



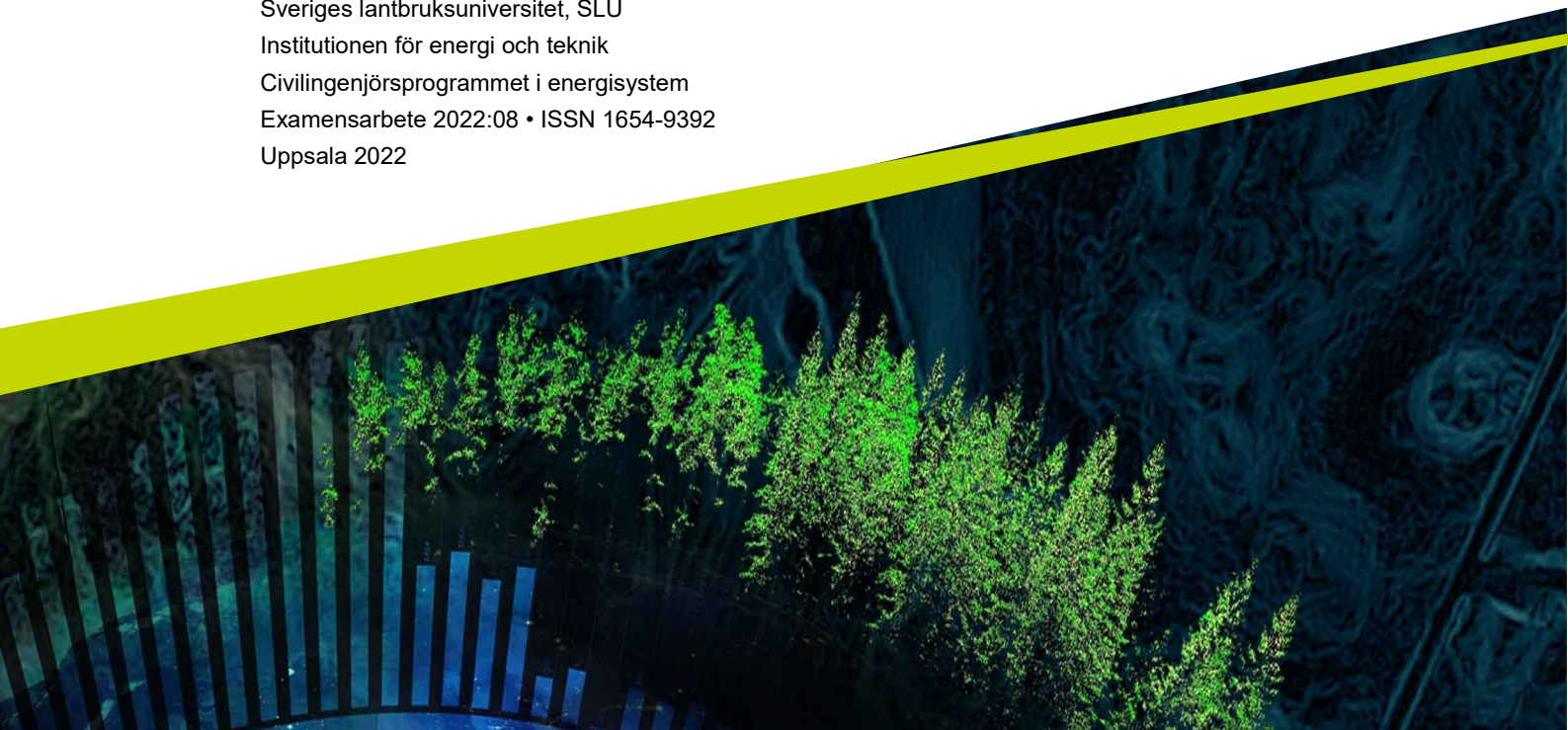
# Vätgasens möjligheter inom lantbruket

## The Potential of Hydrogen in Agriculture

---

Simon Berggren, Elin Kragge, Julia Larsson, Saga Liljeroth, Caroline Löchting Thunberg, Simon Norle, Terése Nyström, Marcus Ullén

Självständigt arbete i energisystem • 15 hp  
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU  
Institutionen för energi och teknik  
Civilingenjörsprogrammet i energisystem  
Examensarbete 2022:08 • ISSN 1654-9392  
Uppsala 2022





# Vätgasens möjligheter inom lantbruket

*The Potential of Hydrogen in Agriculture*

Simon Berggren, Elin Kragge, Julia Larsson, Saga Liljeroth, Caroline Löchting Thunberg, Simon Norle, Terése Nyström, Marcus Ullén

**Handledare:** Gunnar Larsson, Institutionen för energi och teknik, SLU  
**Biträdande handledare:** Håkan Carlborg, Källingby Gård  
**Examinator:** David Ljungberg, Institutionen för energi och teknik, SLU

**Omfattning:** 15 hp  
**Nivå och fördjupning:** Grund nivå, G2E, teknologi  
**Kurstitel:** Självständigt arbete i energisystem  
**Kurskod:** EX0946  
**Program/utbildning:** Civilingenjörsprogrammet i energisystem  
**Kursansvarig inst.:** 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:** 2022:08  
**ISSN:** 1654-9392  
**Elektronisk publicering:** <http://stud.epsilon.slu.se>

**Nyckelord:** energilagring, självförsörjande, vätgastraktor, solceller, vätgasproduktion

**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

The aim of this report is to dimension a system consisting of solar panels, hydrogen production and hydrogen storage in order to make a small farm self-sufficient for all its energy needs in two different scenarios. In scenario 1, the total energy use consists of the electricity consumption on the farm and one hydrogen-electric hybrid tractor in operation. In scenario 2, the energy needs include the farm's electricity consumption and the possibility of operating two hydrogen-electric hybrid tractors or selling the excess hydrogen.

The simulation resulted in that scenario 1 will need 340 solar panels to be installed with a total installed effect of 134.3 kW, and for the second scenario 500 solar panels need to be installed with an installed effect of 197.5 kW. The hydrogen production plant in both scenarios requires a battery of 60 kWh, an 150 kW electrolyzer, a 40 kW fuel cell and a storage of 8250 litres to meet the annual energy demand of the farm.

The total cost for this system is calculated to be 16,48 - 26,06 MSEK depending on the choice of fueling station and the amount of solar panels installed. The greenhouse gas emissions from the farm are expected to decrease with 60 % when one hybrid tractor is used and 92 % when two hybrid tractors are used instead of the tractors powered by HVO100.

## Sammanfattning

Syftet med denna rapport är att dimensionera ett system bestående av solcellspaneler, vätgasproduktion och vätgaslager för att göra ett mindre lantbruk självförsörjande för alla dess energibehov i två olika scenarier. I scenario 1 innefattar energibehovet förbrukningen av elektrisk energi på gården samt att en vätgas-elhybridtraktor är i drift. I scenario 2 innefattar energibehovet gårdens förbrukning av elektrisk energi samt möjligheten att köra ytterligare en vätgas-elhybridtraktor eller sälja överskottet av vätgas.

Simuleringen gav att i scenario 1 behöver 340 solcellspaneler monteras med en installerad effekt på 134,3 kW och för scenario 2 behöver 500 solcellspaneler monteras med en installerad effekt på 197,5 kW. För vätgasproduktionsanläggningen i båda scenarierna krävs ett batteri på 60 kWh, en elektrolysör med effekt på 150 kW, en bränslecell på 40 kW samt ett lager på 8250 liter för att uppfylla gårdens energibehov.

Den totala installationskostnaden uppskattas till 16,48 - 26,06 MSEK beroende på antalet solcellspaneler och val av tankstation. Gårdens växthusgasutsläpp beräknas minska med 60 % när en hybridtraktor används och 92 % i fallet att två hybridtraktorer används istället för dagens HVO100-drivna.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
1.1	Syfte . . . . .	1
1.2	Avgränsningar . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Bakgrundsteori</b>	<b>2</b>
2.1	Solcellspaneler . . . . .	2
2.2	Vätgas . . . . .	3
2.2.1	Elektrolys . . . . .	3
2.2.2	Bränslecell . . . . .	4
2.2.3	Lagring . . . . .	4
2.3	Fordon . . . . .	4
2.3.1	Vätgastraktor . . . . .	4
2.3.2	Vätgaslager i fordon . . . . .	5
2.3.3	Tankning . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Modellering</b>	<b>6</b>
3.1	Energiförbrukning på gården . . . . .	6
3.2	Solcellspaneler . . . . .	6
3.3	Vätgas . . . . .	7
3.3.1	Vätgasanläggning . . . . .	7
3.3.2	Beräkningar och antaganden . . . . .	8
3.4	Traktor . . . . .	8
3.4.1	Beräkningar och antaganden . . . . .	8
3.4.2	Teoretiskt körschema . . . . .	9
3.4.3	Tankning . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Resultat</b>	<b>10</b>
4.1	Utsläpp och vattenanvändning . . . . .	13
4.2	Kostnad . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>Slutsats</b>	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>Referenser</b>	<b>18</b>

