90 % av

det totala elbehovet uppfylls). När elbehovet inte förses fullständigt, blir det också problem med att förse fordonsgasbehovet och därmed kan det tillkomma fler timmar då fordonsgasbehovet inte förses än vad som visats i tabellerna. Detta är en brist hos själva algoritmen för biogasmotorn i ö-drift och diskuteras ytterligare i avsnittet *Felkällor*.

En ytterligare aspekt är driften av biogasmotorn. Simuleringen av biogasmotorns drift har kännetecknats av att när behovet överstiger noll men understiger eller är lika stor som hälften av biogasmotorns maximala kapacitet, drivs biogasmotorn på hälften av sin maximala kapacitet. I övriga fall har biogasmotorns drift styrts av behovet som ska tillgodoses. Som tidigare nämnts är det fördelaktigt för livslängden att en biogasmotor inte presterar lägre än hälften av sin maximala kapacitet. Däremot finns det tillfällen då biogasmotorn inte behöver användas, eftersom elbehovet förses med hjälp av intermittenta energikällor och batteri, och biogasmotorns drift går därför ner till noll. Detta växlande mellan kapaciteter kan försämra livslängden på biogasmotorn och det skulle vara mer fördelaktigt att köra motorn på olika driftlägen (exempelvis 50, 75 och 100 %). Fördelen med denna, förutom möjligen en längre livslängd, är att överproduktion av el kan nyttjas på annat håll.

8.3 Intermittenta energikällor och batteri

Som tidigare presenterats i samtliga resultat där elbehovet ska täckas har de intermittenta energikällorna, det vill säga solkraftanläggningen och vindkraftverket, bidragit till att uppfylla elbehovet. Tillsammans med batteriet har lagring av överproducerad el möjliggjorts vilket har varit fördelaktigt för att ta tillvara på så stor del av den intermittenta energin som möjligt och därmed kunna nyttja bränslecellen respektive biogasmotorn mindre. Fördelen med att ha två olika intermittenta energikällor är att produktionen av el från respektive kraftanläggning sker under olika tider på året. Därmed gynnas driften av batteriet i detta fall bättre än om endast en av energikällorna hade använts eftersom batteriet laddas och töms jämnare och oftare under året.

8.4 Elektrolysör och bränslecell

Elektrolysören har i denna studie endast använts i normal drift och mängden vätgas som har producerats har varit avgörande för hur länge elbehovet kan tillgodoses i ö-drift. Att producera el från vätgas för att avlasta elnätet vid lasttoppar har väldigt liten påverkan på nätet på grund av de små marginaler som kan nyttjas från vätgasproduktion som simulerats i detta projekt. Detta undersöktes därför inte utan det ansågs vara värt att prioritera vätgasen till ö-drift. Hur vätgasen produceras, via solceller respektive elnätet, är också avgörande för vilka kostnader som produktionen innebär. Nyttjande av elnätet under timmar då det är lågt belastat är fördelaktigt, samtidigt som det innebär en extra kostnad i form av elnätskostnader samt kostnader relaterade till vätgaslagrets storlek. Intäkter kan genereras från att sälja vätgas, syrgas och värme. Däremot är det värt att beakta att eftersom vätgasen helt eller delvis produceras från solceller, sker också en stor mängd produktion av värme under sommarhalvåret. Därmed är denna värme inte lika eftertraktad och kan därför bli svårare att sälja alternativt säljas billigare jämfört med om värmen genereras under vinterhalvåret.

I fallet där bristsituationer simulerades var det tydligt att intermittent energi och kapaciteten hos bränslecellen är avgörande. Värt att notera är att den intermittenta elproduktionen har stor påverkan på antalet timmar som vätgaslagret räcker. Skillnaden i antalet timmar, beroende på om vätgasen kommer från solceller respektive solceller och elnätet, blir större i fallet med exempelvis en minskning i eltillförsel med 15 % än i fallet med en minskning med 20 %.

Vätgasen tar slut fortare när klimatet är kallare än när det är varmare och är beroende av om det blåser respektive om solinstrålningen är hög. Resultaten tyder på att använda bränslecell med lägre kapacitet gynnar sig när det handlar om att kunna förse anläggningens elbehov vid instabil elförsörjning från nätet. Den högsta kapaciteten landade på ca 153 kW_{el} för bränslecellen i fallet där 20 % av elbehovet skulle uppnås varje timme. En lägre kapacitet är också mer ekonomiskt försvarbart.

När det kommer till att lagra vätgasen under lång tid, det vill säga att producera under ett år och låta det vara orört under tiden, innebär att en större lagringskapacitet behövs. Alternativet är att sälja av vätgas under året, använda vätgasen för att producera el för att tillgodose anläggningens behov eller sälja elen via elnätet.

En viktig aspekt är målet med att ha elektrolysör och bränslecell. Om målet är att kunna förse anläggningens elbehov i ö-drift, krävs ett större lager och kapacitet hos bränslecellen än om målet är att åstadkomma ett system där en del av behovet kan försörjas (vid bristsituation) genom elproduktion på plats.

8.5 Känslighetsanalys

I känslighetsanalysen kan det konstateras att bränsleförbrukningen för bussarna har en betydande påverkan på samtliga simuleringar i ö-drift och är en känslig parameter. Bränsleförbrukningen har som störst påverkan på resultaten vid användning av en biogasmotor. Detta är förklarligt med tanke på att fordonsgasbehovet i detta fall inte endast påverkar elbehovet på anläggningen (det vill säga elbehovet för uppgraderingen av mängden biometan) utan även påverkar den mängd rågas som finns tillgänglig som bränsle till biogasmotorn.

