



**CHALMERS**

# **Affärspotentialen för energilager samt hur återanvändning av befintliga batterier kan generera intäkter**

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Ekonomi och  
produktionsteknik

HUGO BOCCARA  
OTTO RUTHAGEN FRANZÉN

**INSTITUTIONEN FÖR TEKNIKENS EKONOMI OCH ORGANISATION  
AVDELNINGEN FÖR ENTREPRENEURSHIP & STRATEGY**

---

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, 2022  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)  
Rapportnummer E2022:085



Rapportnummer E2022:085

Affärspotentialen för energilager samt hur  
återanvändning av befintliga batterier kan generera  
intäkter

HUGO BOCCARA  
OTTO RUTHAGEN FRANZÉN

TEKNIKENS EKONOMI OCH ORGANISATION  
Avdelning för Entrepreneurship and Strategy  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2022

Affärspotentialen för energilager samt hur återanvändning av befintliga batterier kan generera intäkter

HUGO BOCCARA

OTTO RUTHAGEN FRANZÉN

© HUGO BOCCARA, 2022

© OTTO RUTHAGEN FRANZÉN, 2022

Rapportnummer E2022:085  
Teknikens ekonomi och organisation  
Chalmers tekniska högskola  
412 96 Göteborg  
Sverige  
Telefon + 46 (0)31-772 1000

Göteborg, Sverige 2022

## **Förord**

Detta examensarbete har utförts under vårterminen 2022 av två studenter som studerar Ekonomi och Produktionsteknik på Chalmers tekniska högskola. Examensarbetet har haft ett omfång på 15 högskolepoäng per student och har genomförts på uppdrag av AFRY. Det ämnar analysera och redogöra tillförlitligheten hos en programvara som simulerar batteridrivna energilager samt hur den kan användas för att erhålla en lönsam och hållbar konstruktion

Vi vill börja med att tacka de anställda på AFRY och framför allt Johan Andinsson, Nadina Husidic och vår handledare Carl Henriksson för all hjälp, goda råd och för att ha visat stort intresse och engagemang.

Vi vill också rikta ett stort tack till Isak Åslund för hjälp och tips inom batteriteknik samt ett tack till LMK för deras stöd.

Självfallet vill vi också tacka vår handledare på Chalmers, Gunnar Wramsby, för den ovärderliga vägledning vi har fått under studiens gång. Med sin erfarenhet och kunskap har han hjälpt oss på rätt väg vid motgångar och gett svar på alla våra frågor. Han har givit oss konstruktiv kritik och visat på stort intresse vilket har underlättat processen.



Göteborg, Sverige 2022

Affärspotentialen för energilager samt hur återanvändning av befintliga batterier kan generera intäkter

HUGO BOCCARA

OTTO RUTHAGEN FRANZÉN

Institutionen för Teknikens ekonomi och organisation

Chalmers tekniska högskola

## SAMMANFATTNING

Denna studie undersöker hur användningen av simuleringsprogramvara kan utvärdera lönsamheten hos batteridrivna energilager (BESS) som använder nya eller återanvända batterier. Extra vikt ligger på hållbarhetsaspekter av energilager som använder batterier samt tillförlitligheten hos simuleringsprogram som verktyg för beslutsfattande. Studien kunde inte verifiera att programvaran SimSES är en tillräckligt bra modell av verkliga förutsättningar för att användas som ett primärt verktyg för att konstruera ett lönsamt system. SimSES kan dock användas i tidiga skeden av planeringen för att göra grova beräkningar i intäcksströmmar. Resultaten av studien inkluderar också användningen av återanvända batterier i BESS att vara ett bra sätt att förlänga ett batteris livscykel.

Nyckelord: BESS, Battery energy storage system, energilager, simulering, hållbarhet

## ABSTRACT

This study examines how the use of simulation software can evaluate the profitability of battery energy storage systems (BESS) using first or second life batteries. Extra emphasis lies on sustainability aspects of energy storages using batteries and the reliability of simulation software as tools for decision making. The study could not verify the software SimSES to be a good enough model of real-life prerequisites to be used as a primary tool for constructing a profitable BESS. SimSES can however be used in early stages of planning to make rough calculations in streams of revenue. Findings of the study also includes the use of second life batteries in BESS to be a good way to prolong a battery's life cycle.

Keywords: BESS, Battery energy storage system, energy storage, simulation, sustainability



## Innehållsförteckning

<b>Ordlista/Beteckningar .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Inledning .....</b>	<b>2</b>
1.1 Bakgrund .....	2
1.2 Problem .....	4
1.3 Frågeställningar.....	7
1.4 Syfte .....	7
1.5 Avgränsningar .....	7
<b>2. Metod .....</b>	<b>8</b>
2.1 Forskningsstrategi & ansats .....	8
2.2 Litteraturstudie .....	9
2.3 Datainsamling .....	9
2.3.1 Tidigare forskning .....	9
2.3.2 Dokumentstudier.....	9
2.3.3 Intervjuer .....	10
2.4 Analys av datainsamling .....	10
2.5 Simulering.....	11
2.5.1 Val av simuleringsprogramvara .....	11
2.5.2 Förkunskapskrav .....	11
2.5.3 Parametrar och variabler.....	12
<b>3. Teoretisk referensram &amp; tidigare forskning .....</b>	<b>14</b>
3.1 Hållbar utveckling.....	14
3.2 Energilagring .....	15
3.3 Batteriteknik .....	15
3.4 Simulering av energilagrar .....	17
3.5 Ekonomisk analys .....	19
3.5.1 Kalkylering .....	19
3.5.2 Investeringskalkylering .....	19
3.5.3 SimSES investeringskalkyl .....	20
3.6 Tidigare forskning.....	20
3.6.1 Lokal energilagring.....	21
3.6.2 Att hantera variationer i energiförsörjning från vind och solkraft.....	23
3.6.3 Batterier och energilagrar från ett hållbart perspektiv .....	24
<b>4 Tillvägagångssätt vid simulering .....</b>	<b>30</b>
4.1 Tillvägagångssätt 2LB.....	30
4.2 Tillvägagångssätt minsta lönsamma grundinvestering .....	31
4.3 Tillvägagångssätt högsta ekonomiska nytta.....	32

4.4 Återskapande av tidigare installationer .....	33
<b>5. Resultat .....</b>	<b>36</b>
5.1 Intervjuer .....	36
5.1.1 Expert-intervju med ett elbolag på västkusten .....	36
5.1.2 Expert-intervju med ett företag inom energilagring .....	36
5.1.3 Expert-intervju med ett företag inom Virtual Power Plant (VPP) .....	37
5.2 Simulering .....	37
5.2.1 Återskapande av resultat .....	38
5.2.2 Högsta ekonomiska nytta .....	42
5.2.3 Minsta möjliga lönsamma grundinvestering .....	43
5.2.4 BESS med återanvända batterier .....	44
5.2.5 Sammanställning och jämförelse av resultat från simulering .....	45
<b>6 Analys &amp; diskussion .....</b>	<b>46</b>
6.1 BESS som en lönsam investering .....	46
6.2 BESS som ett hållbart alternativ .....	46
6.3 Simuleringsverktyg .....	47
<b>7 Slutsats &amp; förslag till fortsatt forskning .....</b>	<b>49</b>
7.1 Slutsats .....	49
7.2 Förslag till fortsatt forskning .....	49
<b>Referenser .....</b>	<b>50</b>
<b>Figurförteckning .....</b>	<b>53</b>

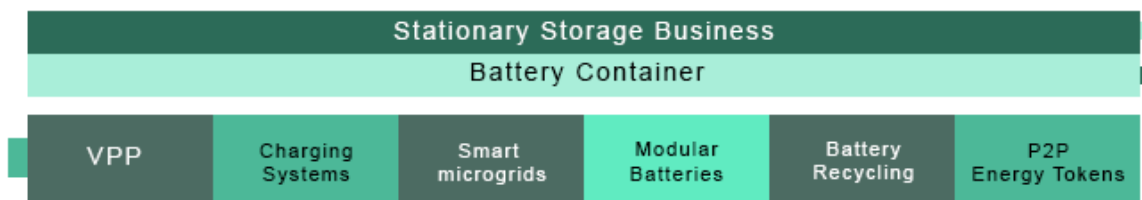
## Ordlista/Beteckningar

1LB	–	First Life Battery
2LB	–	Second Life Battery
AC	–	Alternating current
BESS	–	Battery Energy Storage System
BMS	–	Battery Management System
CAES	–	Compressed Air Energy Storage
CO <sub>2</sub> -eq	–	Koldioxidekvivalenter
DC	–	Direct current
DOD	–	Depth of Discharge
DR	–	Demand Response
EMS	–	Energy Management system
ESS	–	Energy Storage System
FCR	–	Frequency Containment Reserve
G	–	Grundinvestering
IDM	–	Intraday Market
LCOS	–	Levelized Cost of Storage
SOC	–	State of Charge
SOH	–	State of Health
V2G	–	Vehicle to grid
VPP	–	Virtual Power Plant

# 1. Inledning

I samarbete med AFRY AB har författarna tagit reda på affärspotentialen hos energilager genom batteridrift. Dessa energilager simuleras för att ta reda på vilka aspekter som är viktigast vid konstruktion av ett energilager. Energilagring förutspås i framtiden utgöra en viktig roll för den gröna omställningen och möjlighet att lagra förnybar energi. Rapporten undersöker också ytligt möjligheten att generera intäkter från batterierna efter att dessa använts i fordon och inte längre är dugliga för detta ändamål.

Rapportens författare kommer att arbeta vidare vid sidan av ett större projekt som berör intäktsgenerering av energi gällande ett företag inom transportsektorn. Projektet innehåller dels energilager som är rapportens primära fokusområde, dels batteriåtervinning, virtual power plant, laddning, modulära batterier och P2P energi-tokens. Eftersom dessa områden länkas samman av varandra är det oundvikligt att beröra samtliga delar på ytan. Hur dessa olika områden hänger ihop visualiseras av Figur 1 där energilager är det övergripande temat.



Figur 1 – Visualisering av projektets huvudområden samt delområden

(data hämtad från AFRY, 2022)

## 1.1 Bakgrund

Idag investeras betydliga resurser i elnätet och i lösningar för att kunna utnyttja den fulla kapaciteten samt för att jämna ut fluktuationer som kan uppstå i produktion. I artikeln ”*Här gör batteriet nytta på flera olika sätt*” (Nohrstedt, 2022) presenteras ett pilotprojekt av Vattenfall som görs på en av Bolidens återvinningsanläggningar i Skåne. I anläggningen utvinns det metaller från äldre bilbatterier för att kunna återanvändas. Mestadels drivs verksamheten av olika bränsletyper som koks eller naturgas, men många maskiner och transportband drivs av el. I projektet har det installerats ett energilager i form av ett storskaligt batteri på 480kW/1MWh vars uppgift är att kapa effekttoppar, minska antalet flaskhalsar i elnätet, samt att reglera frekvensen i det nationella stamnätet. Funktionen i att kombinera dessa användningsområden samt lönsamheten i att investera i den här formen av energilager har tidigare inte varit uppenbar.