# 1 Inledning

Energi är i dagens samhälle den viktigaste och mest använda resursen i en modern civilisation. I dagsläget används energin på ett ohållbart sätt och majoriteten utvinns av fossila bränslen som bidrar till stora mängder växthusgasutsläpp. För att minska dessa utsläpp finns miljömål både för EU men även specifika gällande Sverige. Ett av de svenska miljömålen är att minska utsläppen till netto noll år 2045 (Naturvårdsverket u.å.c). För att uppnå detta mål måste samtliga sektorer inom samhället minska sina utsläpp, inklusive jordbrukssektorn. Enligt Naturvårdsverket (u.å.a; u.å.b) stod jordbruket för 15 % av de totala utsläppen och arbetsmaskinerna inom jordbruk stod för 16 % av de totala utsläppen från arbetsmaskiner i Sverige år 2020. För att minska utsläppen inom jordbruket kan alternativa bränslen såsom vätgas eller elektrisk energi användas för att driva arbetsmaskinerna. En traktor som ska klara en hel arbetsdag driven av enbart batterier blir väldigt tung vilket inte är bra för jorden (Hedin 2021). Med vätgas som bränsle kan utsläppen minska samtidigt som vikten hålls nere. Vätgas kan dessutom användas som energilager och omvandlas till elektrisk energi vid behov.

Vätgas är en gas som är brett använd i dagsläget inom bland annat industrin som energibärare. Problemet med vätgas i nuläget är att den mestadels utvinns från fossila bränslen och därmed bidrar till höga växthusgasutsläpp. Med elektrolys kan vätgas produceras med endast vatten och elektrisk energi. Om den elektriska energin kommer från förnybara källor fås mycket lägre växthusgasutsläpp och möjligheterna för att utöka denna produktionsmetod är god i Sverige. (Kragge 2022)

För att minska utsläppen från jordbruket och dess arbetsmaskiner kan förnybart framställd vätgas användas som ersättning av kolbaserade bränslen. Möjligheten för detta har undersökts i Uppland på Håkan Carlborgs gård, en del av organisationen Uppodlarna. Gården har redan idag ett hållbarhetstänk med solcellspaneler med en installerad effekt på 27,3 kW och gårdens arbetsfordon drivs av biodieslet HVO100. Att använda HVO100 anses hållbart men bidrar till växthusgasutsläpp då det är ett kolbaserat bränsle. Carlborg vill komma bort från kolbaserade bränslen helt och därför kommer den HVO100 drivna hjullastaren att ersättas med en hjullastare driven av elektrisk energi. I denna studie undersöks möjligheten att driva traktorerna på vätgas och elektrisk energi samt möjligheten till ett energilager för att täcka gårdens energibehov. Detta för att uppnå Carlborgs och Uppodlarnas vision om ett kolfritt lantbruk.

## 1.1 Syfte

Syftet med detta projekt är att dimensionera ett system där vätgas produceras och lagras på Carlborgs gård i Uppland. Den elektriska energin som krävs för att producera vätgasen genereras av solcellspaneler installerade på gården. Två scenarier undersöks:

1. Att gården kan vara helt självförsörjande på timbasis för dess elbehov samt att producera tillräckligt med vätgas för att driva en vätgashybridstraktor.
2. Att gården kan vara helt självförsörjande på timbasis för dess elbehov samt att producera tillräckligt med vätgas för att driva två vätgashybridstraktorer, alternativt en vätgashybridstraktor och sälja överskottet av vätgas till andra aktörer.

För respektive scenario kommer minskningen av växthusgasutsläpp samt vattenförbrukning att undersökas. En enklare kostnadskalkyl kommer dessutom att redovisas.

## 1.2 Avgränsningar

Vid vätgasproduktion med elektrolys bildas värme och syrgas som biprodukter. Dessa biprodukter och deras potentiella värde kommer inte att studeras i rapporten då de inte tas tillvara på i detta projekt. Gården har ett separat uppvärmningssystem som inte tas med i denna rapport. Hur resultatet påverkar miljön tas upp men avgränsas till endast de direkta utsläppen vid användning och inte hur produktion av systemets komponenter bidrar till utsläpp. Avgränsningar inom modelleringen redovisas i avsnitt 3.

## 2 Bakgrundsteori

### 2.1 Solcellspaneler

En solcell är uppbyggd med en pn-övergång samt kontakter på vardera sidor som möjliggör produktion av elektrisk energi från solcellen. När solljusets fotoner absorberas av solcellen exciteras elektroner i pn-övergången vilket gör att en spänning på cirka 0,5 V bildas. Genom att seriekoppla flera solceller till en solcellspanel erhålls en större spänning. I en solcell produceras likström, därför används en AC/DC-växleriktare för att erhålla användbar växelström. (Berggren 2022).

För att kunna förutspå solinstrålningen på en viss plats vid ett givet tillfälle krävs en modell med både deterministiska och stokastiska element. Den konstanta utomatmosfäriska solinstrålningseffekten på  $1367 \text{ W/m}^2$  samt solens position relativt jorden anses båda som deterministiska och kan modelleras med hög säkerhet. Atmosfärens påverkan är betydligt mer stokastisk, vilket komplicerar modelleringsprocessen. (Liljeroth & Norle 2022a)

Solinstrålningen försvagas på två olika sätt när den passerar genom atmosfären, dels genom absorption och dels genom Rayleigh-spridning. Rayleigh-spridning sker på grund av partiklar i atmosfären som damm, vatten och luftmolekyler. Dessa interagerar med solinstrålningen och beroende på solinstrålningens våglängd varierar storleken på Rayleigh-spridningen. Rayleigh-spridningen gör att solinstrålningen mestadels inte kommer från solens riktning. Absorption sker på grund av ozon vid UV-våglängder och på grund av vatten och koldioxid vid IR-våglängder. Solinstrålningen omvandlas till värme när detta sker och emitteras från partiklarna. (Liljeroth & Norle 2022a)

För de flesta modeller delas den totala solinstrålningen på en yta upp i följande komponenter: direkt och diffus solinstrålning. Den direkta solinstrålningen är den strålning som varken absorberas eller reflekteras i atmosfären och har därmed högst effekt av de två komponenterna. Diffus solinstrålning är den spridda strålning orsakad av många reflektioner med partiklar i atmosfären, och har därmed ett lägre energiinnehåll än direkt solinstrålning. Den diffusa solinstrålningen är svår att precist modellera, då den påverkas av mängden moln, molnens densitet, molnens position på himlen, något som varierar konstant. Därför delas ofta den diffusa strålningen upp i flera komponenter - isotropisk, cirkumsolar och horisont - för att ge en bättre uppskattning. Den isotropiska brukar antagandet att all diffus strålning är jämnt fördelad över himlen, den cirkumsolara beskriver den ökade intensiteten av den mängd diffus solinstrålning som kommer från solens närhet vid molnighet, och horisontstrålningen beskriver den ökade strålningsintensiteten från horisonten vid molnfria dagar. Denna typ av uppdelning av diffus solinstrålning benämns som den anisotropa - där den diffusa solinstrålningen inte anses vara jämt fördelad över himlavalvet. Detta antagande används i projektets valda modell. (Liljeroth & Norle 2022a)



Solinstrålningens infallsvinkel varierar med tiden och kan beskrivas med ett flertal vinklar beroende på geografisk plats, tid på året och solcellens orientering. De mest relevanta vinklarna är azimutvinkeln  $\gamma$  och sluttningsvinkeln  $\beta$ . Azimutvinkeln talar om panelens riktning i öst-västled, med  $0^\circ$  rakt söderut och västerut  $90^\circ$  positivt, och sluttningsvinkeln talar om panelens vinkel relativt marken, som är  $0^\circ$  om panelen är parallell med marken och  $90^\circ$  om panelen är riktad mot horisonten. (Liljeroth & Norle 2022a)

Med tidigare nämnda vinklar, tiden på året, solarkonstanten, luftmassan, molnighetens påverkan på mängden diffus strålning och omgivningens påverkan på den reflekterade strålningen kan solinstrålningens effekt beskrivas. (Liljeroth & Norle 2022a)

## 2.2 Vätgas

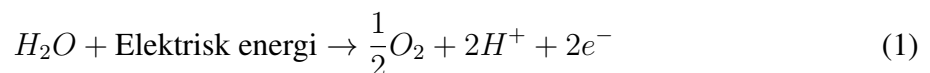
### 2.2.1 Elektrolys

För att kunna nyttja energin som solcellspanelerna producerar och för att framställa vätgas med låga mängder växthusgasutsläpp och hög renhetsgrad kan elektrolys användas med vatten som reaktant (Kragge 2022; Larsson 2022). Inom vattenelektrolys finns olika system, bland annat elektrolys av fast oxid, alkalisk elektrolys och elektrolys med protonbytesmembran (PEM) där material och driftförhållanden skiljer sig åt för respektive system. (Larsson 2022)