8.6 Ekonomi

Den ekonomiska analysen visade att samtliga komponenter innebär höga investeringskostnader, vissa högre än andra, men samtliga motsvarade miljonbelopp. De dyraste komponenterna visade sig vara bränslecellen och vätgaslagret. Att produktion, lagring och omvandling av vätgas innebär stora kostnader var inte oväntat. Däremot, med tanke på den utveckling som vätgas haft och genomgår i nuläget är det möjligt att kostnaderna minskar under de kommande åren och att år 2030 kan det vara ett annat utgångsläge.

De flesta drift- och underhållskostnader motsvarar belopp mellan 10 000 kr och några 100 000 kr. Det största undantaget gäller vätgaslagret och kompressorn där drift- och underhållskostnaden hamnar på drygt 8 miljoner kr. Anledningen är att denna kostnad beror på investeringskostnaden, motsvarande 1 % av investeringskostnaden, och eftersom investeringskostnaden för vätgaslagret inklusive kompressorn är den högsta av samtliga komponenter, blir också drift- och underhållskostnaden stor. En faktor som har avgjort kostnaden för komponenterna relaterade till vätgasen är att PEM elektrolysören och PEM bränslecellen har räknats som två olika komponenter. Det, är som tidigare nämnts, möjligt att använda den ena för båda syften, det vill säga att producera vätgas från el alternativt att producera el från vätgas i PEM. Däremot, med tanke på de olika kapaciteter för dessa komponenter som framkom i resultatet gjordes valet att presentera den ekonomiska analysen för dessa separat.

8.7 Rekommendation för ökad resiliens

I ö-driftsfallet är en biogasmotor tillsammans med intermittent elproduktion och batteri samt ett LBG-lager fördelaktigt. Produktionen av rågas sker vid anläggningen och det finns därmed

tillgängligt för försörjning av biogasmotorn, samtidigt som ett LBG-lager kan nyttjas när elbehovet och/eller fordonsgasbehovet inte kan tillgodoses. Kapaciteten hos biogasmotorn som krävs i ö-drift är väsentligt högre än vad som skulle krävas i bristsituation. Trots att biogasmotorn kan nyttjas under höglasttimmar eller vid leveransosäkerhet, krävs en stor investering för att samma biogasmotor ska vara tillräcklig i ö-drift. I detta fall behöver biogasmotorn ses i ett större perspektiv och hänsyn bör tas till samhällets behov och energiberedskap om en biogasmotor ska kunna nyttjas vid ö-drift.

Lagring och användning av vätgas för ökad resiliens är mer rimligt för att klara en viss del av behovet, snarare än i ö-drift. Vid ett lägre behov, vid bristsituation, klarar bränslecellen att tillgodose elbehovet ett större antal timmar samtidigt som den efterfrågade kapaciteten hos bränslecellen är lägre och innebär på så vis en lägre investeringskostnad. Detta kan vara fördelaktigt med tanke på att just vätgassystemet (elektrolysör, lager och bränslecell) var det mest kostsamma jämfört med övriga energisystem som undersökts. Biprodukterna syrgas och värme kan säljas.

Det finns även fördelar med att använda en biogasmotor vid bristsituation. Eftersom nyttjandet av en biogasmotor innebär överproduktion av el i fall då anläggningens elbehov är lägre än driftläget hos biogasmotorn (som minst 50 %), kan samhällsviktiga verksamheter, såsom sjukhus, alternativt laddning av elfordon till viss del tillgodoses. Som tidigare nämnts kan även producerad värme nyttjas inom olika verksamheter.

Samtliga system och komponenter som diskuterats i denna studie är förnybara och innebär en lägre samhälls- och miljöpåverkan än vissa fossila alternativ. Dessutom kan LNG-reserver, som räknas som fossila, fasas ut när LBG istället produceras. Produktionen av LBG ökar också den lokala försörjningstryggheten. Samtidigt innebär vissa av komponenterna som studerats, främst solceller och batteri, utvinning av vissa miljöpåverkande och etiskt problematiska metaller, såsom kobolt, vilket bör övervägas vid investering.

8.8 Val av metod

Metodiken för denna studie har ansetts vara väl tillämpbar i detta fall. Upplägget med litteraturstudie, dataframtagning, modellering, simulering och beräkningar anses ha varit väl anpassat för att uppnå studiens syfte, mål och besvara frågeställningarna. Däremot, på grund av studiens omfattning har modellerna begränsats till att vara tillräckligt ingående för att ge rimliga resultat. Fler avgränsningar, exempelvis att studien endast skulle beröra ett av de två huvudsakliga systemen som har modellerats, hade kunnat innebära att modellerna bättre reflekterat verkliga förhållanden.

I följande avsnitt *Felkällor* diskuteras brister i arbetet.

8.9 Felkällor

En av de större källorna till felaktigheter i denna studie är relaterat till avgränsningen gällande att simulera varje drift (normal drift, ö-drift och bristsituation) under ett år. I verkligheten är det svårt att veta när en brist- eller krissituation skulle inträffa och det finns fler avgörande faktorer för samhället än de som tagits upp i denna rapport gällande dimensionering etcetera. Däremot är denna avgränsning ändå rimlig för denna rapport och ger snarare möjligheter till vidare studier än riktiga fel. Därtill, eftersom den data som använts endast gäller ett år har ingen hänsyn tagits till variationer från år till år. Resultaten har påverkats av detta. Samtidigt anses den data som använts inte ha varit avvikande och den har för det mesta

tagits från samma år (2020) för att spegla verkliga förutsättningar. Exempelvis med tanke på den korrelation som finns mellan sol- och vinddata.

Massförluster i vätgaslager och komprimering av vätgas bestämdes utifrån verkningsgraden för komprimering till 70 MPa. Det är rent teoretiskt möjligt att eliminera massförluster i lagret. Däremot ansågs att någon form av förlust borde vara möjlig och därmed antogs, med brist på annan information, att förlusten skulle motsvara förluster vid vätgaskomprimering till 70 MPa.