Batteriet har varit i drift i två år och har använts flitigt i att kombinera olika tjänster och nyttor parallellt (Nohrstedt, 2022). För att kunna göra verklig nytta har batteriet jobbat med att kapa effekttoppar och att köpa el när priset är lågt vilket har krävt ett avancerat styrsystem och noggranna prognoser över fabriken normala förbrukning.

Nohrstedt (2022) nämner att batteriet också har varit en del av Skånes effektmarknad Switch som har i uppgift att minimera problem och flaskhalsar i elnätet. Det är en marknad som fungerar genom att nätägare betalar antingen kunder att minska sin elanvändning eller elproducenter att producera mer. För Bolidens batteri innebär det att en kund lägger ett bud som nätägaren kan acceptera och då görs ett avrop via Switch och el matas ut från batteriet. Främst är det dock frekvensreglering som Bolidens batteri har stått för och det har gett störst nytta ekonomiskt sett. Vid frekvensreglering justerar batteriet stamnätets frekvens till 50 hertz om frekvensen antingen är för hög och effekt tankas ur eller om den är för låg och effekt tillförs.

Gällande exakt hur lönsamt projektet har varit kan inte Vattenfall svara på än då projektet fortlöper fram till sommaren 2022 (Nohrstedt, 2022). De poängterar dock att batteriet har varit lönsamt, åtminstone i slutet av 2021 då tjänsten för frekvensreglering påbörjades.

Vattenfall är självfallet inte ensamma om att investera i energilagring då exempelvis andra stora företag som Tesla har gett sig in på marknaden. Tesla har lanserat olika tjänster för privata hushåll som Powerwall och Powerpack samt anlagt större batteriparker, exempelvis i Hornsdale Power Reserve i Australien som skildras en dokumentär av CNBC (2021). Tesla förutspår att Tesla Energy långsiktigt kommer bli lika stort som Tesla Automotive då energiindustrin kollektivt är större än bilindustrin. Marknaden förväntas vara värd 15 miljarder dollar år 2027 med ett värde av 3,1 miljarder 2021.

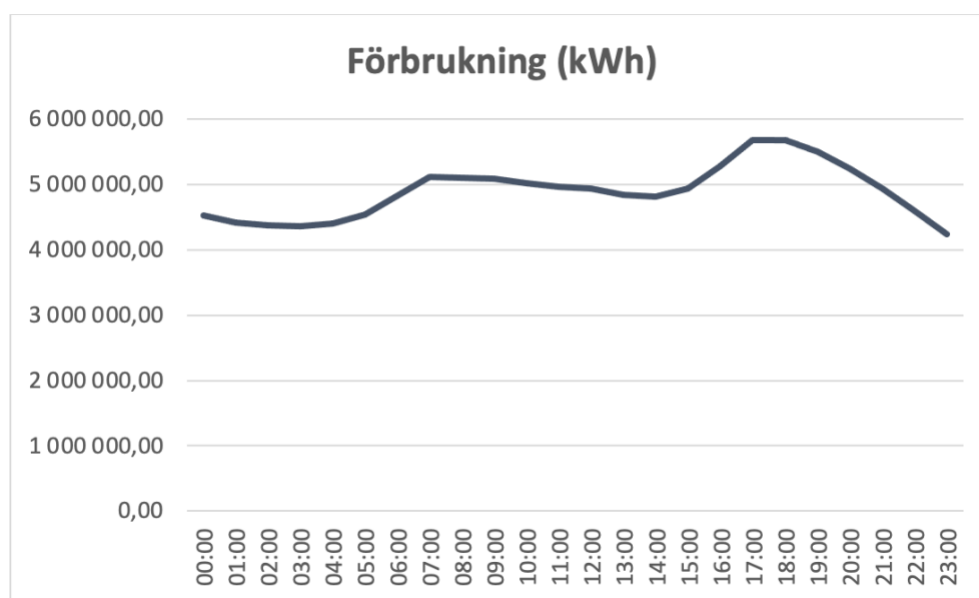
Teslas batteripark i Australien har efter två år i drift enligt studier visat sig pålitlig och lönsam (CNBC, 2021). Detta efter att den genererat intäkter själv samt sparat pengar i och med att frekvenskontrollen blev billigare. För Tesla är det dock ännu oklart om hur lönsamt deras energisatsningar är då årsrapporten inte visat på några positiva resultat. Batterier är dessutom kostsamma och kräver mycket resurser och frågan är om det finns tillgång nog för att täcka efterfrågan.

Världen går mot att kräva alltmer energi då exempelvis transporter blir mer och mer elektriskt drivna. I dokumentären av CNBC (2021) tar de upp att i flera delar av världen ges mandat att ha en viss mängd energilagring tillgängligt per enhet förnybar energi. Prognoser och planer visar på att förväntningarna är att det kommer finnas tiotusentals Megawatt av nya energilagring bara i Kalifornien och USA:s president Joe Bidens nya infrastrukturplan ämnar göra landets energi helt kolfri till år 2035.

Det är tydligt att satsningen på elektrisk drift och energilagring i form av batterier blir alltmer aktuell ju mer tid som går. Det genomförs mer forskning på området och det ställs högre krav på företag både från konsumenten och genom mandat från politiker och det återstår att se vilken betydelse energilagring kommer ha i framtiden.

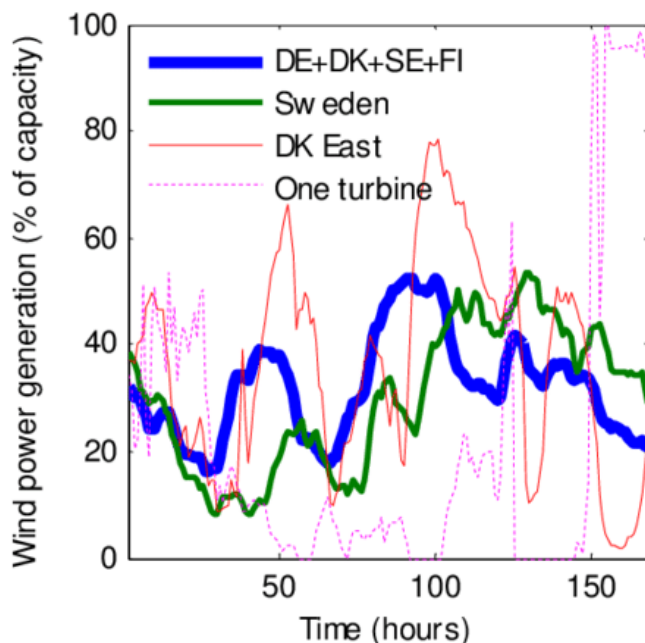
## 1.2 Problem

Det råder bred enighet i att framtidens samhälle kommer att kräva betydligt mer elektricitet än idag. I en tid när efterfrågan av grön energi genom vindkraft, sol och vatten är hög och utbyggnaden är i full gång krävs nya metoder för att lagra denna energi. Energibehovet i samhället varierar under dygnet (se Figur 2) och för att energin skall finnas när många efterfrågar el samtidigt krävs det att produktionen av elektricitet möter efterfrågan. Att snabbt svara på denna efterfrågan kallas DR (Demand Response), något som Kirkerud et al. (2021) anser vara nyckeln till ett framtida elnät med helt förnyelsebar produktion.



Figur 2 – Elförbrukning under ett dygn (data hämtad från Svenska kraftnät, 2022)

I framtiden spås vindkraft och solenergi utgöra en stor del av Sveriges energimix. Vind och sol har under de senaste trettio åren vuxit avsevärt och bidrar nu med 28,5 TWh årligen. 1994 var denna siffra 0,1 TWh (Holmström, 2021). Problemet med dessa förnybara källor är att energiproduktionen inte är lika anpassningsbar som till exempel kärnkraft eller vattenkraft. Produktionen av vindkraft kan variera mycket under en vecka, se Figur 3.



Figur 3 – Variation i produktionskapacitet för vindkraft (Kiviluoma, 2013)

Under ett dygn i Sverige produceras och konsumeras ungefär 78 GWh elektricitet av vind och solkraft (SCB, 2020). Om framtidens energimix förlitar sig mer på förnyelsebar elektricitet och ett scenario uppstår då varken vinden blåser eller solen lyser måste denna energi antingen importeras eller komma från energilagring. Om denna energilagring skulle ske med system drivna genom batterier bör den aggregerade kapaciteten från energilagren motsvara 78 GWh. Detta skulle motsvara 78 000 av Bolidens energilager som för närvarande har en kapacitet på 1MWh styck.

I dagsläget finns en högst begränsad möjlighet att lagra energi som vind och sol producerar under gynnsamma förhållanden och mycket energi riskerar att gå till spillo. Under lång tid har forskare och intressenter i elmarknaden försökt att lösa detta problem genom olika sätt att lagra denna energi. I takt med att batterier blir både billigare och den tekniska utvecklingen går framåt undersöks möjligheten att lagra grön energi i stora energilager av batterier (Buchmann, 2011). Dessa batterier har dock en begränsad livslängd som i första hand avgörs av dess kapacitet över tid som i sin tur avgörs av hur batterierna används. Efter att kapaciteten sjunker under en viss nivå är de inte längre dugliga för bruk som energikälla och måste tas ur bruk och återvinnas för att sedan ersättas av ett nytt batteri. *Hur lönsamma kan energilager bestående av nya eller återanvända batterier vara?*

Batterier är kostsamma att producera då de innehåller många sällsynta jordartsmetaller och andra sällsynta mineraler. Trots att priserna på kobolt och litium ökat med över 300% under 2017 till 2019 har priserna på batterier minskat (Dehghani-Sanij et al., 2019). För ett hållbart samhälle strävar vi efter att bruka mindre resurser och att förlänga livslängden på de resurser vi redan brukar. Det gäller därför att konstruera ett så hållbart energilager som möjligt och då krävs optimering på olika variabler, främst för ekonomisk hållbarhet men också ekologisk och social. *Vilka hållbarhetsaspekter kan då tillfredsställas av användningen av energilager?*

Simuleringsprogramvara har i tidigare studier använts för att simulera nyttan med batterilager och kunnat påvisa flera intäktsgenererande användningsområden. Wrålsen & Faessler (2022) studerade genom simulering hur ett energilager tillsammans med solceller påverkar investeringens återbetalningstid. Kucevic et al. (2020) kunde i sin studie bland annat påvisa att energilager kunde kapa energitoppar och stabilisera frekvensvariation i elnätet. Efter denna studie har Kucevics simuleringsprogramvara utvecklats och är nu tillräckligt avancerad för att simulera många olika typer av användningar av energilager. Denna typ av simulering skulle kunna användas vid konstruktion av ett energilager för att bestämma hur olika parametrar skall viktas för att tillföra maximal nytta. De huvudsakliga parametrarna som då är viktiga att utvärdera är kapacitet (MWh), effekt (MW) och lagringskostnaden. Detta kommer att utmynna i ett optimeringsproblem och simuleringsprogramvaran blir ett viktigt verktyg för att lösa problemet. *Hur kan simuleringsprogramvara användas för batteridrivna energilager för att utvärdera en konstruktion med maximal ekonomisk nytta? Hur tillförlitlig är simuleringen för batteridrivna energilager och vad ökar tillförlitligheten?*

### 1.3 Frågeställningar

- Hur lönsamma kan energilager bestående av nya eller återanvända batterier vara?
- Vilka hållbarhetsaspekter kan tillfredsställas av användningen av energilager?
- Hur kan simuleringsprogramvara användas för batteridrivna energilager för att utvärdera en konstruktion med maximal ekonomisk nytta?
- Hur tillförlitlig är simuleringen för batteridrivna energilager och vad ökar tillförlitligheten?