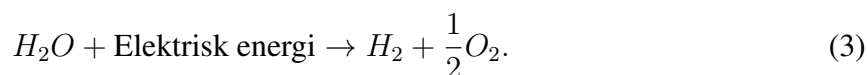
PEM är en metod med snabb uppstartstid, hög verkningsgrad, anpassningsbar för spänningsvariation och är bra miljömässigt jämfört med resterande alternativ. En nackdel är att detta är en nyare och dyrare metod än alkalisk elektrolys som är mer etablerad. Alkalisk elektrolys är inte en optimal teknik ty den har långsamt laddnings svar och är därför svår anpassad till den varierande effekt som erhålls från förnybara energikällor som solcellspaneler. Elektrolys av fast oxid har problemet att hög drifttemperatur krävs, vilket är svårt att uppnå. Tekniken kan därför användas med exempelvis kärnkraft eller geotermisk energi. (Larsson 2022)

Grundprincipen med elektrolys för produktion av vätgas är att spjälka vattenmolekyler med elektrisk energi så att vätgas och syrgas produceras. I cellen där detta utförs, för PEM-elektrolys, behövs en elektrolyt och strömförande elektroder varav en anod och en katod. Ett protonbytesmembran agerar som elektrolyt där protoner kan diffundera från anoden till katoden. För specifikt vattenelektrolys pumpas vatten till anoden där vattenmolekylen delas och vätejonerna förflyttas genom membranet till katoden. Där reagerar vätejonerna tillsammans med de elektroner som finns på katoden och bildar vätgas. Syrgas bildas dessutom på anodsidan. (Larsson 2022)

Vid den positivt laddade anoden sker först en oxidationshalvreaktion vilket medför att vätejonerna separeras från syrgasen enligt ekvation 1. Ekvation 2 visar reaktionen vid katoden där vätgas bildas efter en reduktionshalvreaktion då den negativt laddade katoden attraherar positiva vätejoner.

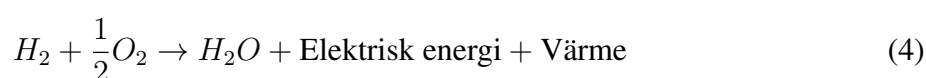


Reaktionerna i ekvation 1 och 2 resulterar i ekvation 3 som beskriver hur vatten spjälkas till vätgas och syrgas med elektrisk energi.



## 2.2.2 Bränslecell

En central del i både vätgasdrivna fordon och anläggningen för vätgasproduktionen är bränsleceller. Dess syfte är att producera elektrisk energi direkt från bränslet vätgas och oxidationsmedlet syrgas. Bränsleceller har den motsatta funktionen till en elektrolysör och möjliggör användning av vätgas som en lagringsmetod för elektrisk energi. Den elektrokemiska processen i bränslecellen är beskriven i ekvation 4 där de erhållna produkterna är vatten, elektrisk energi och värme. Den kemiskt producerade värmen kan skada bränslecellens komponenter och därför används separata luft- eller vätskeflöden för att upprätthålla önskad drifttemperatur. (Nyström 2022)



Det finns flera olika typer av bränsleceller, precis som med elektrolysörer, där de varierar i bland annat katalysatormaterial, elektrolyt och drifttemperatur. Det finns 6 huvudtyper av bränsleceller; direkta metanolbränsleceller (DMFC), fastoxidbränsleceller (SOFC), smälta karbonatbränsleceller (MCFC), fosforsyrabränsleceller (PAFC), alkaliska bränsleceller (AFC) och protonutbytesmembranbränsleceller (PEMFC). Den bränslecellstyp som anses ha flest användningsområden samt har störst framtidspotential är PEMFC. PEMFC arbetar under relativt låga temperaturer på 60-80 °C, har en snabb uppstartsperiod och har en elektrisk verkningsgrad på 40-60 %. På grund av detta har PEMFC valts för det här arbetet. (Nyström 2022)

## 2.2.3 Lagring

De vanligaste metoderna för vätgaslagring är komprimerad vätgas, kryokomprimerad vätgas, lagring i fast form i hydrider samt flytande kryogen vätgas. För stationär lagring är komprimerad vätgas den mest använda metoden. Fördelarna med komprimerad vätgas är att det är en enkel metod och att det inte finns begränsningar för hur länge gasen kan lagras. I komprimeringsprocessen går ungefär 20 % av den totala energin förlorad. Behållarna som vätgasen lagras i håller väldigt tätt och verkningsgraden för lagringen av komprimerad vätgas ligger på upp till 99 %, exklusive komprimering. (Thunberg 2022)

## 2.3 Fordon

### 2.3.1 Vätgastraktor

Ett vätfordon är ett elektriskt drivet fordon där batterierna är utbytta mot en vätfast tank och en bränslecell. I bränslecellen omvandlas vätfgasen till elektrisk energi som driver motorn. En traktor används i huvudsak till att lyfta och dra olika typer av utrustning. Traktorer används ofta på ojämna underlag och måste kunna användas där det finns olika typer av hinder som sluttningar och mjukt underlag. Detta ställer höga krav på traktorns effektivitet och prestanda. Bränsleceller är konstruerade för att användas under konstant last och uppnår sin maximala effektivitet när de inte körs på full effekt. För att optimera en vätfgasdriven traktor kan det därför vara fördelaktigt att installera en sekundärkälla som kan tillgodose behovet vid olika effekttoppar. En lösning på detta kan vara användning av batterier eller superkondensatorer. Sekundärkällan kan

då tillföra energi när energibehovet är som störst under hög last eller snabb acceleration. Med batterier och superkondensatorer kan energi dessutom regenereras till fordonet vid inbromsning eller transport nedför sluttningar. (Ullén 2022)

Fördelarna med en vätgas–elhybrid är många jämfört med en traktor driven av enbart vätgas. Nedan listas några av dessa:

- Mindre bränslecell → lägre kostnad
- Bränslecellen kan operera under optimal effekt → ökad livstid
- Bränslecellen kan optimeras för effekt i stället för livstid
- Urladdning av batterier elimineras → längre livstid
- Snabbare uppstart för bränslecellerna
- Regenerering av energi till batterierna

Som ovan beskrivits är fördelarna många men det finns även vissa nackdelar som exempelvis fler komponenter, ett mer komplext kontrollsystem, ökad vikt och ökad batterikostnad. (Ullén 2022)

### 2.3.2 Vätgaslager i fordon

Okomprimerad vätgas har väldigt lågt energiinnehåll per volym. För att öka vätgasens volymetriska energitäthet krävs lagring under högt tryck, under låga temperaturer i vätskeform eller i metallhydridsystem. Den vanligaste tekniken inom fordonsapplikationer är komprimerad vätgas. Om vätgas lagras under 350 bar motsvarar en liter vätgas ungefär 0,75 kWh kemisk energi. (Ullén 2022)

Ett dilemma vid konstruktion av vätgasdrivna traktorer är placering av vätgastankarna. På dagens dieseldrivna traktorer är tankarna ofta formpressade och placerade mellan chassi och hytt i oregelbundna former. För vätgasdrivna traktorer är detta inte möjligt, ty dagens vätgastankar är i regel cylinderformade för att kunna hantera högt tryck. I en cylinder så fördelas trycket jämnt genom hela tanken. Detta är inte fallet för en formpressad tank där högst tryck uppstår i hörn och kanter vilket ökar risken för läckage och haveri. Detta innebär att det finns få möjligheter att montera tillräckligt med tankar för att en jordbrukstraktor skall klara ett helt dagsarbete utan att tanka. Ett alternativ till montering av flera små vätgastankar är användning av en kassett fylld med bränsle. Kassetten kan då placeras där den är minst i vägen beroende på vilket arbete som ska utföras. Kassetten skulle i somliga fall kunna placeras i frontlyften i stället för att använda en frontvikt, eller monteras direkt på redskapet som används. Ytterligare en fördel med användning av kassetter är att de enkelt kan bytas ut vid tankning. Utbytbara kassetter möjliggör då tankning under lågt tryck och under lång tid vilket är mer kostnadseffektivt. Dock tillverkas i dagsläget inga gaskassetter i kommersiell skala. (Ullén 2022)

### 2.3.3 Tankning

Det enklaste sättet att fylla en vätgastank är genom direkttankning. Tankning av vätgasdrivna fordon under högt tryck är en komplex process som kräver att vätgasen håller sig inom ett visst intervall för tryck, temperatur och att gasens densitet är hög. Vid tankning under högt tryck expanderar gasen vilket leder till en ökad yttemperatur på vätgastanken. Av säkerhetsskäl får tankens yttemperatur inte överstiga 85°C. För att motverka detta är det viktigt att tankningen

inte går för fort och temperaturökningen kan motverkas genom att förhandskyla vätgasen. Enligt den internationella standarden SAE TIR J2601 krävs en förhandskylning på  $-20$  till  $-40^{\circ}\text{C}$  om det önskade trycket i tanken är 700 bar. Om det önskade trycket i tanken är 350 bar krävs ingen förhandskylning. (Ullén 2022)

### 3 Modellering

Med teori från bakgrundsteorin utformades en modell för att simulera optimala dimensioner för ett vätgaslager samt storlek på solcellsanläggning för att uppfylla de två scenarierna. Detta gjordes genom att simulera gårdens energibehov och se till att dessa täcks på timbasis över året. Modelleringen genomfördes i Simulink där energianvändning, lagernivå med mera studerades på timbasis utefter de undersökta scenarierna.