En ytterligare felkälla, om än kan ses som liten, är att ingen hänsyn togs till skillnad i elbehov för tankning av fordonsgas vid tankstationerna TK3 och TK4 (där ”vanlig tankning” av oftast mindre fordon sker). Därmed är det elbehov som baseras på fordonsgasbehovet inte anpassat efter att en mindre eller större del av fordonsgasen går till att försörja bussar och sopbilar snarare än de mindre fordonen. Därtill simulerades tankningen av bussar och sopbilar att ske varje timme och medförde ett ytterligare elbehov varje timme, snarare än att det var uppdelat på specifika timmar. Detta gav ett något större totalt elbehov än i verkligheten.

Som tidigare nämnts finns det en brist i hur resultatet presenterats gällande antalet timmar med otillräcklig rågas samt icke uppfyllt elbehov i ö-driftsfallet med biogasmotorn. Resultatet kan anses vara ofullständigt när rågasmängden är tillräckligt stor för att förse fordonsgasbehovet men inget mer då detta egentligen innebär att elbehovet inte kan förses och därmed är det inte helt säkert att fordonsgasproduktionen kan förses. Därmed kan det tillkomma fler timmar då fordonsgasbehovet inte förses än vad som visats i tabellerna. Att däremot utgå från ett konstant elbehov, som hade baserats på att en viss mängd energimängd hade behövts för att producera en viss mängd fordonsgas, för varje timme beroende ansågs ge en allt för förenklad bild av det egentliga elbehovet. Elbehovet utgår därför från fordonsgasbehovet från början och försörjning av fordonsgasbehovet prioriteras.

Gällande LBG-lagret har ett antagande om mängden boil-off bestämts vara 0,2 % av kapaciteten per dygn. Detta var en viss förenkling av verkligheten eftersom boil-off beror av lagerstorleken. Däremot anses inte detta ha inneburit alltför stor påverkan på resultatet.

Lagret, eller gasklockan på 400 m³, antogs i simuleringarna med biogasmotorn i ö-drift ha ett tryck på 1 bar och därmed motsvara 400 Nm³ då mängden rågas/rågasdata som lagras i eller töms ur lagret mäts i Nm³. Det verkliga trycket i gasklockan kan därför innebära att lagret egentligen har en annan kapacitet vilket i sin tur påverkar nyttjandet av en biogasmotor och försörjning av fordonsgasbehovet.

9 Slutsats

I denna rapport har ett antal olika komponenter och energisystem tagits upp och diskuterats för att öka resiliens och robusthet hos biogasanläggningen vid Kungsängens gård. De faktorer som ansetts vara väsentliga för att uppnå detta mål är energilagring och lokal elproduktion genom intermittenta källor tillsammans med en bränslecell alternativt en biogasmotor. Det finns fördelar och nackdelar med samtliga system. Med lagring av LBG respektive vätgas skapas möjligheten för energilagring och därmed nyttjande under situationer då produktionen och försörjningen av samhällets behov inte fungerar normalt. Samtidigt utgör elnätet en stor del av elenergiförsörjningen av anläggningen, uppgradering av fordonsgas och tankning av fordon, vilket innebär att elförsörjningen behöver säkras på annat vis vid problematik rörande effektbrist och leveranssäkerhet. Intermittent elproduktion, nämligen solceller och vindkraft, har undersökts. Eftersom dessa är variabla och intermittenta kan ett batteri utnyttjas för

att skapa en något mer jämn elförsörjning. Däremot är det inte optimalt med långtidslagring när det kommer till batterier och det krävs därmed alternativ för att uppnå en ännu jämnare elförsörjning. De två alternativ som har undersökts för detta är en biogasmotor och bränslecell.

Lagringen av energi i formerna LBG och vätgas beror av sätten de produceras. När det kommer till lagring av LBG kan gas som annars facklas bort, till följd av driftfel, användas för att producera LBG. Alternativet är att producera LBG från biometanproduktionen vid biogasanläggningen. Att kombinera dessa ger större möjligheter när det kommer till att försörja fordonsgasbehovet och LBG-behovet vid ö-drift. Beroende på om LBG säljs av under normal drift, kan det högsta fordonsgasbehovet som undersökts (för 19 sopbilar och 120 bussar) försörjas som mest under ca 3000 timmar och som lägst under ca 500 timmar.

Vätagasproduktionen kan ske genom elektrolys där elkällan kan varieras. De alternativ som undersöktes i detta arbete var elektrolys genom solel respektive el från elnätet. Att kombinera dessa ger också större möjligheter när det kommer till att försörja elbehovet vid ö-drift genom en bränslecell tillsammans med de intermittenta energikällorna. Då elbehovet beror av det högsta fordonsgasbehovet (för 19 sopbilar och 120 bussar) uppfylldes behovet som mest i ca 240 timmar och som lägst i ca 140 timmar (då både solel och elnätet utnyttjats för elektrolys).

När det kom till försörjning av elbehovet vid utnyttjande av en biogasmotor tillsammans med intermittenta energikällor berodde antalet timmar som behovet uppfylls på tillgången till rågas. I ö-drift har utnyttjande av rågas som annars skulle facklas bort i en biogasmotor undersökts. Eftersom det huvudsakliga målet med rågasproduktionen är att uppfylla fordonsgasbehovet prioriteras detta före eventuell överproduktion av el. I vissa fall förekommer det ett antal timmar där fordonsgasbehovet och därmed också elbehovet inte kan förses. I andra fall finns det tillräckligt med rågas för att förse fordonsgasbehovet, men inte tillräckligt för att förse elbehovet och därmed kan rågasproduktionen inte ske normalt under dessa timmar. Däremot kan den större delen av elbehovet, och fordonsgasbehovet, förses under året och det är endast vid vissa tillfällen då rågasproduktionen inte är tillräcklig. Ett större rågaslager hade kunnat vara fördelaktigt för dessa situationer.