### 1.4 Syfte

Att analysera samt simulera batteridrivna energilager med avseende på ekonomisk lönsamhet och hållbarhet där simuleringens tillförlitlighet står i fokus.

### 1.5 Avgränsningar

Rapporten kommer inte att gå på djupet gällande den tekniska aspekten kring batterier eller elektroniken inuti systemet.

Projektet kommer i största möjliga mån vara en övergripande undersökning kring energilager som använder batterier av litium-jon typ och dess affärspotential som ett hållbart alternativ. Detta innebär att studien enbart studerar energilager som använder batterier som huvudsaklig energilagrande källa. Rapporten studerar inte heller energin som lagras i batterierna på djupet.

Rapporten studerar enbart energilager som i tidigare forskning kunnat påvisa affärspotential.

Finansiella siffror är antingen uppskattningar genom liknande projekt eller data given av kund. Detta innebär att kalkyler och beräkningar är grova uppskattningar och detta skall tas hänsyn till vid beslutsfattande.

## 2. Metod

I följande kapitel av rapporten redogörs tillvägagångssättet och metoden som har använts i studien. Syftet bakom tillvägagångssättet, vald metod och varför de har varit viktiga för att besvara frågeställningarna redovisas. För att på ett tillförlitligt sätt kunna svara på frågeställningarna krävs en metod och tillvägagångssätt med vetenskaplig grund.

### 2.1 Forskningsstrategi & ansats

Bryman och Bell (2011) beskriver två olika typer av forskningsstrategier vilka är kvantitativ forskning och kvalitativ forskning som är användbara verktyg i att klassificera olika metoder inom forskning. Kvantitativ forskning avser en metod med statistisk bearbetning, mätningar och numerisk data som analysenhet medan kvalitativ forskning avser en metod med text, koncept samt sociala sammanhang som analysenhet.

Vanliga metoder för kvantitativ forskning är experiment, enkäter med slutna frågor eller simuleringar. Bryman och Bell (2011) presenterar att kvantitativ forskning har ett deduktivt förhållningssätt där betoningen läggs på att teorier prövas. En deduktiv ansats innebär således att en hypotes formuleras som sedan granskas experimentellt. I studien tillämpades främst en kvantitativ metod i form av simuleringar av batteridrivna energilager för att sammanställa ett resultat och besvara våra frågeställningar.

För kvalitativ forskning däremot är metoder i form av exempelvis intervjuer med öppna frågor samt litteraturstudier mer aktuella (Bryman & Bell, 2011). Kvalitativ forskning har till skillnad från kvantitativ ett mer induktivt förhållningssätt där betoningen läggs på generering av teorier. En induktiv ansats innebär således att hypotesen uppstår av forskning och granskning. Studien tillämpade en kvalitativ metod då tidigare forskning har analyserats samt dokumentstudier och litteraturstudier utfördes. Utöver dessa metoder var även intervjuer relevanta för den kvalitativa forskningen, som i det här fallet varit i form av sekundära källor i stället för intervjuer som författarna själva utförde.

Vad som tydliggörs av Bryman och Bell (2011) är att metoderna för forskning är mer nyanserade i verkligheten än vad som antyds i teorin. De nämner hur dessa strategier och ansatser ska ses på mer som tendenser än bestämmelser och att studier som främst använder sig av en strategi eller ansats kan visa på karaktärsdrag från den andra. Dessutom tar de upp hur de båda kan kombineras, vilket görs i denna studie, där exempelvis en kombination av deduktiv och induktiv ansats kallas för abduktiv ansats.

## 2.2 Litteraturstudie

Inledningsvis genomfördes en litteraturstudie för att erhålla relevant fakta om ämnesområdet vilket i det här fallet var batterier, energilagring, hållbar utveckling och ekonomi. Enligt Bryman och Bell (2015) är en litteraturstudie en viktig del i forskning och ämnar ge rapporten en högre trovärdighet genom att sammanlänka fynd, frågeställningar och diskussioner med redan existerande litteratur.

Litteraturstudien har genomförts med hjälp av Chalmers biblioteks databas samt Google Scholar för att söka efter böcker och vetenskapliga artiklar samt relevanta läroböcker. Lämplig kurslitteratur från tidigare lästa kurser samt rapporter erhållna från AFRY har också använts för att ytterligare stödja rapporten. Sökord och termer relevanta för studien var; "battery", "energy storage", "BESS", "sustainability", "environmental impact", "electricity demand", "grid".

## 2.3 Datainsamling

I den här delen behandlas de tillvägagångssätt för insamling av information under rapportens gång vilket främst har inkluderat vetenskapliga artiklar, dokumentstudier och intervjuer.

### 2.3.1 Tidigare forskning

Bryman och Bell (2011) nämner att det finns flertalet fördelar med att använda sig av andra forskares data. De tar upp hur data som används i studien kan samlas in från exempelvis andra forskare, företag eller organisationer. Sekundär data som denna är gynnsam i och med att den ger möjligheten att erhålla data av god kvalitet för endast en liten del av den tid och resurser som krävs för att göra en egen insamling. Dessutom menar Bryman och Bell (2011) på att denna typ av data är av hög kvalitet då det ofta kan vara större organisationer och erfarna forskare som har utfört studierna. Dessa organisationer har procedurer för att både försäkra om kvaliteten samt att minimera de risker för problem som kan uppstå som exempelvis uteblivna svar. De har säkerligen också mer tillförlitliga resultat då dessa studier kan ha ett större omfång än exempelvis vad författarna själva kan åstadkomma. I studien var tidigare forskning en stor del av datainsamlingen. Studien tog del av andra projekt som har implementerat BESS för att försöka återskapa deras resultat.

### 2.3.2 Dokumentstudier

Dokumentstudier inkluderar studier av dokument tillgängliga via AFRY gällande AFRY och projektet i helhet. Dokumenten som togs del av innefattade exempelvis introduktion till området, relevanta data för projektet gentemot kunden, intressentundersökningar och liknande information för att kunna fördjupa författarna i projektet och inom företagets verksamhet. Således är även

denna information sekundär data som användes i studien. Författarna hade åtkomst till flertalet olika dokument relevanta för projektet via en webbportal som kunden till AFRY har utvecklat.

### 2.3.3 Intervjuer

Intervjuer är en av de främst använda metoderna i kvalitativ forskning enligt Bryman och Bell (2011). De nämner att flexibiliteten hos intervjuer är det som gör de så användbara, dock kan de vara synnerligen tids- och resurskrävande. I studien användes intervjuer i form av referat genomförda av AFRY som sedan citerades och tolkades. Dessa intervjuer var således sekundära källor då de inte var utförda av författarna själva som tidigare nämnt och fanns tillgängliga via tidigare nämnda webbportal. Detta innebär att både fördelarna och nackdelarna med intervjuerna i det här fallet skiljer sig från vad Bryman och Bell tar upp.

Intervjuerna var semi-strukturerade intervjuer då AFRY har följt en mall i hur de ska utföras med tämligen specifika frågor och ämnesområden, men fortfarande med viss flexibilitet (Bryman & Bell, 2011). Intervjuerna var med relevanta parter berörda inom det större projekt som AFRY jobbar mot som exempelvis elbolag och slutkund. Syftet bakom intervjuerna för AFRY var marknadsundersökning samt viss konkurrensanalys. Dessa intervjuer användes av författarna för att få en helhetsbild av ämnesområdet samt för att få reda på bakgrunden till det växande intresset och utmaningarna samt kraven som finns. Dessutom erhöles relevant data till simuleringarna från intervjuerna.

## 2.4 Analys av datainsamling

Datainsamlingen i studien bestod främst av tidigare forskning vilket var fördelaktigt i att det fanns mycket forskning på området som var tillförlitlig samt av god kvalitet. Detta gynnade författarna då denna typ av forskning skulle ha varit besvärlig, resurskrävande och i vissa fall ogenomförbar för författarna själva vilket är något Bryman och Bell (2011) tar upp. En svårighet som uppkom var att erhålla tillräckligt med data relevanta för att kunna säkerställa kontrollmätningar och därmed en tillförlitlig simulering vilket diskuteras mer i analysdelen av rapporten.

Dokumenterna som togs del av i studien användes främst för att inledningsvis skapa en grundläggande förståelse för författarna inom området samt förklara projektet och dess olika beståndsdelar hos AFRY. Således hade de inte någon större inverkan på själva resultatet i studien. Portalen som användes för alla relevanta dokument inom projektet var relativt besvärlig att navigera i för författarna och att hitta vad som var relevant för just studien var således varit tidskrävande.

Intervjuerna som användes i studien gynnade författarna då de inte var speciellt tids- eller resurskrävande eftersom AFRY utförde dem. Nackdelar i intervjuer som sekundärkällor är att de exempelvis kan vara mer partiska då AFRY har sitt eget syfte med dessa och vill göra slutkund

nöjd. Dessutom hade författarna inte möjlighet att ställa de frågor som just de vill ha svar på. Utöver detta komplicerades även situationsanpassade aspekter som exempelvis flexibilitet hos intervjuarna och att icke-verbalt beteende hos respondenten som ansiktsuttryck eller tonläge på röst mm inte kunde avläsas.