#### 3.1 Energiförbrukning på gården

För energiförbrukningen insamlades data över gårdens nuvarande producerade, inköpta och sålda elektriska energi samt tanktillfällen för berörda fordon. Den tilldelade datan över såld och inköpt elektrisk energi för 2021 var på timbasis och genereringen av elektrisk energi från solcellspanelerna angavs för varje kvart. Energianvändningen för fordonen på gården beskrivs veckovis med mängden tankad HVO100 i liter.

Genom att addera den inköpta och producerade elektriska energin från solcellspanelerna och subtrahera den sålda elektriska energin erhålls förbrukningen, som för år 2021 var 31,6 MWh.

Energianvändningen för den nuvarande hjullastaren angavs i liter HVO100 per vecka och omvandlades till energi i kWh. För 2021 var den totala drivmedelsanvändningen 73,56 MWh (Nyström & Ullén 2022). Då ingen verkningsgrad på den eldrivna hjullastaren var angiven antogs en verkningsgrad på 90 %. Ett teoretisk körschema för hjullastaren utformades där den uppskattade användningen var en timme om dagen hela året. Körschemat baseras på den nuvarande användningen som är jämt fördelad på året samt information från brukaren. Utöver nuvarande användning beräknas framtida energianvändning öka med 50 % på grund av framtida arrenderingar och adderas till körschemat.

Då de modellerade traktorerna använder ett batteri brukar de elektrisk energi. Traktorernas energiförbrukning och modellering beskrivs närmare i avsnitt 3.4.

#### 3.2 Solcellspaneler

Gården har redan 84 solcellspaneler monterade i sydlig riktning, med en installerad effekt på 325 Wp (Watt peak) per panel, där Wp är maximal effekt vid ideala förhållanden. Dessa ytor är maximerade, och effekten från dessa var för liten för att driva den vätgasanläggning som undersöktes. Därför modellerades en installation av fler solcellspaneler. För solcellspanelernas modellering användes den färdiga modellen PVGIS, utarbetad av EU. Modellen är satellitbaserad, vilket betyder att komplexa beräkningar sker via satellitbilder där markhöjden mäts med en upplösning på 3 bågsekunder, motsvarande 90 meter, för att ta hänsyn till bland annat skuggor. Satellitdatabasen som användes var SARA2, då den har minst antal felkällor för norra Europa. Modellens inparametrar är adress, typ av solcellspanel, år för solinstrålningsdata, val av tidsskala, installerad effekt, systemförluster samt azimutvinkel och lutningsvinkel för taket. Dessa är enkla data att ta reda på till skillnad från modeller som tar klimatdata som inmatning. Den data

från gården som användes som input var lutningsvinkel för det specifika taket samt takets area vid beräkning av maximal installerad effekt. PVGIS tar hänsyn till temperatur, vindhastighet och solinstrålning, och ser den diffusa strålningen som anisotropisk. (Liljeroth & Norle 2022b)

Då beräkningarna från PVGIS baseras på redan uppmätt data undersöktes energiproduktionen för en takyta under en tioårsperiod. Under denna period varierade energiproduktionen från solcellspanelerna med en standardavvikelse på 4,4 %.

Perioden 2018-2020 hade störst variation av solinstrålningen mellan åren där standardavvikelsen var 4,2 %. Därför valdes denna period som simuleringsperiod för att efterlikna framtida variationer i solinstrålning. Data för solcellspanelernas energiproduktion under dessa tre år beräknades av PVGIS. Sedan undersöktes varje timvärde för varje år. Detta gav tre värden per timme och ett medelvärde av dessa tre beräknades för att få ett beräknat år med medelvärdet från perioden 2018-2020. Det beräknade året användes sedan som input i vätgasmodelleringen.

Det var även av intresse att jämföra simulerad genererad elektrisk energi mot uppmätt för att få en uppfattning av modellavvikelser. Detta gjordes för året 2020 som gav att de simulerade värdena på årsbasis var cirka 4 % mindre än de uppmätta. I modelleringen användes simulerade värden för alla solcellspaneler, även de redan installerade.

Den installerade effekten per panel som användes var 395 Wp för de simulerade solcellspanelerna och 325 Wp för de redan installerade. Från mått på tak och takvinklar tillsammans med måtten på solcellspanelerna beräknades det maximala antalet solcellspaneler som teoretiskt sett kan monteras på gårdens byggnadstak, vilket var 2 022 st med en total installerad effekt på 799 kWp, medräknat de redan installerade solcellspanelerna. Detta i syfte att undersöka systemets maximala dimensioner. Detta värde skalades om i vätgasmodellen för att ge en dimensionsuppskattning, och när lämpliga värden erhöles simulerades detta via PVGIS för att få de faktiska värdena.

Vid beräkning av gårdens energibehov fanns data för producerad, inköpt och såld elektrisk energi för år 2021 medan solinstrålning för modellen fanns fram till och med 2020.

### **3.3 Vätgas**

#### **3.3.1 Vätgasanläggning**

Företaget Nilsson Energy tillhandahåller vätgasläggningar som innehåller komponenter vars dimensioner är anpassningsbara för att optimera dess kapacitet efter enskilda förutsättningar.

Huvudkomponenterna i anläggningen är avjoniseringsaggregat, elektrolysör, kompressor, vätgaslager, bränslecell, AC/DC-växleriktare, batterier och RECA. För produktion av 1 kg vätgas krävs 11,11 l vatten och 55 kWh elektrisk energi där avjoniseringsaggregatet och elektrolysprocessen är inkluderade. Avjoniseringsaggregatet renar vattnet så att det är brukbart i elektrolysprocessen. PEM valdes som typ av elektrolysör, vilken kan producera vätgas under dygnets alla soltimmar om det krävs. När vätgasen är producerad används en kompressor för att öka trycket till 350 bar, vilket är trycket som gasen lagras i. För att driva kompressorn krävs ytterligare elektrisk energi, ungefär 2,75 - 4,4 kWh/kg vätgas. Lagringen sker i en tank bestående av sammankopplade trycksatta kärl där varje kärl har en volym på 1 650 liter. Anläggningen innehåller även ett litiumjonbatteri med en verkningsgrad på 90 - 95 % och all elektrisk energi som går ut från anläggningen samt den elektriska energin som används internt dras från detta batteri. När solcellspanelerna producerar elektrisk energi laddas batteriet upp parallellt med driften av elektrolysören. Ifall batteriet behöver laddas upp när solcellspanelerna inte genererar elektrisk

energi startas bränslecellen för att producera elektrisk energi av vätgasen. Bränslecellen är en PEM-bränslecell, samma typ som för elektrolysen, och genererar elektrisk energi från vätgasen tillsammans med syre. Bränslecellen har en elektrisk verkningsgrad på 50 - 55 %. Bränslecellen genererar likström och för att möjliggöra användning av den elektriska energin behövs en AC/DC-växelriktare. Anläggningen styrs av styrsystemet RECA som kontrollerar driften av anläggningen med alla dess komponenter.<sup>1</sup>

### **3.3.2 Beräkningar och antaganden**

I detta projekt har en modell för vätgasproduktion skapats i Simulink där systemet simuleras som ett energiflöde där de energikrävande processerna räknas som förluster i form av verkningsgrader presenterade i avsnitt 2 och 3.3.1. Modellen är baserad på de komponenter som kräver energi samt de komponenter som kan vara begränsande för produktionen, bland annat batteristorlek och lagringsvolym.

I modellen för vätgasanläggningen används den elektriska energin producerad från solcellspanelerna i första hand till direkt förbrukning av elektrisk energi på gården. Vid överskott från produktionen laddas batteriet upp i syfte att användas som reservkraft. När batteriet är fulladdat används elektrisk energi från solcellspanelerna till att driva elektrolysen som producerar vätgas. Vätgasen används som bränsle i traktorerna, men också för att producera elektrisk energi genom en bränslecell. Detta vid tillfällen då solcellspanelerna inte genererar elektrisk energi och batteriet inte är uppladdat. Ett antagande som gjordes är att batteriet aldrig laddar ur mer än 80 % av dess kapacitet. En ytterligare förenkling som gjorts är att modellen inte tar hänsyn till att trycket i vätgaslagret kan variera för olika mängd vätgas som finns i lagret.