Samma system som beskrivits ovan har undersökts vid bristsituation, det vill säga vid strömbrott eller vid effekt- och kapacitetsbrist. Det visade sig att nyttjande av en bränslecell och intermittenta energikällor kan uppfylla 5-9,7 % av det totala elbehovet under årets alla timmar. Vid högre behov varierade resultatet, men som lägst uppfylldes behovet 940 timmar om endast vätgas från solel nyttjas. Utnyttjande av biogasmotorn i bristsituation innebär i praktiken att inte lika stor fordonsgasproduktion kan uppnås. Elbehovet kan däremot uppfyllas under samtliga timmar.

Tills sist utfördes en mindre ekonomisk analys där investerings- samt underhålls- och driftkostnader undersöktes. Energisystemet med vätagasproduktion, lagring och elproduktion innebär de högsta kostnaderna vilket var väntat med tanke på att dessa i dagsläget inte är särskilt beprövade i de fall kopplade till energiberedskap som undersökts i detta arbete. Däremot, med tanke på det intresse som finns för vägas och med tanke på den utveckling som skett och sker, kan kostnaderna tänkas minska.

Slutligen, det energisystem som anses vara bäst anpassat för ö-drift är systemet med en biogasmotor tillsammans med ett LBG-lager. Båda nyttjar produktionen av rågas på plats och LBG-lagret kan nyttjas för att försörja foronsgasbehovet när produktionen av rågas respektive elproduktionen från biogasmotorn är otillräcklig. Detta energisysyem kan givetvis användas i en bristsituaton, däremot är kapaciteten väsentligt högre i ö-driftfallet. En biogasmotors

drift är avgörande i ö-drift och skapar också möjlighet till nyttjande av överproducerad el på annat håll. Vid bristsituation kan det vara fördelaktigt att istället använda en bränslecell med relativt låg kapacitet tillsammans med ett mindre vätgaslager. Detta alternativ är mer rimligt än att anpassa detta system i ö-drift. Resultaten visade att bränslecellen klarade att uppfylla elbehovet vid väsentligt fler timmar i bristsituation än i ö-drift. Den efterfrågade kapaciteten hos bränslecellen är samtidigt lägre och innebär på så vis lägre kostnader.

9.1 Vidare studier

I denna studie har avgränsningar gjorts samt vissa delar begränsats vilket gör att det finns möjligheter till fortsatta studier. Exempelvis kan den ekonomiska analysen utökas med studier kring exempelvis återbetalning för de valda komponenterna och deras dimensioner. Därtill kan möjligheten att producera metan från vätgas (metanisering) respektive möjligheten att producera vätgas från metan (ångreforming) vid ett biogasanläggning liknande Kungsängens gård undersökas.

Vad gäller driften av exempelvis en biogasmotor och bränsleceller kan undersökningen utökas till att innefatta mer fördelaktig drift av dessa system där mer hänsyn tas till livslängd, överproduktion etcetera. Därtill skulle det vara intressant att utreda hur många höglasttimmar det är lönsamt att driva biogasmotorn med rågas i relation till hur mycket som inte går vidare för att producera biometan. Utöver detta kan möjligheten att nyttja ett batteri i samband med en biogasmotor undersökas. Detta skulle möjliggöra att lagra överproduktion.

Den solkraftanläggning som har studerats i denna studie har baserats på uttalanden och utredning kring vad som skulle vara möjligt att installera på taken vid Kungsängens gårdsanläggning. Därmed kan det utredas hur en större solkraftanläggning, motsvarande exempelvis 2-8 MW (vilket har diskuterats i en förstudie), kan användas och påverka möjlig elproduktion.

10 Litteraturförteckning

Alfredsson, H., Swenson, C. (2017). *Bränslecell jämfört med dieselgenerator*. (Examensarbete) Chalmers tekniska högskola. Sjöingenjörsprogrammet. <https://odr.chalmers.se/bits/tream/20.500.12380/250182/1/250182.pdf>

Ammermann, H., Hoff, P., Atanasiu, M., Aylor, J., Kaufmann, M. & Tisler, O. (2015). *Advancing Europe's energy systems: Stationary fuel cells in distributed generation*. Luxemburg: Publications Office of the European Union. https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCHJU_FuelCellDistributedGenerationCommercialization_0.pdf?fbclid=IwAR1kZnwCqx6cq9lLADrJF6-GavuzJtZOd2mJh0-0UGr80Yv89GbTY9SY0Uk

Andersson, A. (2018). *Battery energy storage systems in Sweden - A national market analysis and a case study of Behrn sport arena*. Uppsala universitet. Teknisk- naturvetenskaplig fakultet. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1228384/FULLTEXT01.pdf>

ASUE (2014). BHKW-Kenndaten 2014/2015. Berlin: ASUE.