Något som blev tydligt under studiens gång var vikten av att sätta sig in i programvaran tidigt i processen. Enligt Bryman och Bell (2011) kan detta underlätta vid svårigheter med datainsamlingen redan från början och se till att rätt data samlas in.

## 2.5 Simulering

I studien var den främsta metoden av forskning som genomfördes i form av simulering vilket som tidigare nämnt är en kvantitativ metod som är uppbyggd på ett strukturerat och sekventiellt sätt med rena data som analysobjekt. Således blir resultatet att hypotesen eller teorin i studien antingen accepteras eller avslås (Bryman & Bell, 2011). Det läggs stor vikt på tillförlitlighet och validitet i en metod som denna och replikering av tidigare resultat under samma förhållanden används för att säkerställa detta (Eldabi et al., 2002). Det uppstår en del kritik mot att denna typ av studie enbart skulle vara för verifikation i stället för nya upptäckter, men vad som är viktigt att ta upp är hur det främjar objektiv analys, förståelse och testar hypoteser.

### 2.5.1 Val av simuleringsprogramvara

Programvaran SimSES blev tilldelad till studiens författare från företaget AFRY efter att ett intresse av hur programvaran kunde användas funnits hos AFRY. Valet av programvara gjordes således inte av författarna utan av AFRY. Under studiens gång uppkom andra programvaror för att simulera energilager både i tidigare forskning och under personlig kommunikation med medarbetare på AFRY. Studiens författare övervägde de alternativa programvarorna men vid närmare efterforskning bestämdes att hålla fast vid den tilldelade programvaran SimSES. De alternativa programvarorna sållades bort antingen på grund av bristande tillförlitlighet eller för att de ansågs vara mindre lämpade för studiens syfte.

### 2.5.2 Förkunskapskrav

För att kunna använda ett simuleringsprogram krävs en viss teknisk kompetens. Vissa programvaror har ett grafiskt gränssnitt och kräver ingen eller liten kunskap inom programmering. I denna studie används som bekant SimSES, ett program utvecklat i MATLAB och sedan konverterat till Python. Detta medför att programmet inte har något användarvänligt gränssnitt utan att allt sköts direkt genom att köra kod. Först när resultatet av simuleringen är klart visas detta i användarens webbläsare genom grafer och tabeller.

Eftersom denne studies författare inte utvecklat programvaran SimSES krävdes en del tid för att installera och konfigurera programvaran korrekt. Nämnvärt är att författarna besitter en

grundläggande kunskap i språket Python och inte den avancerade nivå som skulle krävas för att själva utveckla likvärdig programvara. Att inneha en grundläggande förståelse för Python krävs för att kunna arbeta med detta verktyg. Dokumentationen för programvaran har varit något bristfällig och programmet något mer komplicerad än befarat. Detta medförde att all funktionalitet inte kunnat valideras av författarna.

### 2.5.3 Parametrar och variabler

Programvaran SimSES styrs av en mängd olika parametrar och algoritmer vilka kombineras för att forma grunden till simuleringen. Till stor del används grundläggande inställningar och data i programmet. Inom detta område räknas till exempel data från elnätet, beteende om förbrukning och färdiga algoritmer. Programmet är extensivt och har en helt öppen källkod som kan modifieras av användaren själv. I denna studie har det enbart ändrats i programmets konfigurationsfiler som styr vad programmet skall simulera och hur. Det är i dessa filer vi finner de styrande parametrarna för bland annat ekonomi, teknik och simuleringsprofiler. Nedan förklaras ett urval av de viktigaste parametrarna som ändrats under studien.

#### investment\_costs

Numerisk variabel i enhet Euro vilket används den ekonomiska analysen för att avgöra hur stor den grundläggande investeringen varit.

#### discount\_rate

Anger diskonteringsräntan varpå investeringskalkyleringen bygger på. Se punkt 3.5.2.

#### fcr\_price

Anger vilket pris som FCR-marknaden erbjuder till aktörer som säljer den frekvensreglerande tjänsten FCR (Frequency Containment Reserve). (Eur/kW)

#### idm\_price

IDM (Intraday market) talar om för programmet det genomsnittliga priset för elektricitet på elmarknaden där elektricitet både kan köpas och säljas (*Intraday Trading*, n.d).

#### Start & end

Anger start och sluttid för simuleringen. Format: 2014-01-01 00:00:00

#### time\_step

Anger med vilken noggrannhet simuleringen körs där 1 innebär att simuleringen mäter varje sekund. När parametern är inställd på 60 simuleras med en mätpunkt en gång per minut.

#### strategy

Bestämmer vilken strategi systemet skall arbeta efter. Denna strategi är en grundläggande parameter som påverkar i vilken grad systemet använder sin kapacitet och till vad. I denna studie används enbart FCR-strategin och FCR + IDM-strategin. Enbart FCR styr programvaran till att endast sälja kraft till FCR-marknaden medan FCR + IDM också tillåter systemet att sälja kapacitet.

min\_soc, max\_soc & start\_soc

Min och max anger inom vilka intervall laddningstillståndet (SOC) får variera inom där 1 representerar 100%. Start-parametern bestämmer vilken SOC systemet skall börja simuleringen med.

power\_fcr

Anger vilken effekt i watt som kan användas till frekvensreglering.

power\_idm

Anger vilken effekt i watt som systemet maximalt kan förse Intraday-marknaden (IDM) med.

max\_power

Systemets maximala effekt i watt.

eol

Anger end of life (EOL) för batterierna och är den punkt när batterierna tas ur drift. Detta mäts i procentuell kapacitet i förhållande till när batteriet var nytt.

start\_soh

Startvärdet för state of health (SOH), anges i decimaler vilket representerar procent.

## 3. Teoretisk referensram & tidigare forskning

Detta avsnitt är uppdelat i två delar. En teoretisk referensram vilket viktig teori och definitioner behandlas och en del med resultat från tidigare forskning inom ämnesområdet.

### 3.1 Hållbar utveckling

Boken ”Hållbar utveckling – nyanser och tolkningar” Hedenus et al. (2018) kommer att användas som huvudsaklig referens för definitioner av hållbarhet och hållbar utveckling. Denna bok definierar hållbar utveckling som ”En hållbar utveckling tillfredsställer dagens behov utan att äventyra kommande generationers möjligheter att tillfredsställa sina behov”.

Hållbar utveckling bygger på tre dimensioner. Dessa är, den ekologiska, den ekonomiska och den sociala dimensionen (Hedenus et al., 2018). Den ekologiska syftar till att ”bevara naturens produktionsförmåga och att inte överskrida naturens assimilationsförmåga”. Vidare består den ekonomiska dimensionen av att effektivt och långsiktigt kunna förvalta ändliga naturresurser och mänskligt kapital. Den sociala dimensionen består av ”välfungerande horisontella relationer (socialt kapital, eller tillit) och vertikala relationer (formella institutioner)”. De tre dimensionerna hänger ihop men kopplingen är inte alltid tydlig. Dimensionerna kan även kollidera med varandra när till exempel en ekologisk nytta står mot en ekonomiskt. Eftersom koppling finns mellan de olika dimensionerna gäller det här att värdera utfallet och sambandet i enskilda fall så att en balans kan skapas.

Hedenus et al. (2018) skriver att ”Svag hållbarhet definieras som att summan av naturligt kapital inte får minska över tid, medan stark hållbarhet definieras som att varken naturligt eller mänskligt skapat kapital får minska över tid”. Naturligt kapital anses vara resurser från naturen som till exempel olja, gas eller trä. Mänskligt skapat kapital är i stället ting som vi själva producerat, maskiner, infrastruktur eller kunskap. Genom teknikutveckling och människors preferenser kan mänskligt och naturligt skapat kapital substitueras över tid. Möjligheten att substituera beror till stor del på hur mycket naturligt kapital som kan ersättas med mänskligt kapital och synen på detta.

De globala målen är mål uppsatta av FN för att vägleda det globala hållbarhetsarbetet (FN, 2021). Dessa är de mer detaljerade beståndsdelarna i en bredare agenda som kallas för ”Agenda 2030” som visar framtidssyn. För att praktiskt arbeta mot dessa mål krävs att olika aktörer arbetar på olika nivåer i samhället. Att arbeta mot hållbar utveckling kräver ofta kompromisser mellan olika aktörer i samhället.

I september 2015 antog de 193 medlemsländerna inom FN Agenda 2030 vilken ämnar uppnå 17 globala mål (se Figur 4) inom hållbar utveckling innan år 2030 (FN, 2021). Det är ett ambitiöst åtagande med 169 delmål som behandlar hållbarhet i tre dimensioner vilka är social, ekonomisk

och miljömässig. Huvudfokus med Agenda 2030 är att avskaffa extrem fattigdom, att minska ojämlikheter och orättvisor i världen, att främja fred och rättvisa samt att lösa klimatkrisen.



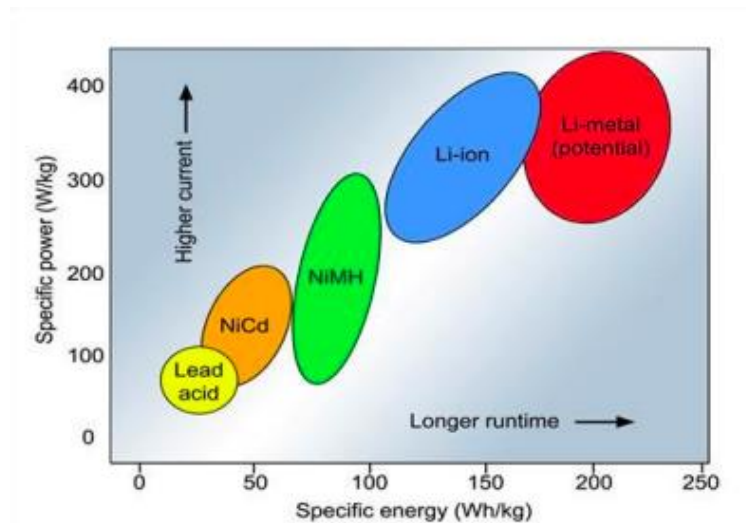
Figur 4 – Förenta nationernas globala hållbarhetsmål 2030 (FN, 2021)

### 3.2 Energilagring

Buchmann (2011) skriver att dagens förnybara energikällor som vind och solkraft använder energilagring för att lagra extra energi och tillsätta elnätet när behov uppstår. Detta uppkom som en lösning på problemet att vind och solkraft genererar elektricitet oberoende av efterfrågan. Stora batterianläggningar kan när kapaciteten i elnätet inte räcker till att fungera som en buffert. Detta är en relativt ny teknik som utforskas kontinuerligt. En annan typ av energilagring som använts mycket är att vattenkraften pumpar tillbaka vattnet upp i dammen för att använda när efterfrågan är större. Detta kan idag åstadkommas med en effektivitet på 70–80%. Hidalgo-León (2017) bekräftar att tidigare forskning kunnat påvisa ESS (Energy Storage System) vara en lämplig teknik för att hantera variation i elektrisk produktion.