## **3.4 Traktor**

### **3.4.1 Beräkningar och antaganden**

För att underlätta beräkningarna har en rad förenklingar och antaganden gjorts vid dimensionering av vätgastraktorerna. Som tidigare beskrivits i 2.3.1 uppnås högst effektivitet och prestanda när en bränslecell arbetar parallellt med ett batteri som sekundärkälla. Följande beräkningar utgår från en teoretisk traktor där motorn drivs av enbart batteriet så länge detta räcker. När batteriet är urladdat kopplas bränslecellerna på och fortsätter försörja motorn med elektrisk energi. Vid modelleringen gjordes antagandet att traktorn är identiskt konstruerad som gårdens nuvarande traktorer förutom drivlinan. Detta innebär att dieselmotorn ersätts med en elmotor, ett batteri och en bränslecell. Alla andra komponenter som till exempel växellådan och dess medförande förluster är inkluderade. På gården brukas en skördetröska driven på HVO100. Denna kommer ej konverteras till en vätgashybrid men utsläppen inkluderas i utsläppskalkylen.

Traktorerna modellerades i två separata subsystem som utgår från det teoretiska körschemat, se tabell 1. Input till systemet inkluderar en laddningseffekt för batteriet på 22 kW och en tankningskapacitet på 3-5 kg vätgas per minut. För urladdning av batteriet och användning av bränslecellen sattes en undre gräns på 20 % och en övre gräns på 90 % av batteriets fulla kapacitet. För bränslecellen sattes en undre gräns på 10 % av vätgastankens fulla kapacitet. Dessa antaganden gjordes eftersom det inte är realistiskt att köra slut på varken batteri eller vätgastank samt att batteriets livslängd inte gynnas av att laddas fullt. I systemet används två verkningsgrader. En för elmotorn som ligger på 90 %. Denna verkningsgrad påverkar all drift

---

<sup>1</sup>Hans-Olof Nilsson, Technical Director/Founding Partner, Nilsson Energy, mailkontakt våren 2022

i traktorn oberoende om det är från batteriet eller bränslecellen. Den andra verkningsgraden är för bränslecellen. Denna verkningsgrad ligger på 52 % och är en uppskattad verkningsgrad baserad på intervallet 40-60 % som PEM-bränsleceller normalt ligger på (Nyström 2022).

Både batteriets och vätgastankens storlek bestämdes genom flertalet simuleringar där de dimensionerades för att klara av traktorernas normala arbete inklusive några extremfall med längre dagar.

### 3.4.2 Teoretiskt körschema

Nedan följer en tabell med arbetstoppar under året. Tabellen är sammanställd från uppgifter av beställaren.

Tabell 1: Teoretiskt körschema

Säsong	Vecka	Antal dagar	Arbetstid [h/dag]	HVO100-förbrukning [l/h]
Vårbruk	17-20	13	6	12
Vallskörd 1	25-27	10	6	8
Vallskörd 2	30-31	6	6	8
Vallskörd 3	36-37	5	6	8
Höstbruk	29-36	14	6	12
Halmpressning	33-38	7	4	7
Övrigt	33-43	12	6	10

Med information från tabell 1 påbörjades ett hypotetiskt körschema för traktorerna under ett år, där liter HVO100/h beräknades om till energiekvivalenter och placerades ut under slumpmässigt utvalda dagar under de olika säsongerna. Vid omvandling från HVO100/h till dess energiekvivalent har verkningsgraden på nuvarande dieselmotorer antagits vara 35 % (Nyström & Ullén 2022). Viktigt att notera är att ovanstående data enbart beskriver arbetstoppar och inte all användning av traktorerna på årsbasis. Utöver ovanstående tabell erhöles data över beställarens tankning av HVO100 under året på veckobasis. Tankningsdatan beräknades om till energiekvivalenter och användes till att fylla ut eventuella luckor i körschemat. Tabell 1 beskriver bara arbetstiderna under normala förhållanden. Utöver detta kan tillfällena vid förestående regn skapa extremdagar. Dessa uppstår oftast vid vårbruket och vid vallskörden. Vid dessa dagar kan arbetstiden uppgå till 12 timmar per dag. För att ta hänsyn till detta och göra det teoretiska körschemat så verklighetstroget som möjligt implementerades ett antal extremdagar där motsvarande 12 liter HVO100 per timme användes under en 12 timmars arbetsdag. Från beställaren fanns även en önskan att undersöka möjligheten att utöka jordbrukets arealer genom att arrendera grannens mark. Med denna arrendering uppskattade beställaren att bränsleförbrukningen skulle öka med 50 %. Den extra energin som detta innebär adderades till körschemat under slumpmässigt utvalda dagar.

### 3.4.3 Tankning

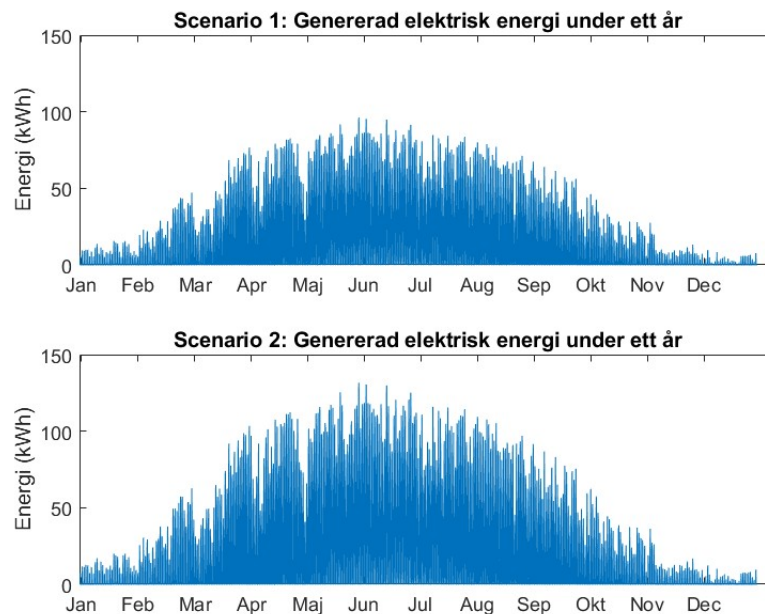
För att modellera tankningen användes data för en tankstation från Nilsson Energy. Tankstationen består av en kompressor och en separat lagringstank. Kompressorn tar vätgas från det stora lagret och ökar trycket till 500 bar som är trycket i tankstationslagringen. Komprimeringsprocessen kräver 4-5 kWh per kg vätgas. Traktorn tankas sedan genom tryckutjämning där trycket

på gasen minskar till 350 bar i traktortanken. Denna tankningsmetod gör det möjligt att tanka 3-5 kg vätgas i minuten<sup>2</sup>.

## 4 Resultat

Simuleringen visade att i scenario 1 behöver 340 solcellspaneler installeras, utöver de befintliga solcellspanelerna, med en installerad effekt på 134,3 kW. För scenario 2 behöver 500 solcellspaneler installeras utöver de befintliga med en installerad effekt på 197,5 kW. I båda scenarierna monterades hälften i västlig riktning på en av gårdens lador och hälften i östlig riktning på samma lada. Detta då gårdens alla tillgängliga tak är i öst-västlig riktning.

Den simulerade genomsnittliga timvisa genererade elektriska energin från de två scenarierna över en ettårsperiod kan ses i figur 1. I figuren kan noteras att scenario 1 & 2 följer samma mönster men i scenario 2 produceras mer elektrisk energi då fler solcellspaneler är installerade.



Figur 1: Genomsnittlig genererad elektrisk energi per timme från solcellspaneler för scenario 1 & 2.

Genom modelleringen kunde dimensionerna för komponenterna i vätgasanläggningen erhållas. Efter jämförelse av dessa värden med faktiska komponenter som finns på marknaden kunde en lösning fås fram av Nilsson Energy<sup>1</sup> för just dessa förhållanden. Lösningen visade att samma dimensioner för anläggningens komponenter kan användas i båda av de två undersökta scenarierna, se tabell 2. Lagret bestod av fem trycksatta kärl med ett tryck på 350 bar och volym på 1 650 liter i respektive kärl.