Avfall Sverige (2013). *Integrering av vätgas och syntesgas med befintliga biogasanläggningar*. (U2013:13). Avfall Sverige. <https://www.avfallsverige.se/aktuellt/nyhetsarkiv/artikel/integrering-av-vatgas-och-syntesgas-med-befintliga-biogasanlaggningar-mojligheter-till-okad-biogas/>

Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T. & Tamm, D. (2013). *Biogas upgrading – Review of commercial technologies*. (SGC Rapport 2013:270). Malmö: Svenskt Gastekniskt Center AB. <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC270.pdf>

Bhattacharyya, R., Misra, A. & Sandeep, K. C. (2017). *Photovoltaic solar energy conversion for hydrogen production by alkaline water electrolysis: Conceptual design and analysis*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416310664>

Bhuyan, S. K., Hota, P. K. & Panda, B. (2018). *Modeling, Control and Power Management Strategy of a Grid Connected Hybrid Energy System*. (ISSN: 2088-8708). Institute of Advanced Engineering and Science. https://www.researchgate.net/publication/326630411_Modeling_Control_and_Power_Management_Strategy_of_a_Grid_connected_Hybrid_Energy_System

Biogas Öst (u.å.). *Uppsala*. <http://www.biogasost.se/Biogas-i-siffror/Gasfordon/Uppsala> [2022-06-08]

Carredano Robertsson, A. & Nordin, E. (2021). *Elektrolysör på Kungsängens gård i Uppsala - Förnybar vätgasproduktion för ökad framställning av metan*. Uppsala universitet. Teknisk-naturvetenskaplig fakultet. <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1573466/FULLTEXT01.pdf>

Christensen, A. (2020). *Assessment of Hydrogen Production Costs from Electrolysis: United States and Europe*. International Council on Clean Transportation. https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/final_icct2020_assessment_of-_hydrogen_production_costs-v2.pdf

Denward, C., Johansson, B., Jonsson, D. K. & Larsson, P. (2019). *Sektorsansvar och energiberedskap - Förslag till arbetsmodell för att utforma ett sektorsansvar med förmågor i fokus*. FOI-R-4819-SE. Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI). Sektorsansvar och energiberedskap - FOI. <https://www.google.com/url?q=https://www.foi.se/rest-api/report/FOI-R>

--4819--SE&sa=D&source=docs&ust=1654694649817041&usg=A0vVaw3G03ZxCm3gwiYbi
ajYnb2Y

Elberry, A. M., Thakur, J., Santasalo-Aarnio, A. & Larmi, M. (2021). *Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems*. International Journal of Hydrogen Energy. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921005838>

Energiforsk (2021). *El från nya anläggningar*. (RAPPORT 2021:714). Energiforsk. <https://energiforsk.se/media/30970/el-fra-n-nya-anla-ggningar-energiforskrapport-2021-714.pdf>

Energigas Sverige (2017). *Säkra transporter av flytande metan*. <https://www.energigas.se/fakta-om-gas/naturgas/sakra-transporter-av-flytande-metan/> [2022-05-26]

Energimyndigheten (2017). *Nya metoder för att uppgradera och lagra biogas*. <https://www.energimyndigheten.se/arkiv-for-resultat/Resultat/nya-metoder-for-att-uppgradera-och-lagra-biogas/> [2022-05-13]

Energimyndigheten (2019). *Olika typer av solceller*. <https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/lar-dig-mer-om-solceller/olika-typer-av-solceller/> [2022-03-20]

Energimyndigheten (2020). *Vindförhållanden*. <https://www.energimyndigheten.se/fornybart/vindkraft/vindlov/planering-och-tillstand/svenskt-vatten/inledande-skede/vindforhallanden/> [2020-06-07]

Energimyndigheten (2021). *Större tankar - Det samhällsekonomiskt lönsamma i att subventionera vätgastankstationers infrastruktur*. (2020-014247). Eskilstuna: Energimyndigheten. https://www.ri.se/sites/default/files/2021-12/Rapport%20Större%20Tankar_RISE_NilssonEnergy.pdf

Energimyndigheten (2022a). *Grundprinciper för en trygg energiförsörjning*. <https://www.energimyndigheten.se/trygg-energiforsorjning/om-trygg-energiforsorjning/> [2022-03-30]

Energimyndigheten (2022b). *Vindkraft i elsystemet*. <https://www.energimyndigheten.se/fornybart/vindkraft/kunskap-och-forskning/planera-for-vindkraft/vindkraft-i-elsystemet/> [2022-06-07]

Energisamverkan Blekinge (2021). *Batterilagring i byggnader - en vägledning*. Energikontor Sydost. https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/static.wm3.se/sites/400/media/563797_2021-03-09_Batterilagring_i_byggnader_-_en_vägledning.pdf?1617008258

Försvarsdepartementet (2017). *Motståndskraft - Inriktningen av totalförsvaret och utformningen av det civila försvaret 2021–2025*. (Ds 2017:66). Stockholm: Regeringskansliet. <https://www.regeringen.se/4b02db/globalassets/regeringen/dokument/forsvarsdepartementet/forsvarsberedningen/ds-2017-66-motstandskraft-inriktningen-av-totalforsvaret-och-utformningen-av-det-civila-forsvaret-2021-20252.pdf>

Guilbert, D., Collura, S. M. & Scipioni, A. (2017). *DC/DC converter topologies for electrolyzers: State-of-the-art and remaining key issues*. International Journal of Hydrogen Energy. https://www.researchgate.net/publication/319197494_DCDC_converter_topologies_for_electrolyzers_State-of-the-art_and_remaining_key_issues