### 3.3 Batteriteknik

I boken av Buchmann (2011) beskrivs den generella tekniken bakom dagens moderna batterier. År 1859 skapade den franska fysikern Gaston Planté det första återuppladdningsbara batteriet. Detta var ett viktigt steg mot dagens moderna batterier som idag förutsätts gå att ladda upp många gånger. Batterier består av en anod och en katod. År 1991 kommersialiserade Sony det första litiumjon-batteriet, detta batteri är idag det vanligaste i såväl småelektronik som i elbilars batterier.



Figur 5 – Densitet för maximal effekt (y-axel) och maximal kapacitet (x-axel) för olika batterityper (Buchmann, 2011)

Uppladdningsbara Li-metall-batterier introducerades på 1980-talet men återkallades kort därefter redan 1991 då stor instabilitet med batteriets anod vållade problem. Bilindustrin har visat ett stort intresse för denna typ av batterier då energi-densiteten är mycket hög, 300Wh/kg. Problemen med Li-metall-batterier var dess instabilitet i jämförelse med litium-jon som kunde användas med högre säkerhet. Trots säkerhetsbristerna med Li-metall-batterier fortsätter forskningen med att göra dessa säkrare, detta tack vare den högre energi-densiteten (se Figur 5).

Olika litiumjon-batterier kan på ytan verka snarlika varandra men skiljer sig åt mycket i prestanda och pris beroende på materialval på katoden och anoden. Vanliga material på katoden är li-koboltoxid, li-manganoxid, li-järnfosfat, li-nickelmangan kobolt och li-nickelkobolt aluminiumoxid. Buchmann (2011) berättar att Sonys första litiumjon-batteri använde koks som anod. Efter 1997 har de flesta tillverkare skiftat till grafit för att uppnå en jämnare urladdningskurva. Forskning på alternativa material för anoden pågår fortfarande med till exempel kiselbaserade legeringar. Kisel ökar den specifika energin med 20 till 30 procent i jämförelse med nuvarande teknik men med baksidorna lägre spänning och kortare livscykel. Buchmann (2011) skriver också att utvecklingen av batterikapacitet inte ökat alls lika snabbt som mikroelektroniken. Batterikapaciteten har bara ökat med 8–10% per år under de senaste årtionden.

En avgörande aspekt för hur livslängden av ett batteri påverkas är hur batteriet används. Enligt Buchmann (2011) sliter till exempel en hel cykel mer på batteriet än motsvarande urladdning av elektricitet där batteriet enbart varierar mellan 50 – 80% SOC. Buchmann menar att ju lägre DoD (Depth of Discharge) ju fler cykler lever batteriet, se Figur 6. Wrålsen & Faessler (2022) bekräftar

detta men tillägger också att kalendrisk livstid också är en faktor som påverkar livstid, än om inte lika mycket som cyklisk degradering.

Depth of discharge	Discharge cycles
100% DoD	500
50% DoD	1500
25% DoD	2500
10% DoD	4700

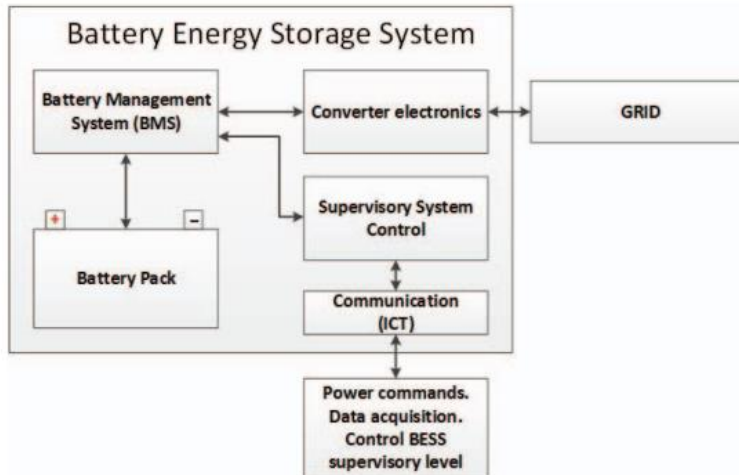
Figur 6 – Hur DoD påverkar batteriets livslängd (Buchmann, 2011)

Säkerheten kring batterier har sedan dess introduktion varit ett hett ämne. Att lagra mycket energi på ett och samma ställe inkluderar alltid risker. Buchmann (2011) skriver att sedan introduktionen av batterier har flera säkerhetsstandarder tagits fram och de flesta tillverkare följer minst en eller flera av dessa. Wrålsen & Faessler (2022) berättar att säkerhet är en avgörande aspekt för att fler branscher i framtiden skall våga använda sig av 2LB (Second Life Batteries). Wrålsen & Faessler nämner även att garantier för 2LB skulle öka viljan att använda detta alternativ men att försäljningspriset skulle stiga till följd av detta.

### 3.4 Simulering av energilager

Forskare vid Tekniska universitetet i München har under ett par års tid arbetat med att utveckla en programvara för att simulera BESS i elnätet. Simulering av energilager för att beräkna den tekno-ekonomiska nyttan har åstadkommit genom forskning och utveckling av programvaran SimSES (Naumann & Truong, 2017). Mjukvaran möjliggör en detaljerad tekno-ekonomisk utvärdering av stationära energilager med ett fokus på litium-jon batterier. Simulering kan göras med fokus på många olika implementeringar i energinätet som frekvensreglering eller kapade energitoppar. Modellen simulerar även batteriernas minskade kapacitet över tid och hur detta påverkar lönsamheten.

Naumann och Truong (2017) skriver att bakgrunden till utvecklandet av programvaran varit att det inte funnits tillräckligt med programvaror för att simulera applikationer av BESS. Författarna lyfter att tidigare programvaror inte tar hänsyn till degraderingen av batterierna, något som de själva valde att implementera i sin modell. Skaparna av SimSES har valt att försöka konstruera en modell som lägger till viktiga parametrar och användningsområden som andra program missat. Författarna poängterar också att sättet som batteriernas degraderar är en viktig parameter när man dimensionerar sitt system vilken var en av huvudanledningarna till implementationen.



Figur 7 – Schematisk modell av BESS (Hidalgo-León, 2017)

I programvaran har systemet modellerats efter tidigare energilager på marknaden. Hidalgo-León (2017) illustrerar hur dagens moderna BESS är konstruerade, se Figur 7. Programvaran SimSES återspeglar denna modell och i systemet inkluderas då batterier, kraftelektronik och kringutrustning som luftkonditionering, BMS och EMS. Systemet kontrolleras av förfrågningar från elnätets AC-sida. Denna förfrågan kontrolleras sedan av systemets begränsningar för kraftelektroniken och batteriet. Batterimodellen beräknar maximal effekt baserat på cellens operativa spänning, laddningstillstånd (SOC) och batteriets hälsotillstånd (SOH). När allt detta beräknats svarar systemet på effektförfrågan som antingen nekas eller godkänns (Naumann & Truong, 2017).

Programvarans utvecklare ägnade mycket tid åt att utveckla dataprofiler för last, så kallade lastprofiler. Grunden för simuleringens tillförlitlighet är dessa dataprofiler som skall återspegla verklig last på elnätet i största möjliga mån. Dessa lastprofiler ligger också till grund för systemets olika applikationer. Naumann och Truong (2017) poängterar att utan lämplig lastprofil blir simuleringen missvisande. I ett helt idealt fall bör ett BESS kompletteras av solceller som förser exakt lika mycket elektricitet som systemet förbrukar med den angivna lastprofilen för att uppnå maximal lönsamhet. I applikationer där systemet inte används tillsammans med solceller bör man i största möjliga mån dimensionera efter den elektriska efterfrågan.

## 3.5 Ekonomisk analys

Nedan följer teori angående ekonomisk analys. Studien berör kalkylering, investeringskalkylering och den inbyggda investeringskalkyleringen i programvaran SimSES. Definitioner och modeller som används förklaras under respektive rubrik.

### 3.5.1 Kalkylering

Andersson (2013) skriver att ”Kalkylering är processen att komma fram till en kalkyl. En produktkalkyl är en sammanställning och/eller beräkning av ett besluts positiva och negativa konsekvenser”. Förkalkylering resulterar i ett beslutsunderlag baserat på finansiella data. Ett kalkylobjekt avser själva produkten/projektet varpå beräkning baseras. Det är viktigt att avgränsa kalkylobjektet efter rådande restriktioner och faktorer som både kan och inte kan påverka beslutsunderlaget. Kalkylunderlaget skall inrymma den data som ingår i analysen. Förkalkylen skall uppmärksamma konsekvenser som ett beslut kan ge upphov till. Den viktigaste ekonomiska aspekt i en produktkalkyl är resultat men det kan också finnas icke-finansiella mått som bör tas i åtanke vid beslut.

I en kalkyl är syftet att försöka bygga en modell av framtida utfall. Ett viktigt dilemma vid konstruktion av modell är att väga enkelhet mot noggrannhet. En för enkel modell riskerar att inte delge tillräckligt bra bild över situationen medan en för noggrann modell riskerar att bli både tidskrävande och svår att hantera (Andersson, 2013).

### 3.5.2 Investeringskalkylering

”Investeringar är beslut där konsekvenserna sträcker sig över lång tid. Allmänt kan investeringar definieras som en resursinsats vid en tidpunkt som ger konsekvenser i framtiden” (Andersson, 2013). I en investeringskalkyl uppkommer kostnader och intäkter löpande. I denna kalkyl är intresset av i vilken tidpunkt där betalningsströmmarna inträffar. Detta eftersom betalningar i olika tidpunkter inte är direkt jämförbara på grund av pengars tidsvärde.

Investeringsens initialsatsning kallas grundinvestering och inträffar vid utbetalningstillfället  $t_0$ . Punkten  $t_0$  är tidpunkten då grundinvesteringen går igenom och första tidpunkten i kalkylens livslängd. Inbetalningar och utbetalningar sker löpande men förenklas till att uppkomma vid slutet av varje år. Den ekonomiska livslängden är den tid det är ekonomiskt riktigt att använda investeringen. Investeringsens tekniska livslängd kan vara längre än den ekonomiska. Restvärdet är det beräknade värdet som är kvar efter den ekonomiska livslängden (Andersson, 2013).

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+i)^t}$$

NPV (Net Present Value) eller nuvärdesmetoden används för att jämföra olika investeringsmöjligheter.  $R_t$  motsvarar netto kassaflödet under en enskild tidsperiod  $t$ .  $i$  motsvarar diskonteringsräntan.  $t$  representerar antalet tidsperioder.