<sup>2</sup>Hans-Olof Nilsson, Technical Director/Founding Partner, Nilsson Energy, samtal 2022-05-09

<sup>1</sup>Hans-Olof Nilsson, Technical Director/Founding Partner, Nilsson Energy, mailkontakt våren 2022

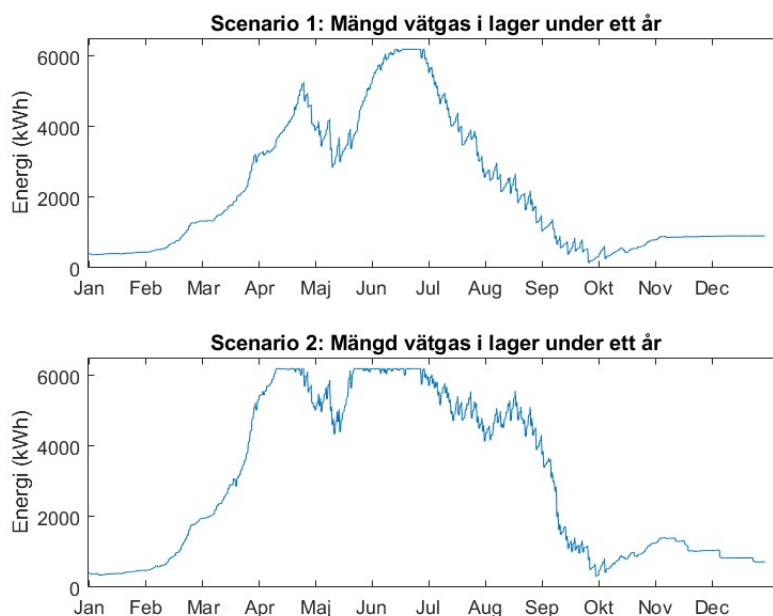


Tabell 2: Dimensioner för vätgasanläggningens komponenter

	Scenario 1	Scenario 2	Marknadskomponenter
Batteri [kWh]	60	60	60
Lager [kWh]	6 000	6 500	6 188
Elektrolysör [kW]	100	120	150
Bränslecell [kW]	40	40	40

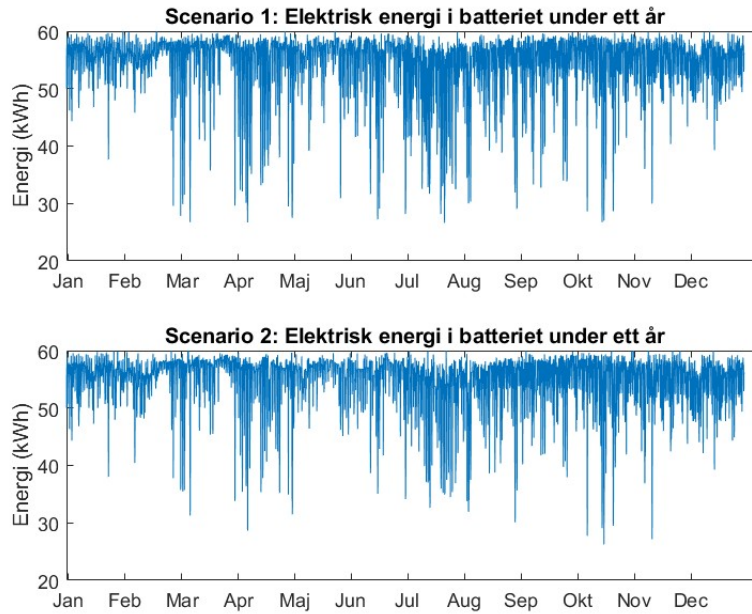
Vätgas i lagret under året visas i figur 2 där maximala energimängden vätgas i lagret kan uppgå till 6 188 kWh, vilket motsvarar 8 250 liter vätgas vid ett tryck på 350 bar. De båda scenarierna dimensioneras så att det alltid finns 225 liter vätgas i lagret, vilket motsvarar 300 kWh. Detta för att säkerställa att möjligheten till en extra tankning alltid ska finnas.

I figur 2 visas tydligt att fler installerade solcellspaneler ger en snabbare påfyllning av vätgas i lagret. Påfyllningen som sker under februari, mars och april, innan vårbruket, är mycket större i det andra scenariot än det första. När höstbruket inleds sjunker vätgaslagret i scenario 1. Det går även att observera att vätgaslagret i scenario 2 håller jämn nivå fram till när höstbruket och vallskörd 3 sammanfaller i början av september. Därefter sjunker nivån snabbt. Den snabba minskningen i vätgas mängd kan även förklaras med att körschemat för den andra traktorn är utformat så att den arbetar mer på hösten. Totalt under året producerades 23,7 MWh vätgas i scenario 1 och 35,0 MWh i scenario 2, vilket motsvarar runt 710 kg vätgas respektive 1 050 kg vätgas. I fallet att vätgas säljs, vilket är en del av scenario 2, är det den vätgas som den andra traktorn förbrukar som säljs istället. Den mängden vätgas är då utspridd över året och ger en årlig mängd på 498 kg, vilket motsvarar 16,6 MWh.



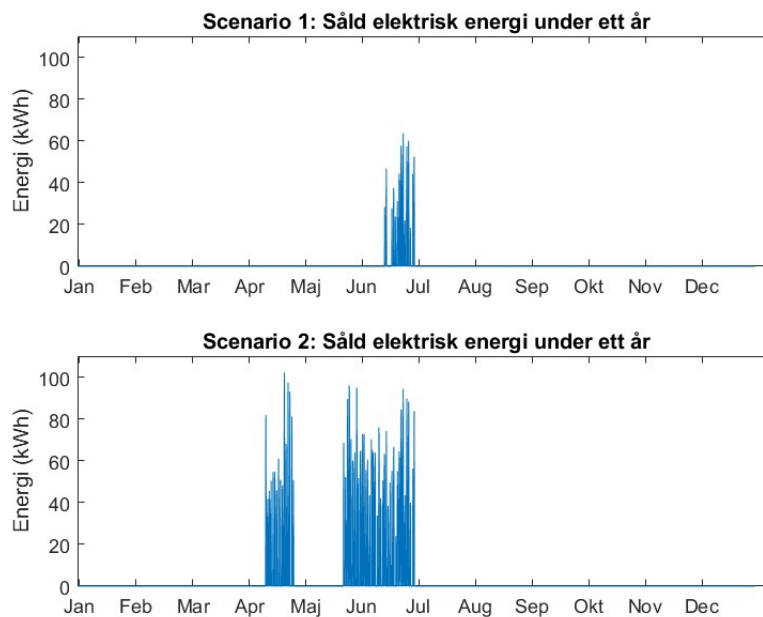
Figur 2: Vätgaslager för scenario 1 & 2.

I figur 3 visas hur batteriets energilager varierar under året. Batteristorleken är samma för de båda scenarierna med en maximal gräns på 60 kWh och urladdningen får aldrig gå under 20 % av maximal kapacitet.



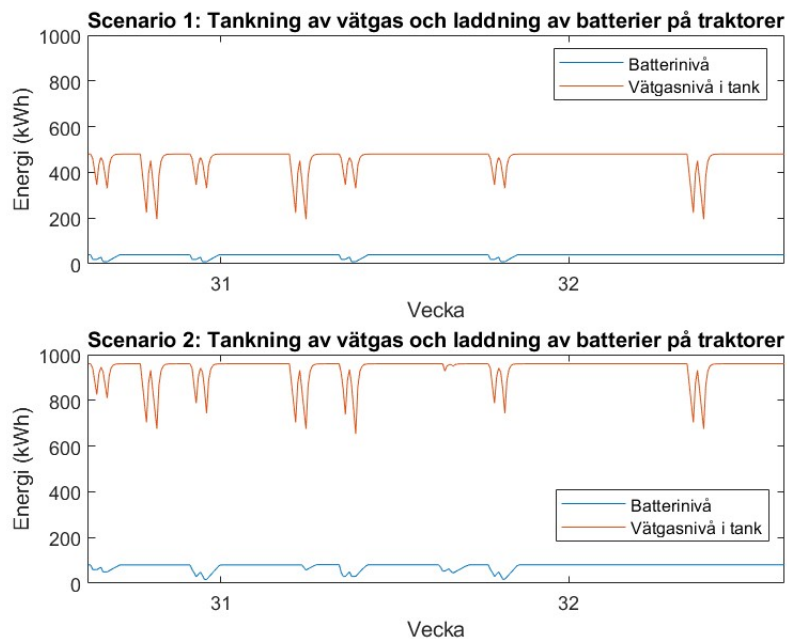
Figur 3: Energi i batterilager för scenario 1 & 2.

Årssumman för förbrukningen av elektrisk energi var 114 MWh för scenario 1 och 117 MWh för scenario 2. Överskottet av elektriska energin som inte förbrukas på gården eller används till vätgasproduktion säljs till nätet och illustreras i figur 4. För scenario 1 finns endast ett överskott under juni, där det maximalt kan säljas runt 60 kWh per timme. I scenario 2 kan den elektriska energin säljas under en större del av året än scenario 1, och det kan maximalt säljas runt 100 kWh per timme. Detta resulterar i en total försäljning per år av 3,80 MWh i scenario 1 och 23,4 MWh i scenario 2.