- Görtz, S. (2015). *Battery energy storage for intermittent renewable electricity production - A review and demonstration of energy storage applications permitting higher penetration of renewables*. Umeå universitet. Civilingenjör i Energiteknik. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:818683/FULLTEXT01.pdf>
- Hirscher, M. (2010). *Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Storage*. Weinheim: The Deutsche Nationalbibliothek. https://books.google.se/books?hl=sv&lr=&id=4ga2wu26XMwC&oi=fnd&pg=PA1&dq=energy+density+of+hydrogen+at+700+bar&ots=qE04RvWCJT&sig=QWT63ci8zWb89QP8oLOTGsEPCVE&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Isaksson, B. (2018). *Utveckling av innovativa koncept för konkurrenskraftig produktion av flytande biogas - Slutrapport*. Biogas Öst. http://biogasost.se/Portals/0/Publikationer/Rapporter/180502_Slutrapport_LBG.pdf
- Janke, L., McDonagh, S., Weinrich, S., Nilsson, D., Hansson, P. A. & Nordberg, Å. (2020). Techno-Economic Assessment of Demand-Driven Small-Scale Green Hydrogen Production for Low Carbon Agriculture in Sweden. *Frontiers in Energy Research*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2020.595224/full>
- Jansson, S. (2019). *Evaluation of KPIs and Battery Usage of Li-ion BESS for FCR Application*. Uppsala universitet. Teknisk-naturvetenskaplig fakultet. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1356610/FULLTEXT01.pdf>
- Jarmander, S. & Sjöberg, I. (2015). *Ny utformning för gårdsbaserad biogasproduktion - En utvärdering ur material- och energisynpunkt*. Kungliga tekniska högskolan. Energi och miljö. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:859197/FULLTEXT01.pdf>
- Jiang, J., Zheng, J., Shi, W. & Zuo, P. (2013). *Optimized Operating Range for Large-Format LiFePO₄/Graphite Batteries*. Journal of the Electrochemical Society. https://www.researchgate.net/publication/261135878_Optimized_Operating_Range_for_Large-Format_LiFePO4Graphite_Batteries
- Johansson, A. & Nordell, E. (2017). *Förstudierapport – Förutsättningar för LBG-produktion i Linköping/Tekniska verken i Linköping*. Tekniska verken. <https://sammantraden.linköping.se/welcome-sv/namnder-styrelser/kommunstyrelsen/kommunstyrelsen-170919/agenda/forstudierapport170626pdf-1?downloadMode=open>
- Jonersholm, K., Forsberg, J., Millers-Dalsjö, D. & Ganga Parada, C. (2010). *Utbud och efterfrågan på fordonsgas i Biogas öst regionen*. Stockholm: Sweco Environment AB. <https://insynsverige.se/documentHandler.ashx?did=95156>
- Knosala, K., Kotzur, L., Röben, F., Stenzel, P., Blum, L., Robinius, M., Stolten, D. (2021). *Hybrid Hydrogen Storage for Decentralized Energy Autonomy*. International Journal of Hydrogen Energy. Volym 46, issue 42. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921013409?via%3Dihub>
- Lantz, M. (2012). *The economic performance of combined heat and power from biogas produced from manure in Sweden - A comparison in different CHP technologies*. Applied Energy. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912003017?via%3Dihub>
- Levin, O. (2019). *Avkokskomprimering till CBG-lager som avkokshantering på LBG-tankstationer*. Sveriges lantbruksuniversitet. Institutionen för energi och teknik. https://stud.epsilon.slu.se/14407/1/levin_o_190423.pdf

MathWorks (u.å.). *Evaluating the Power Delivered by a Wind Turbine*. <https://se.mathworks.com/help/symbolic/evaluating-the-average-power-delivered-by-a-wind-turbine.html> [2022-06-07]

Miljödepartementet (2021). *Klimatklivet utvidgas till att stödja biogasanläggningar för elproduktion*. Stockholm: Regeringskansliet. <https://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2021/12/klimatklivet-utvidgas-till-att-stodja-biogasanlaggningar-for-elproduktion/>

Nordberg, U. (2006). *Biogas - Nuläge och framtida potential*. (Tvärteknik 993) Stockholm: Värmeforsk Service AB. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20869340>

Nordling, A., Englund, R., Hembjer, A. & Mannberg, A. (2015). *Energilagring - Teknik för lagring av el*. (IVA-R 482). Stockholm: Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien. <https://www.iva.se/globalassets/rapporter/vagval-el/201508-iva-vagvalel-ellagring-rapport-j-ny.pdf>

NREL (u.å.). *Commercial Battery Storage*. https://atb.nrel.gov/electricity/2021/commercial_battery_storage?fbclid=IwAR0jrL86GapM9UfGoqzGXZjF25v4NBEi3WHBUhQe_SNhFz1bbRAZwJXKSku [2022-05-18]

Nugyen, H. & Shabani, B. (2020). *Proton exchange membrane fuel cells heat recovery opportunities for combined heating/cooling and power applications*. *Energy Conversion and Management*. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0196890419313354?token=B2DD7682BA83A21215710B97C57CA2A6419CC331B042F6193D556815BDA1AC159765A55EA8CB6C4744348A98F9473C37&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220621194542> [2022-06-21]

Ossila (u.å.). *Solar Cells: A Guide to Theory and Measurement*. <https://www.ossila.com/pages/solar-cells-theory> [2022-05-16]

Rajan, K. K. & Aruna, B. (2021). *Performance evaluation of a 200 kWp grid tied solar power plant*. Muvattupuzha: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1045/1/012014/pdf>

Safoutin, M., Cherry, J., McDonald, J. F. & Lee, S. (2015). *Effect of Current and SOC on Round-Trip Energy Efficiency of a Lithium-Iron Phosphate (LiFePO₄) Battery Pack*. SAE International. https://www.researchgate.net/publication/282984341_Effect_of_Current_and_SOC_on_Round-Trip_Energy_Efficiency_of_a_Lithium-Iron_Phosphate_LiFePO4_Battery_Pack

Svenskt Gastekniskt Center (2006). *LCNG-studie – möjligheter med LNG i fordonsgasförsörjningen i Sverige*. (Rapport SGC 167). SGC. <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC167.pdf>

Sheffield, J. W., Martin, K. B. & Folkson, R. (2014). *Electricity and hydrogen as energy vectors for transportation vehicles*. Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/B9780857095220500054?token=16874A14A47E168785C7D29E2E00955219C0961782438694387AB6FF54A91082CE993F7A1EC350292D3037E692959139&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220217135336>

Sidén, G. (2015). *Förnybar energi*. Upplaga 2:1, Lund: Studentlitteratur AB.