### 3.5.3 SimSES investeringskalkyl

Description	Value	Unit
FCR Revenue Each Year	[70606.94]	EUR
Intraday Revenue Each Year	[-30501.0]	EUR
Op. and Maint. Cost each year	[-0.0]	EUR
Investment Costs	3454.00	EUR
Cashflow each year	[40105.94]	EUR
NPV	35865.55	EUR
IRR	1061.14	%
Profitability Index	11.38	
ROI	10.38	
Levelized Cost of Storage	602.63	EUR / MWh

Figur 8 – Simuleringsprogramvaran SimSES investeringskalkyl för BESS (Kucevic, 2020)

I simuleringsprogramvaran SimSES för BESS finns en modell som beräknar bland annat lönsamheten på systemet (se Figur 8). Givet ett antal parametrar kan användaren själv programmera om dessa för anpassas till den simulering som avses beräknas. Inbetalningarna baseras på hur stor nytta batteriet gör för energinätet och på priserna som nätföretagen betalar för tjänsterna som levererats. Levelized cost of storage (LCOS) är ett nyckeltal som mäts i Eur/MWh. Detta mäter kostnaden för en MWh el som släpps ut från en lagringsenhet när hänsyn tas till alla kostnader och energi som produceras under enhetens livstid (Kucevic, 2020).

Programvaran beräknar även NPV, denna formel innehåller flera variabler så som diskonteringsränta, tid och restvärde. Diskonteringsräntan kan ställas in av användaren, tiden och restvärdet beräknas automatiskt.

## 3.6 Tidigare forskning

Nedan följer resultat från tidigare forskning gällande lokal energilagring, variationer i elektrisk produktion och hållbarhet gällande batterier.

### 3.6.1 Lokal energilagring

I en rapport från Power Circle till Energimyndigheten undersöker Wolf et al. (2020) vilka förstärkningar i elnätet som kommer att krävas i framtiden vid mer elproduktion via solceller och fler elbilar som laddas samtidigt. Syftet med detta projekt var att öka kunskapen kring energilager som drivs med batterier i framtida elnät. I studien undersöktes också hur BESS kan avlasta nätet och hur företagen ser på den nya tekniken och affärsmodeller. Fokus i detta projekt var ett större BESS placerat ute i elnätet.

Wolf et al. (2020) lyfter många insikter från intervjuer med olika personer från elnäts-industrin. God kunskap om framtida utmaningar i elnätet finns hos de intervjuade företagen men få har på egen hand börjat titta på alternativa lösningar på dessa utmaningar. Anledningen förklaras vara en brist på både resurser och kompetens att starta nya projekt. Samtidigt finns även en viss skepsis mot ny teknologi i en vad författarna beskriver som en konservativ bransch. Enligt författarna krävs demonstration och verifikation av den nya tekniken för att få fler att ta steget och investera. Det finns dock olika åsikter kring BESS-tekniken i branschen där vissa anser att fler pilotprojekt är överflödiga och att tekniken är redo för marknaden. Enligt Wolf har man identifierat flera viktiga drivkrafter för att den nya teknologin och affärsmodellerna skall få genomslag. Här beskrivs interna drivkrafter i form av innovativa entusiastiska medarbetare, stöd av ledning på alla nivåer, ökat kunskapsläge och ett akut behov av lösningar som dessa drivkrafter. Hidalgo-León (2017) bekräftar att teknikens mognadsgrad varit en faktor som bromsat en bred implementering av BESS.

I både Sverige och Norge har flera pilotprojekt med BESS testats i olika konfigurationer och användningsområden. De flesta i Sverige har placerats bakom mätaren nära slutkunden, antingen i privata fastigheter eller i offentliga byggnader. Wolf et al. (2020) lyfter pilotprojektet av Riksbyggen konstruerade ett energilager av gamla bussbatterier som användes i en fastighet. De flesta projekt i anslutning till privata byggnader har finansierats med forskningsstöd. I Sverige har BESS använts i olika applikationer på olika platser beroende på vilket behov som funnits. I Umeå har sedan 2016 ett Litium-titan-batteri på 380kW/118kWh installerats och använts i anslutning till en laddstation för bussar i syfte att minska belastningen på elnätet. I ett annat exempel installerade Fortum ett BESS på 5MW/6,2MWh nära vattenkraftverket i Forshuvud i frekvensreglerande syfte. Investeringskostnaden för systemet uppgick till 30 miljoner kronor. I ett tredje exempel installerade Vattenfall ett BESS i Uppsala integrerat i elnätet med syfte att lösa kapacitetsproblem. Här valde Vattenfall BESS i stället för traditionella nätförstärkningar, specifikationen på systemet är 5MW/20MWh.

I Norge skiljer sig energiproduktionen från Sverige även fast geografiska faktorer är liknande. Här produceras 96% av elektriciteten av vattenkraft och elnätsföretagen får inte själva äga batterier enligt den norska energimyndigheten NVE. Norge har redan idag problem med sitt elnät på vissa platser. Många elbilar och lågt dimensionerade kablar på vissa platser nämns som bakomliggande orsaker. Idag finns 16 stycken BESS över 15kWh anslutna till elnätet som alla ägs av privata företag eller elnätsföretag (Wolf et al., 2020).

Wolf et al. (2020) berättar för att simulera nyttan med BESS i elnätet konstruerades tre olika scenarion med kunder. Ett där alla har en elbil med ett 20kWh batteri och en 11kW laddare, ett där alla har en 5kW solpanel och ett kombinerat fall med både elbilar och solpaneler. Perioden för simuleringen löpte över ett år och data med kundbeteende matades in i modellen. Två olika typer av elnät simulerades sedan, ett kallat "Jämtkraft" vilket representerade ett nät på landsbygd och ett kallat "Trollhättan" som speglade ett tätbebyggt bostadsområde. Resultaten från simuleringen visade att Trollhättans nät klarade att hantera både ökad belastning från elbilarnas laddning och även den negativa överföringen från solcellerna. Jämtkrafts nät uppgraderades under simuleringens period eftersom de gamla kablarna redan orsakade problem med nuvarande belastning. Med nya kablar klarade även Jämtkrafts nät den ökade belastningen. För säkerhets skull konstruerades även ett "worst-case" scenario som simulerade belastning från två på varandra följande dagar med extremt låga temperaturer. I detta fall fick Trollhättans nät problem och transformatorer överbelastades 34% av tiden. Jämtkrafts nät med nya kablar klarade belastningen utan problem (Wolf et al., 2020).

Enligt Wolf et al. har tidigare studier från Sverige har inte kunnat påvisa lönsamhet när BESS enbart används som ett substitut för uppgradering av kablar i elnätet men detta kan komma att ändras inom tio år. En norsk studie av Wrålsen & Faessler (2022) påvisar lönsamhet när BESS används för att sälja kapacitet till frekvensreglering samtidigt som systemet också köper och säljer kapacitet. Wolf et.al. (2020) berättar om en liknande studie där lönsamhet uppnås med batteripriser till 1500 Eur/kWh. Rapporten från Wolf et.al. slår fast att prismodeller för energilagring är komplicerade då många variabler måste inkluderas. Ett axplock av dessa variabler är, teknik, systembalansering, installationskostnader och overheadkostnader. Batteriet som används av Wolf har konfigurationen 282kWh/73kW. Kostnad för ett 4-h batteri som kan användas för nätapplikationer är ca 380\$/kWh varav 209\$/kWh är kostnad för själva batteripaketet och resterande är overhead, installation och systemkostnader. Wolf använder sig av en policyrapport från EU80 som beskriver relationen mellan priset €/kWh och €/kW till 2,3:1. Givet dessa antaganden uppskattas simuleringens installationskostnad till 1,7 MSEK.

Resultatet av simuleringen visade att batteriets utnyttjandegrad bara uppgick till 5% när det användes som lösning på spänningsproblematik under vintermånaderna. Slutsatsen av detta resultat är att batteriet kan användas till andra stödtjänster i elnätet under resten av tiden. Wolf et al. (2020) drar här slutsatsen att nyckeln till lönsamhet är att använda BESS till många olika användningsområden. Även Wrålsen & Faessler (2022) slår fast att energilagring genom BESS bör utnyttjas genom kombination av användningsområden för att uppnå maximal ekonomisk nytta.

### 3.6.2 Att hantera variationer i energiförsörjning från vind och solkraft

I en finsk doktorsavhandling undersöker Kiviluoma (2013) de kostnadsökningar som uppstår vid ökad energiförsörjning av vindkraft. Rapporten undersöker också olika alternativ för att mildra dessa. Tre av dessa kostnadsställen undersöks grundligt, flexibilitet hos traditionella kraftverk, smart laddning av elbilar och flexibilitet i värmealstring och användning. I ett elnät där vindkraft utgör en relativt liten procentuell andel av energiproduktionen blir variationen inte i praktiken ett problem. Med en högre andel vindkraft i ett elnät ju svårare och dyrare blir variationen att hantera. I en studie av Kirkerud et.al (2021) undersöks möjligheten till DR (Demand Response) genom energilagring som en möjlig lösning på dessa problem. Kirkerud et.al. slår fast att DR innehar potential, både tekniskt och ekonomiskt för att garantera tillräcklig flexibilitet i ett framtida elnät.

Kiviluoma (2013) framhäver att det är vädermönster som styr hur energiproduktionen varierar och att det oftast tar dagar innan mönstret skiftar. Ett energilagrar i en sådan miljö skulle arbeta i 50 – 250 cykler per år. Det låga antal cykler främjar lagring som kan åstadkomma en låg kostnad per MWh. Kostnad per MW är också en faktor men för de flesta former av energilagrar innebär en hög lagringskapacitet även en hög effekt. Två anmärkningsvärda undantag är dock hydro-elektrisk lagring och CAES (Compressed Air Energy Storage) där investeringen i MW är oberoende kapaciteten i MWh. Kiviluoma (2013) belyser även problemet med att jämföra stora energilagrar ekonomiskt då många av dessa är platsbyggda och nästan aldrig massproducerade. Trots att investeringskostnader är svåra att uppskatta hävdar Kiviluoma (2013) att en enkel ekonomisk modell kan användas för att bestämma övre gränser som olika lagringstekniker bör underskrida för att vara lönsamma.