Figur 4: Söld elektrisk energi för scenario 1 & 2.

Figur 5 beskriver energiförbrukningen och tankningen för vätgastraktorerna under vecka 31 och 32 för att illustrera hur bränslecell och batteri samverkar. Scenario 1 visar förbrukningen för en traktor medan scenario 2 visar energiförbrukningen för två traktorer. Figuren visar även hur batteriet används primärt och att bränslecellen kopplas på då batteriet kommer ner på 20 % av sin totala kapacitet. Viktigt att nämna är även att batteriet endast laddas upp till 90 % av sin kapacitet. I figur 5 kan det noteras att både tankning av vätgas och laddning av batteriet sker samtidigt när traktorerna inte körs. Dimensionerna för vätgastanken på traktorerna är 640 liter vilket motsvarar 480 kWh under 350 bar tryck och batteriet är på 43 kWh.



Figur 5: Energi i vätgastank och batteri på traktorerna för scenario 1 & 2

#### 4.1 Utsläpp och vattenanvändning

Vid användning av HVO100 beräknades utsläppen för det simulerade året till 7,72 ton koldioxidekvivalenter från gårdens arbetsmaskiner i fallet att arbetsytan ökar med 50 %. Genom att byta ut bränsleanvändningen på gården från HVO100 till vätgas och elektrisk energi minskar växthusgasutsläppen på gården med 60 %, vilket motsvarar 4,65 ton koldioxidekvivalenter för scenario 1. För scenario 2 vid användning av två traktorer minskar utsläppen med 92 %, vilket är 7,12 ton koldioxidekvivalenter. Omvandlingen från HVO100 till koldioxidekvivalenter beskrivs med faktorn 695 g CO<sub>2</sub>e/l (Jonson 2021).

Utöver elektrisk energi krävs även vatten. Enligt avsnitt 3.3.1 krävs 11,11 liter vatten per producerat kg vätgas, vilket resulterar i en total användning på 7 900 liter vatten för scenario 1 och för scenario 2 krävs 11 700 liter vatten under ett år.

#### 4.2 Kostnad

En enklare uppskattning har gjorts på investeringskostnader för det undersökta systemet. I tabell 3 redovisas kostnadsförslag för olika komponenter i vätgasanläggningen, installation av solcellspaneler för de två scenarierna samt två olika kostnadsförslag för tänkbara tankstationer.

Nilsson Energy avser ett snabbtankningssystem. Kostnadsförslaget från Euromekanik AB avser istället ett system för långsamtankning av typen FOS H2Refuel Fleet Owner Station där en kompressor kopplas till vätgaslagringen. FOS har en tankningskapacitet av 4-8 kg/h <sup>3</sup>.

Tabell 3: Kostnad för varje enskild modellerad komponent

Komponent	Scenario 1 [MSEK]	Scenario 2 [MSEK]
Elektrolysör <sup>4</sup>	6,54	6,54
Batteri <sup>4</sup>	0,37	0,37
Bränslecell <sup>4</sup>	0,59	0,59
Kompressor <sup>4</sup>	2,27	2,27
Lagring <sup>4</sup>	1,12	1,12
AC/DC inverter <sup>4</sup>	0,24	0,24
RECA <sup>4</sup>	0,09	0,09
Solcellspaneler (Svea Solar u.å)	2,28	3,36
Tankstation Nilsson Energy <sup>4</sup>	11,50	11,50
Tankstation Euromekanik AB <sup>3</sup>	3,00	3,00

Eftersom det inte finns några vätgasdrivna traktorer på marknaden idag har en kostnadskalkyl för dessa ej utförts.

Den totala investeringskostnaden med tankstation från Euromekanik AB exklusive traktorerna för scenario 1 var 16,5 MSEK och för scenario 2 var kostnaden 17,6 MSEK. Med en tankstation från Nilsson Energy var kostnaden 25,0 MSEK för scenario 1 respektive 26,0 MSEK för scenario 2.

## 5 Diskussion

Syftet med denna rapport var att dimensionera ett system av solcellspaneler och vätgasproduktion för att gården ska bli självförsörjande för alla dess elbehov. Scenario 1 använder en vätgashybridstraktor och scenario 2 använder två vätgashybridstraktorer, eller alternativt säljer vätgasen som den andra hybridtraktorn hade förbrukat. Modelleringen visar att samma dimensioner på vätgasanläggningens komponenter kan användas för att uppnå kraven i både scenario 1 och 2. De specifika dimensionerna för varje komponent beskrivs i resultatet. Takarean på en av gårdens lador är tillräckligt stor för att installera de solcellspaneler som krävs för de båda scenarierna.

För soldatan användes mätdata från den redan installerade solcellsanläggningen för att beräkna gårdens energibehov för år 2021. Simulerade värden användes för resten av beräkningarna. De simulerade värdena var 4,2 % mindre än de uppmätta, vilket anses vara en rimlig avvikelse. Simulerade värden användes då ett framtidsscenario undersöktes vilket är svårt att uppskatta med hög noggrannhet. Därför är genomsnittsvärden över flera år från PVGIS i detta fall det bästa alternativet för att prediktera framtida solinstrålning, då större variation av solinstrålning representeras.

Vid beräkning av gårdens energibehov användes data från år 2021 för producerad, inköpt och såld elektrisk energi och beräknad solinstrålning från PVGIS mellan 2018-2020. Det uppstår

<sup>3</sup>Cecilia Svensson, Project Manager, Euromekanik AB, mailkontakt 2022-05-20

<sup>4</sup>Hans-Olof Nilsson, Technical Director/Founding Partner, Nilsson Energy, mailkontakt 2022-05-21

därför en felkälla när datan jämförs på timbasis, då värden från olika år och därmed väderomständigheter används. För att minimera felkällorna hade det varit fördelaktigt att ha all data från samma år. Ytterligare en felkälla är att PVGIS inte tar hänsyn till solcellspanelernas nära omgivning, vilket medför att den verkliga reflekterade solinstrålningen från omgivningen, exempelvis närliggande byggnader och träd, skiljer sig från modellens. Det är även möjligt att installera andra typer av solcellspaneler med annan installerad effekt vilket skulle medföra att kravet för scenarierna på antal solcellspaneler kan ändras.

Beroende på vad som prioriteras av vätgasanvändning och användning av elektrisk energi kan storleken på vätgaslager och batteri variera. I detta arbete har vätgasanvändningen prioriterats för att möjliggöra användning av vätgasdrivna traktorer. Vid fall då vätgas endast agerar energilager för senare utvinning av elektrisk energi är det mer resurs- och kostnadseffektivt att installera ett större batteri. De låga verkningsgraderna, i elektrolysör och bränslecell, bidrar till att närmare hälften av den användbara elektriska energin förloras i omvandlingar och därmed inte brukas. Batterier har högre förluster för lagring under längre tid än vätgaslagring men under kortare tidsperioder är förlusterna mycket lägre med dess höga verkningsgrad. Det medför att ändamålet med systemet är viktigt att ha i åtanke när dimensioner fastställs.

I modellen för vätgasproduktionen antas överskottet av den elektriska energin först ladda batteriet fullt innan elektrolysprocessen startar. I det verkliga systemet laddas batteriet parallellt som elektriska energin också går till att driva elektrolysen. I modellen kan därför problem uppstå vid hög förbrukning av elektrisk energi, då all elektrisk energi går till batteriet och ingen vätgas produceras.

Då vätgastraktorer befinner sig i utvecklingsstadiet och begränsad information finns om dessa skapades en teoretisk traktor för simuleringsmodellen. Den teoretiska traktorn är en förenklad modell och bygger på en rad antaganden. Detta medför att värden som erhållits kan vara missvisande för framtida verkliga system där energiförbrukningen kan avvika. För traktorn konstruerades ett teoretiskt körschema. Viktigt att notera är att körschemat är uppbyggt på uppskattningar från den information som erhållits från beställaren. Detta medför att körschemat inte exakt överensstämmer med beställarens verkliga användning. Detta var dock nödvändigt för att slutföra modellen och körschemat torde ge en god uppskattning om huruvida tillräckligt med vätgas kan produceras för att bedriva ett vätgasbaserat jordbruk.

Modellen dimensionerades så att traktorn klarar alla tänkbara arbetsdagar utan att behöva tanka under bruksperioden. För att uppnå detta resultat krävdes emellertid en tankvolym på 640 liter, vilket motsvarar 480 kWh. Denna tankvolym är stor och med hänsyn till utformningen på dagens vätgastankar torde det vara svårt att rymma denna volym på en traktor. För att kringgå detta problem bör flera alternativ undersökas. Snabbtankning kan vara en lösning, men som presenteras i tabell 3 är detta en väldigt kostsam teknik och är därför inte ett lönsamt alternativ för en småskalig vätgasanläggning.