Sundén, B. (2019). Thermal management of batteries. *Hydrogen, Batteries and Fuel cells*.

93-110. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128169506000063?via%3Dihub>

Sveriges Riksdag 2019 Civilt försvar och krisberedskap (2018/19: FöU7). <https://data.riksdagen.se/fil/6FE26731-8952-4419-A192-91528D6D3994>

Tamm, D. (2018). *Utveckling av innovativa koncept för konkurrenskraftig produktion av flytande biogas Delrapport 5: Systemstudie för storskalig LBG-produktion*. RISE Research Institutes of Sweden. http://biogasost.se/Portals/0/Publikationer/Rapporter/180502_Delrapport%205%20Systemstudie.pdf

Tamm, D. & Andersson, J. (2019). *Nytt innovativt koncept för småskalig produktion och distribution av flytande biogas*. (Rapport 2019:53). RISE Research Institute of Sweden. http://www.ri.se/sites/default/files/2019-09/Smaskalig%20produktion%20och%20distribution%20av%20LBG_rapport.pdf

Tang, O., Rehme, J. & Cerin, P. (2021). *Levelized cost of hydrogen for refueling stations with solar PV and wind in Sweden: On-grid or off-grid?* Linköping: Department of Management and Engineering. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1629500/FULLTEXT01.pdf>

The Royal Academy of Engineering (u.å.). *Wind turbine Power Calculations*. <https://www.raeng.org.uk/publications/other/23-wind-turbine>

Uppsala kommun (2011). *Vindbruksplan – tematiskt tillägg till Uppsalas översiktsplan*. (KSN-2011-0356). Uppsala: Uppsala kommun. <https://www.uppsala.se/contentassets/061e910d62ac46dfb5c688a43a060026/ks-arende-9-vindbruksplan-tematiskt-tillagg-till-uppsalas-oversiktsplan.pdf>

Uppsala kommun (2015). *Energisystemet i Uppsala kommun - nuläge till år 2050*. (KSN-2014-132). Uppsala: Uppsala kommun. <https://www.uppsala.se/contentassets/ec97857204cf41f0bcb7a0b8f3869bf1/op2016-underlagsrapport-energisystem-2050-i-uppsala-kommun.pdf>

Uppsala kommun (2018). *Energiprogram 2050 för ett energisystem som möter effekt- och materialutmaningarna för ett klimatpositivt Uppsala*. (KSN-2017-1868). Uppsala: Uppsala kommun. <https://www.uppsala.se/contentassets/8c70693a41a74dd1a7ca4662f63fcd82/energiprogram-kf-2018-03-15.pdf>

Uppsala Vatten och Avfall AB (2021). *Miljörapport 2020 Biogasanläggningen vid Kungsängens gård*. Uppsala Vatten och Avfall AB. <https://www.uppsalavatten.se/globalassets/dokument/om-oss/vara-anlaggningar/biogas/miljorapport-biogasanl-2020.pdf>

Västra Götalandsregionen (2017). *Energi och teknik*. <https://www.vgregion.se/regional-utveckling/verksamhetsomraden/miljo/power-vast/fakta-om-vindkraft/energi-teknik/?vgrform=1#Nar> [2022-06-01]

Wiberg, E., Knudsen, J., Liljegren Cleps, C., Pettersson, O., Karlsson, P., Pettersson, B. Vätgas och energilagring. (2020). *Vätgas och energilagring*. Gotland: LRF Gotland. https://energicentrum.gotland.se/wp-content/uploads/Rapport-forstudie-Vatgas-och-energilagring_.pdf

Werner, S. (2016). *Energiförsörjning*. Upplaga 1:1, Lund: Studentlitteratur AB.

Yang, Y., Campana, P. E., Stridh, B. & Yan, J. (2020). *Potential analysis of roof-mounted solar photovoltaics in Sweden*. Applied Energy. <https://reader.elsevier.com/reader/s>

d/pii/S0306261920312708?token=3BB2E914658B95AF8472CED0EEAC0B333DBACCE9F75CE9E3D4E787214A87577BD49431834681733B4FED524770D0FE3C&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220513093952

10.1 Personlig kommunikation

Ek, F. BioDriv Öst. Personlig kommunikation. 2022-05-25.

Flygare, C. Uppsala universitet. Personlig kommunikation. 2022-03-21.

Janke, L. Sveriges lantbruksuniversitet. Personlig kommunikation. 2022-03-03 - 2022-05-12.

Khymoroda, Y. KTS Engineering. Personlig kommunikation. 2022-05-04.

Levin, O. Uppsala Vatten och Avfall AB. Personlig kommunikation. 2022-01-17 - 2022-05-25.