Detta genomförs genom att först beräkna ett nominellt värde på den årliga försäljningsvinsten där parametrar är optimistiska antaganden enligt följande formel. Nuvärdet av försäljning beräknas av nominella värden där en kalkylränta på 8% används och livslängden är beroende av energilagrets förväntade livslängd. Nuvärdet av försäljningen måste vara samma eller högre än investeringskostnaden för att vara lönsam.

$$\left( P_{\text{Försäljning}} - \frac{P_{\text{Inköp}}}{\eta} \right) \times C \times t$$

Där

$P_{\text{Försäljning}}$  Är det genomsnittliga försäljningspriset om (80 €/MWh)

$P_{\text{Inköp}}$  Är det genomsnittliga inköpspriset om (30 €/MWh)

$\eta$  är cykelns effektivitet

$C$  Är antalet fulla cykler per år (250)

$t$  Är tiden till full urladdning i timmar (8h)

Tabell 1 – Jämförelse mellan energilagring ur ett ekonomiskt perspektiv (Kiviluoma, 2013).

Lagringstyp	Målkostnad €/kWh	Effektivitet	Livslängd (år)	DOD
Hydro-elektrisk	10	0,8	100	1
CAES	50	0,85	60	1
Litium-bly	53	0,85	8	0,8
Litium-jon	78	0,99	12	0,8

Även fast Kiviluomas beräkningar visar på att Litium-jon-lagring erhåller högst målkostnad för lagring belyser Hidalgo-León et.al. (2017) att kostnaden för att implementera BESS med Litium-jon har fallit och beräknas fortsätta falla. Detta kommer att medföra att lagringskostnaden per kWh sjunker och BESS blir ett mer attraktivt alternativ för energilagring.

Ett annat, mindre traditionellt energilager är elbilar. Dessa är om det bryts ned till grundkomponenter huvudsakligen ett stort batteri. Kiviluoma (2013) skriver att elbilar kan bidra till systemets flexibilitet på två sätt. Antingen genom så kallade ”smart laddning” vilket innebär att laddning sker när belastningen på elnätet är liten och elpriset är lågt, eller genom vehicle to grid (V2G). V2G innebär att det elektriska fordonet laddar ur batteriet och säljer elektrisk kapacitet till elnätet när priserna är höga.

### 3.6.3 Batterier och energilager från ett hållbart perspektiv

Hannan et al. (2021) beskriver att behovet av batterier och energilagring ökar avsevärt i världen där den förväntade ökningen är 25% varje år och att behovet kommer ligga på ungefär 2600GWh år 2030. Ett av de främsta användningsområdena med BESS är att vara ett stöd i förnybara energikällor och kan då vara ett essentiellt verktyg i elnätet när framställningen av vind- eller solenergi varierar alltför mycket (Hidalgo-Leon et al., 2017). Dessutom kan informations- och kommunikationssystem som återfinns i BESS hjälpa att reducera växthusgasutsläpp via effektivisering av användningen och lagringen.

Framställningen av vind- och solenergi växer betydligt samtidigt som kostnaderna för litiumjon-batterier, som denna studie främst fokuserar på, sjunker och elmarknaden utvecklas (Pellow et al., 2020). Med denna tillväxt samt kostnadsminskning har energilagring i form av litiumjon-batterier blivit konkurrenskraftigt i jämförelse med traditionella nättillgångar på elmarknaden. Enligt Hannan förväntas dessutom vind- och solenergi stå för 50% av den globala energiframställningen år 2050 och i denna omställning förväntas BESS vara en viktig teknologi som kan främja försöken att stoppa klimatpåverkan och nå hållbarhetsmål.

Hannan et al. (2021) redogör för de hållbarhetsmål som påverkas av BESS utifrån FN:s globala mål som är del av Agenda 2030. I deras studie uppvisar dem att BESS ger en positiv inverkan på

35,5% av de globala delmålen vilket är 60st samt en negativ inverkan på 13% av de globala delmålen alltså 22st (se Figur 9).

Results of SDG's target analysis with percentage (%).

No.	The SDG Goal	No of Targets	Positive Impact	%	Negative Impact	%	No evidence	%
1	No poverty	7	3	42.86%	1	14.28%	4	57.14%
2	Zero Hunger	8	3	37.5%	1	12.5%	5	62.5%
3	Good Health and Well-being	13	2	15.38%	2	15.38%	10	76.92%
4	Quality Education	10	5	50%	0	0%	5	50%
5	Gender Equality	9	0	0%	1	11.11%	8	88.89%
6	Clean Water and Sanitation	8	4	50%	1	12.5%	2	25%
7	Affordable and Clean Energy	5	5	100%	1	20%	0	0%
8	Decent Work and Economic Growth	12	5	41.67%	1	8.34%	7	58.34%
9	Industry, Innovation and Infrastructure	8	6	75%	1	12.5%	2	25%
10	Reducing Inequality	10	2	20%	0	0%	8	80%
11	Sustainable Cities and Communities	10	6	60%	3	30%	4	40%
12	Responsible Consumption and Production	11	6	54.54%	1	9.09%	5	45.45%
13	Climate Action	5	3	60%	2	40%	2	40%
14	Life Below Water	10	4	40%	3	30%	6	60%
15	Life On Land	12	2	16.67%	3	25%	7	58.34%
16	Peace, Justice, and Strong Institutions	12	0	0%	1	8.34%	11	91.67%
17	Partnerships for the Goals	19	4	21.05%	0	0%	15	78.94%
<b>Total</b>		<b>169</b>	<b>60</b>	<b>35.5%</b>	<b>22</b>	<b>13.01%</b>	<b>101</b>	<b>59.76%</b>

Figur 9 – BESS inverkan på FN:s globala mål (Hannan et al., 2021)

### Råmaterial och framställning

Priserna på några av de viktiga metallerna som behövs till batterier har stigit avsevärt de senaste åren som exempelvis kobolt med en ökning av 300% mellan 2017 och 2019 (Dehghani-Sanij et al., 2019). Även litium har ökat kraftigt med en 400% ökning mellan 2015 och 2019 och börsen för sällsynta jordartsmetaller har ökat avsevärt. Den globala konsumtionen av metaller som används till batteritillverkning ökar markant och drivs av den ökande efterfrågan, framför allt när det gäller litium där 35% av konsumtionen gick till batterier år 2015 och 46% 2017. Även konsumtionen av bly består främst av batteritillverkning med hela 86% av den totala konsumtionen. Det finns dock vissa metaller där efterfrågan minskar som exempelvis kvicksilver där 5% av konsumtionen gick till batterier och minskar på grund av förändringar i teknologin samt oro kring toxicitet.

En ökad tillverkning av batterier påverkar tillgången till naturliga resurser samt de ekonomiska aspekterna kring dem (Dehghani-Sanij et al., 2019). Rent geografiskt återfinns resurserna ofta i instabila eller kontrollerade ekonomier och förbrukningen sker hos de mest lättillgängliga källorna först. Vissa av materialen är dessutom värdefulla som exempelvis silver som används som valuta och andra är dyra (kvicksilver och indium) eller sällsynta (lantan och cerium). För att kunna möta behovet av metaller behövs det mer mineraler från redan existerande och nya källor. Gruvindustrin har redan flertalet sociala och miljömässiga problem, detta främst i utvecklingsländer där regleringarna inte är lika stränga eller där det är korrupt vilket då kan påverkas alltmer och förvärras vid en ökning av behovet och priser.

Det finns en del risker med vissa av metallerna, icke-metallerna och processen som är involverade i batteriframställningen relaterade till både den mänskliga hälsan samt miljömässiga föroreningar

(Dehghani-Sanij et al., 2019). Exponering av metallerna och icke-metallerna via inandning, kontakt via hud/ögon eller förtäring kan ha skadliga effekter på den mänskliga hälsan och generellt medför tungmetaller stora risker både för miljön och folkhälsan. Exempelvis visar Dehghani-Sanij statistik från Institute for Health Metrics and Evaluation från 2016 som påvisar att blyexponering var orsaken bakom nästan 500 000 dödsfall och en stor skala långsiktiga hälsopåverkningar. Detta påverkar främst individer från låg- och medelinkomstländer.

Det krävs ungefär 1,9 miljoner liter vatten för varje ton litium som produceras och vid brytning av litium skadas det lokala ekosystemet (Wali et al., 2022). Det kan orsaka vattenbrist och föroreningar då metaller och metallföreningar vid brytning och annan industriell verksamhet tar sig in i mark, grundvatten och ytvatten på många olika vis nämner Hannan et al. (2021). Deponier och avfallsdammar påverkar vatten och damm eller avdunstningar, från olika steg i processen som exempelvis transport eller avfallsförbränning vid återvinning, kommer ut i atmosfären. Avfall från framställning och återvinning av batterier benämns som en växande utmaning med anledning av deras toxicitet, överflöd och varaktighet i naturen samt då efterfrågan växer (Dehghani-Sanij et al., 2019). Avfallet kan ta form i rent avfall, avfallsvatten, växthusgas, partiklar och giftiga gaser, vid exempelvis återvinning av blybatterier kan blyångor och partiklar släppas ut i luften. Litiumjonbatterier släpper ut ungefär 70 kg koldioxid per kWh och är bland de batterityper som producerar mest CO<sub>2</sub>-eq/kWh. Energikonsumtion för nuvarande framställning av batterier är mellan 350 och 650 MJ/kWh. Detta har del i att förklara betydelsen av miljömässiga bedömningar som innefattar alla steg i livscykeln hos batterier.

Det finns också andra risker med litium-jon batterier som i att de kan fatta eld om de exponeras för alltför hög luftfuktighet och cellerna korroderar. Av den här anledningen krävs det att miljö för framställningen av dessa batterier har en låg relativ luftfuktighet (Dehghani-Sanij et al., 2019). Andra problem som kan uppstå är att frätande elektrolyter kan läcka ut om skada sker på batteriet. Elektrolyterna innehåller metaller som exempelvis bly som kan hamna i vatten eller mark i olika kemiska former. Avfallsvatten som uppstår vid de olika processerna i ett litium-jonbatteris livscykel är också skadligt för miljön och människan om det tar sig in i marken och når ytvatten då det innehåller olika metaller. Således är det essentiellt att ta hand om kontaminerat avfallsvatten.

### *Användning*

När det kommer till användningen av BESS finns det flertalet aspekter som har en positiv inverkan på de globala hållbarhetsmålen enligt Hannan et al. (2021). Det framgår tydligt att BESS kombinerat med förnybara energikällor som vind- och solenergi är i synnerhet ett framgångsrikt koncept ur ett hållbarhetsperspektiv. Det är ett flexibelt och pålitligt sätt att lagra energi på vilket gör det mer prisvärt. Något negativt som Hannan presenterar är att de inledande grundinvesteringarna som krävs är höga, men att studier visar på att denna kostnad kan tjänas ihop under användningen.