Ett mer kostnadseffektivt alternativ kan vara att montera en kompressor i direkt anslutning till vätgaslagret. Med denna teknik uppnås en tankningskapacitet på 4-8 kg vätgas i timmen. Detta möjliggör fulltankning under natten. Dock kan kapacitetsbrist uppstå vid extremdagar om tanken inte är tillräckligt stor. Som beskrivits i avsnitt 2.3.2 kan utbytbara gaskassetter vara ett framtida alternativ. Kassetterna möjliggör då mindre volym på tanken och tankning under lågt tryck och lång tid vilket är kostnadseffektivt. Genom att kombinera långsamtankning med utbytbara kassetter kan ett flexibelt system uppnås, där en kassetts fylls på med vätgas medan traktorn används till arbete på gården. När traktorns tank sedan behöver fyllas på med bränsle går det att enkelt byta ut den tomma tanken mot den fulltankade och arbetet kan fortskrida.

Produktionen och användningen av vätgas påverkar miljön gällande både utsläpp och vattenförbrukning. För att möjliggöra vätgasproduktion med elektrolys kommer vattenanvändningen på gården att öka. Eftersom största delen av vätgasproduktionen sker under sommaren då det är som varmast kan detta potentiellt leda till vattenbrist på gården under vissa perioder beroende på hur vattentillgången ser ut.

Resultaten visade även att det blir en betydande skillnad gällande växthusgasutsläpp av gårdens arbetsmaskiner när de HVO100-drivna arbetsmaskinerna ersätts med arbetsmaskiner drivna med vätgas och elektrisk energi, exkluderande skördetröskan. Vid användning av en vätgastraktor minskas gårdens utsläpp med 60 % och vid användning av två vätgastraktorer med 92 %. Detta är en väsentlig minskning av gårdens miljöpåverkan. I denna rapport har endast de direkta utsläppen från fordonen inkluderats och framställningsmetoderna för bränslena, HVO100 respektive vätgas, har inte räknats med. Det betyder att resultaten av hur stor skillnad det blir i utsläpp kan ändras om hela kedjan medräknas, men det kräver ytterligare och djupare studier om detta.

En möjlighet till ett mer energieffektivt system är att ta tillvara på den genererade värmen vid vätgasproduktionen, vilket leder till en högre verkningsgrad för hela installerade systemet. Detta kan leda till att behovet av någon annan uppvärmningsmetod minskar.

I detta projekt har modellering och kostnads kalkyl för vätgasanläggningen utgått från företaget Nilsson Energy. Anläggningen bidrar med samtliga nödvändiga komponenter för vätgasproduktion och lagring vilket underlättade modelleringen då funktion och verkningsgrad varit lätta att hitta. Det finns även andra företag med liknande anläggningar eller enskilda komponenter som kan användas för samma ändamål som kan vara aktuella.

Systemet innehåller många komponenter det flitigt forskas om, bland annat bränsleceller och elektrolysör, där det finns möjlighet till snabb utveckling inom tekniken. Med vidare utveckling blir tekniken mer tillgänglig med lägre priser. Något som kan skynda på utvecklingen av vätgasanvändningen ytterligare är projekt liknande SSABs Hybrit, där vätgas används som energilagring. Om fler får upp ögonen för vätgasens möjligheter kan det bli en betydande byggsten i utvecklingen till en mer hållbar energiförsörjning.

Vid dimensionering av en verklig anläggning spelar de ekonomiska aspekterna stor roll. De olika komponenterna i systemet har olika kostnadsbilder som kan påverka dimensioneringen ur ett ekonomiskt perspektiv. Vätgaslagret har en högre installationskostnad än solcellspanelerna, vilket innebär en större initial investering, men ett större lager innebär ökad driftsäkerhet för årets mer intensiva arbetsperioder samt ger ökad möjlighet för potentiell vätgasförsäljning. Solcellspaneler med högre installerad effekt ökar möjligheten för snabb påfyllnad av vätgas i lagret och ger möjlighet att sälja överskottet av elektrisk energi som producerats. Möjligheten att sälja överskottet ger en garanterad inkomst som kan inleda återbetalningen av anläggningen direkt.

## 6 Slutsats

I denna rapport undersöktes vilka systemdimensioner som krävs för att ett mindre lantbruk kan vara självförsörjande för alla dess energibehov. Scenario 1 använde en vätgashybridstraktor medan scenario 2 använder två vätgashybridstraktorer, alternativt säljer vätgasen som en av hybridtraktorerna hade brukat. Resultatet gav att dimensionerna på de centrala komponenterna som kunde uppfylla kraven var en solcellspanelsanläggning, utöver de 84 befintliga, på 340 solcellspaneler i scenario 1 och 500 paneler i scenario 2. Vätgasproduktionsanläggningen kräver en elektrolysör på 150 kW, ett batteri på 60 kWh, en bränslecell på 40 kW och ett vätgaslager på 8 250 liter.

Genom att ersätta HVO100-användningen med vätgas och elektrisk energi minskar gårdens årliga utsläpp med 4,65 ton koldioxidekvivalenter för det första scenariot och 7,12 ton koldioxidekvivalenter för det andra om två vätgastraktorer används. Den årliga vattenförbrukningen för vätgasproduktionen i de två scenarierna uppgår till 7 900 liter respektive 11 700 liter.

## 7 Referenser

- Berggren, S. (2022). *[S1] - Solcellers grundläggande funktion*. Sveriges Lantbruksuniversitet. Civilingenjörsprogrammet inom energisystem.
- Hedin, L. (2021). *Därför dröjer elektrifieringen av jordbruket*. Elbilen i Sverige. <https://elbilenn.se/artiklar/darfor-drojer-elektrifieringen-av-jordbruket/> [2022-05-23]
- Jonson, U. (2021). *Växthusgasutsläpp*. Energimyndigheten. <https://www.energimyndigheten.se/fornybart/hallbarhetskriterier/drivmedelslagen/vaxthusgasutslapp/> [2022-05-19]
- Kragge, E. (2022). *[V1] - Vätgasproduktion idag och framtida möjligheter*. Sveriges Lantbruksuniversitet. Civilingenjörsprogrammet inom energisystem.
- Larsson, J. (2022). *[V2] - Vattenelektrolys*. Sveriges Lantbruksuniversitet. Civilingenjörsprogrammet inom energisystem.
- Liljeroth, S. & Norle, S. (2022a). *[S2] - Solcellers omgivningsberoende*. Sveriges Lantbruksuniversitet. Civilingenjörsprogrammet inom energisystem.
- Liljeroth, S. & Norle, S. (2022b). *[S3] - Modelleringsmetoder för solinstrålning*. Sveriges Lantbruksuniversitet. Civilingenjörsprogrammet inom energisystem.
- Naturvårdsverket (u.å.a). *Arbetsmaskiner, utsläpp av växthusgaser*. <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-utslapp-fran-arbetsmaskiner/> [2022-05-11]
- Naturvårdsverket (u.å.b). *Jordbruk, utsläpp av växthusgaser*. <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-utslapp-fran-jordbruk/> [2022-05-11]
- Naturvårdsverket (u.å.c). *Sveriges klimatmål och klimatpolitiska ramverk*. <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomställningen/sveriges-klimatarbete/sveriges-klimatmål-och-klimatpolitiska-ramverk/> [2022-05-11]
- Nyström, T. (2022). *[F1] - Bränsleceller*. Sveriges Lantbruksuniversitet. Civilingenjörsprogrammet inom energisystem.
- Nyström, T. & Ullén, M. (2022). *[F3] - Modelleringsmetoder för Traktor*. Sveriges Lantbruksuniversitet. Civilingenjörsprogrammet inom energisystem.
- Svea Solar (u.å). *SOLCELLSGUIDE: PRIS Vad kostar solceller?* <https://sveasolar.com/se/solceller/kostnad-och-bidrag/> [2022-05-23]
- Thunberg, C. (2022). *[V3] - Lagringsmetoder och komprimering*. Sveriges Lantbruksuniversitet. Civilingenjörsprogrammet inom energisystem.
- Ullén, M. (2022). *[F2] - Vätgastraktorer - Potential och förutsättningar*. Sveriges Lantbruksuniversitet. Civilingenjörsprogrammet inom energisystem.



Sveriges Lantbruksuniversitet  
Institutionen för energi och teknik  
Box 7032  
750 07 UPPSALA  
[www.slu.se/institutioner/energi-teknik](http://www.slu.se/institutioner/energi-teknik)

Swedish University of Agricultural Sciences  
Department of Energy and Technology  
P. O. Box 7032  
SE-750 07 UPPSALA  
SWEDEN  
[www.slu.se/en/departments/energy-technology/](http://www.slu.se/en/departments/energy-technology/)