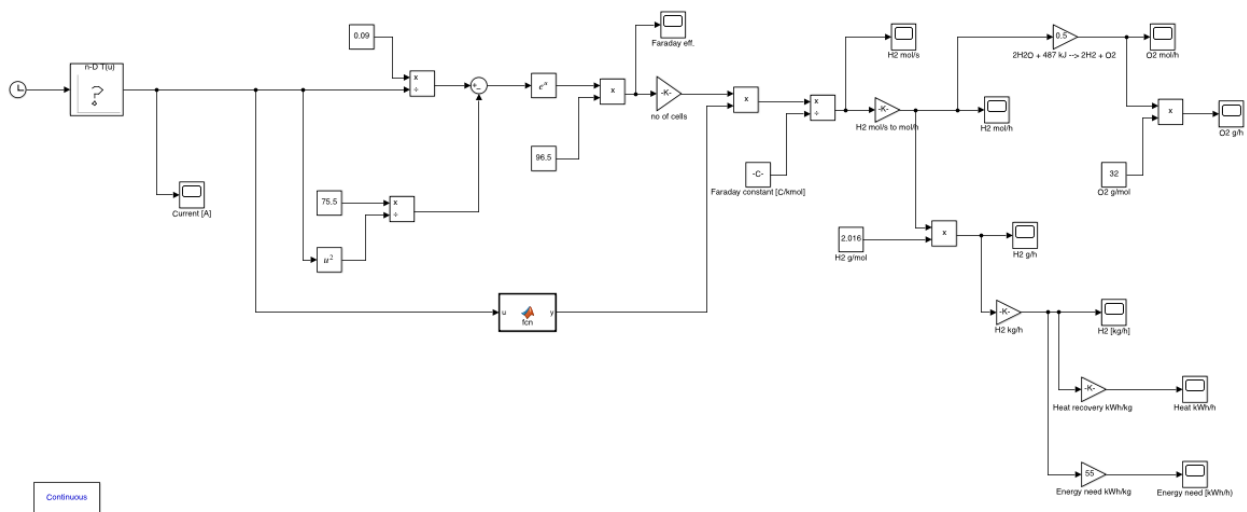
Lindqvist, S. Ohlssons AB. Personlig kommunikation. 2022-04-26.

Nordell, E. Tekniska verken. Personlig kommunikation. 2022-04-06.

11 Appendix

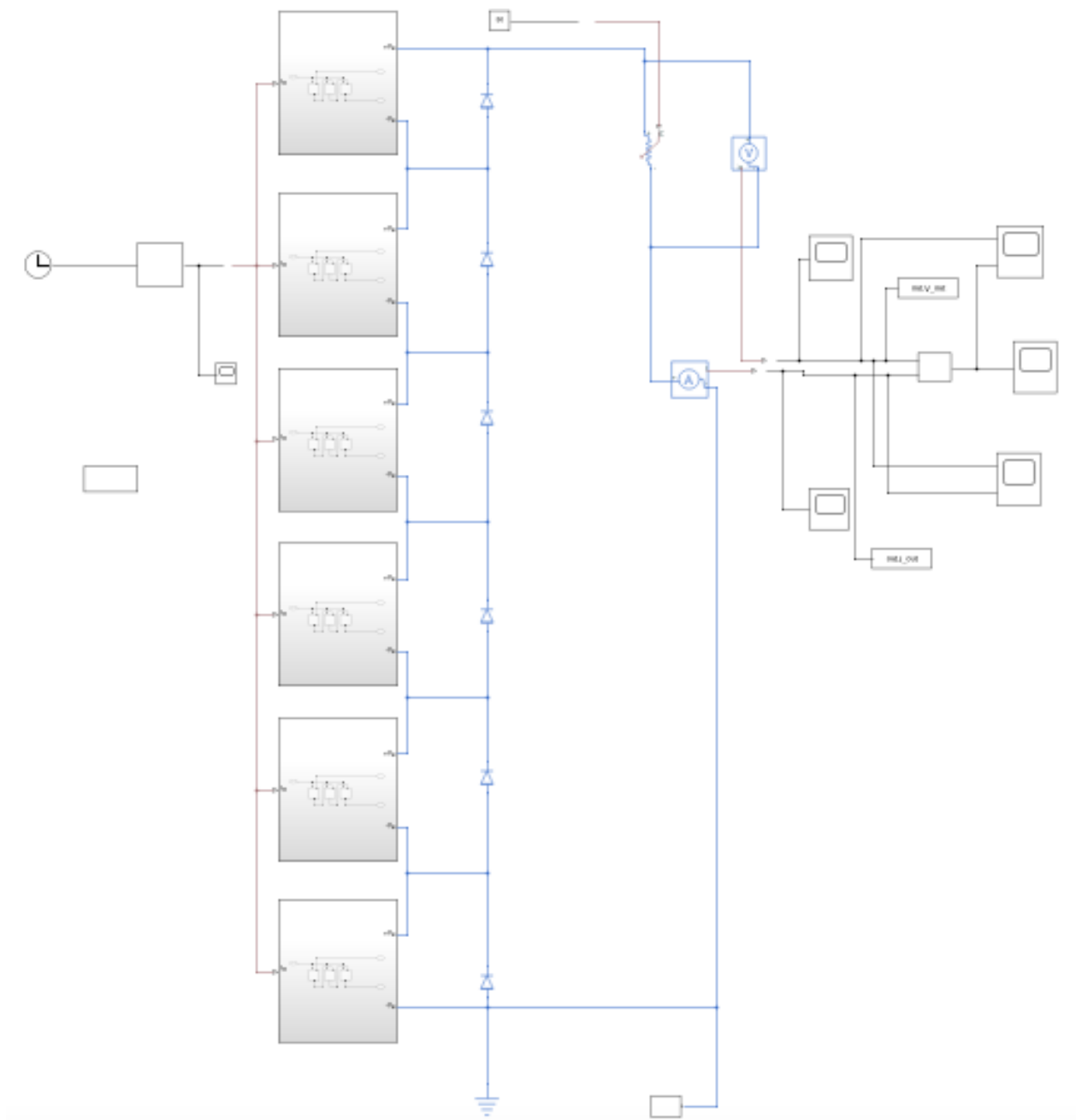
11.1 A

11.1.1 A.1



Figur 10: I figuren syns Simulink-modellen av elektrolysören

11.1.2 A.2



Figur 11: I figuren syns Simulink-modellen för solkraftanläggningen. Varje "subsystem" (det finns totalt sex stycken) innehåller totalt tre gånger 290 solceller.