BESS kan reducera växthusgasutsläpp per kWh enligt Pellow et al. (2020) som nämner att optimering av BESS på låga utsläpp av koldioxid och hög avkastning kan vara mycket fördelaktigt. Detta exempelvis genom att optimera när el tillförs samt förs ut ur batteriet eller genom att minska den totala lagringen. Enligt Pellow kan detta sänka koldioxidutsläpp med 25-50% och samtidigt endast påverka avkastningen negativt med 1-5%. Även Hidalgo-Leon et al. (2017) framför att BESS kan reducera koldioxidutsläpp med runt 20% vid användningen i bostäder, men menar på att kostnaden av lagrad energi beror till stor del på lagringsläget och kan vara högre än konventionellt framställd energi.

Förutom reduktionen i utsläpp av växthusgaser kan BESS vara till stor hjälp där eltillgången där låg som i lågutvecklade länder Hannan et al. (2021). Det kan främja utbildning i de områden det inte tidigare funnits el dygnet runt och ge möjlighet till studier samtidigt som det kan betydelsefullt påverka sjukvården dessa områden. BESS kan stödja sjukvården med mer tillförlitlig elförsörjning och exempelvis reducera riskerna för mödradödlighet samt tidig död vilket är stora problem. Utöver detta kan också den agriskulturella sektorn främjas och öka produktiviteten hos den samtidigt som det ställs mindre krav på att utöka elnätet till avlägsna områden.

Hannan et al. (2021) tar dessutom upp hur BESS har som effekt varit delaktig i att flera åtgärder och politiska beslut för att reducera klimatförändringar. De nämner även att BESS används för att utveckla städer med sammankopplad infrastruktur och kollektivtrafik som är hållbar samt att hög densitet av BESS i städer gör eldrivna fordon mer ekonomiskt överkomliga. Vad som också poängteras är hur den stora efterfrågan och tillväxten skapar nya jobb, som exempelvis i Mellanöstern där det förväntas skapas 180 000 nya jobb till 2050 när mer förnyelsebar energi introduceras i området.

### *Bortskaffning och återvinning av batterier*

Efterfrågan på batterier ökar som sagt markant, jämför en försäljning på \$41 miljarder år 2000 med \$71 miljarder 2010 och en förväntad försäljning på \$120 miljarder 2019, och majoriteten av batterier utgör något form av hot mot miljön eller folkhälsan om de inte bortskaffas på ett lämpligt och säkert sätt enligt Dehghani-Sanij et al. (2019). De framför några olika alternativ för batterier vid slutet av deras livscykel vilka innefattar stabilisering, deponi, förbränning och återvinning. Flertalet batterier hamnar i deponier eller förbränns och hur dessa batterier hanteras beror till stor del på typen av batteri och vart i världen de hanteras. Exempelvis är andelen batterier som återvinns i Kina endast 2% då insamlingsystemen där är bristfälliga. Det är också viktigt att förstå hur materialen ett batteri består av ska hanteras, insamlas och återvinnas. Bortskaffning av använda batterier är en essentiell fråga eftersom metallavfall är farligt och kostsamt att bortskaffa på ett säkert sätt. Hannan et al. (2021) redogör för hur batterier som hamnar i deponier korroderar och läcker ut kemikalier i både grundvatten och ytvatten vilket fortsätter strömmas ut i kretsloppet och skadar ekosystemet samt påverkar den globala uppvärmningen. Farliga metaller riskerar att förtäras via kranvatten och de vaporiserade formerna av batteriavfall kan fastna i atmosfären och

därefter via regnet förorena. Dessutom tar Hannan upp att litiumjon-batterier som hamnar i deponier kan orsaka bränder vilka kan brinna i flera år.

För att minska risken för den här typen av farligt avfall och batteriers inverkan på miljön har det således införts regleringar och lagar i flera länder (Dehghani-Sanij et al., 2019). Dessutom har bättre återvinningsåtgärder tillsammans med nya teknologier framtagits. Trots kostsamt och komplicerat kan de flesta materialen i batterier återvinnas genom kemiska och maskinella tekniker. Med hjälp av dessa tekniker kan materialen återanvändas i fortsatt batteriframställning vilket minskar produktionskostnader och konsumtionen av råmaterial samt mildrar miljöpåverkan (Hidalgo-Leon et al., 2017). De kan dessutom användas som 2LB med lägre prestationskrav. Enligt Hannan et al. (2021) kan återvinning av batterikomponenter sänka behovet av konsumtion av fossila bränslen. När återvunna katoder, koppar, litium, aluminium mm används i nya litiumjon BESS kan hela batteriets växthusgasutsläpp och avfall reduceras med upp till 50%. Hannan framför också att detta sänker kostnaden och att exempelvis i litium-luft batterier sjunker energiåtgången vid framställningen från 1870MJ/kWh till 1510MJ/kWh.

Det huvudsakliga problemet med återvinning som Dehghani-Sanij et al. (2019) tar upp är insamlingen av gamla batterier som kräver samarbete mellan olika delar och nivåer i samhället som allmänheten, regeringen, företag och andra organisationer. Beroende på typen av batteri är den här typen av samarbete och insamling mer eller mindre signifikant då olika batterier består av material med olika hög grad av toxicitet (kadmium är exempelvis ett som kan vara mycket toxiskt). För att återvinningen ska ske så säkert som möjligt krävs det rätt utrustade och lämpliga faciliteter som fördelaktigt ligger en bit bort från högt befolkade områden där rätt förutsättningar finns för att minimera risker som skador och föroreningar. Som tidigare nämnt beror hur batterier hanteras vid slutet av sin livscykel mycket på vart i världen de hanteras. I USA och Europa exempelvis återvinns runt 99% av alla blybaserade batterier, medan detta inte alls är fallet i mindre utvecklade länder där regleringar, lämplig infrastruktur och likställt avancerade tekniker inte återfinns vilket leder till de risker för hälsan och miljön som nämnts tidigare.

När det kommer till Litium-jon batterier ligger återvinningsandelen på mindre än 3% och då materialen i dessa batterier inte har lika hög toxicitet som andra typer av batterier slängs de ofta på deponier i vissa länder (Dehghani-Sanij et al., 2019). I exempelvis Australien återvinns endast 2% av litium-jon avfall varje år och resten hamnar i deponier (Wali et al., 2022). Den utökade efterfrågan på elektriska fordon och brist på råmaterial gör detta till ett betydelsefullt problem och regleringar för att kunna genomföra storskalig återvinning av litium-jon batterier krävs. Dehghani-Sanji nämner tre generella tillvägagångssätt för att återvinna litium-jon batterier vilka är mekaniska, pyrometallurgiska och hydrometallurgiska processer som används för att återvinna olika material som litium, koppar, kobolt mm. Samtidigt sker mycket forskning för att utveckla dessa processer och mer effektivt kunna återvinna litium-jon batterier.

En positiv effekt av den globala ökningen i efterfrågan och pris på råa mineraler som Dehghani-Sanij et al. (2019) presenterar är att det har lett till mer återvinning av använda batterier och metaller som exempelvis bly, kobolt, nickel och koppar. Det är tydligt att den växande efterfrågan av BESS har både positiva effekter och negativa påfrestningar när det kommer till hållbarhet. Vad som påvisas är att fortsatt forskning samt vissa regleringar krävs för en fortsatt hållbar utveckling inom området.

## 4 Tillvägagångssätt vid simulering

I detta avsnitt av studien redovisas tillvägagångssätten för de olika simuleringarna och hur egna beräkningar har förfarit.

### 4.1 Tillvägagångssätt 2LB

Programvaran SimSES är i första hand konstruerad för att simulera nya batterier (1LB) vilket medför vissa problem när studien även skall undersöka 2LB. För att kringgå detta problem körs en simulering där batteriernas kapacitet ställs in till värden som motsvarar ett degraderat batteri av samma modell. Om ett nytt batteri till exempel har en kapacitet på 360 kWh och ett 2LB av samma slag skall simuleras med en SOH på 68% beräknas den degraderade kapaciteten till 68%.

Investeringskostnaden för systemet uppskattas genom att undersöka marknadsplatser för 2LB och priset per kWh sätts utefter dessa marknadspriser. I simuleringen av 2LB används fem Tesla-batterier som aggregeras tillsammans och utgör då 360 kWh. Priset för detta uppskattas till 80 000 € (*Second Life EV Batteries Ltd*, n.d.). Kringutrustning och elektronik uppskattas till ytterligare 20 000 €. Den totala grundinvesteringen blir då 100 000 €.

Tabell 2 – Parametrar för återanvända batterier

<b>Parameter</b>	<b>Värde</b>	<b>Enhet</b>
<u>investment_costs</u>	100 000	€
<u>discount_rate</u>	4	%
<u>fcr_price</u>	0,5	€/kW
<u>idm_price</u>	0,05	€/kWh
<u>Start &amp; end</u>	2018-01-01 – 2018-12-31	N/A
<u>time_step</u>	60	Sekunder
<u>strategy</u>	FcrIdmRechargeStacked	N/A
<u>min_soc, max_soc &amp; soc_set</u>	0.4 – 0.8, 0.8	%
<u>power_fcr</u>	300 000	W
<u>power_idm</u>	300 000	W
<u>max_power</u>	300 000	W
<u>eol</u>	10	%
<u>start_soh</u>	100	%

## 4.2 Tillvägagångssätt minsta lönsamma grundinvestering

Eftersom priser för FCR mäts i Euro per megawatt används ett fiktivt system om 1MW. Kapaciteten sattes efter en vanlig effekt till kapacitet 1:2, till 2 MWh. Styrsystemet är konfigurerat för att maximera livslängd. Simuleringsperioden sattes till ett år och grundinvesteringen räknades ut baklänges för att vara lika stora intäktströmmarna.

Tabell 3 – Parametrar för minsta lönsamma grundinvestering

<b>Parameter</b>	<b>Värde</b>	<b>Enhet</b>
<u>investment_costs</u>	175 000	€
<u>discount_rate</u>	4	%
<u>fcr_price</u>	0,5	€/kW
<u>idm_price</u>	0,05	€/kWh
<u>Start &amp; end</u>	2018-01-01 – 2018-12-31	N/A
<u>time_step</u>	60	Sekunder
<u>strategy</u>	FcrIdmRechargeStacked	N/A
<u>min_soc, max_soc &amp; soc_set</u>	0.4 – 0.8, 0.8	%
<u>power_fcr</u>	1 000 000	W
<u>power_idm</u>	300 000	W
<u>max_power</u>	300 000	W
<u>eol</u>	40	%
<u>start_soh</u>	100	%

### 4.3 Tillvägagångssätt högsta ekonomiska nytta

För att skapa ett resultat med hög ekonomisk nytta konstruerades ett system med specifikationerna 2MW/5MWh med en grundinvesteringskostnad om 300 000 €. Grundinvesteringen baserades på data från Wrålsen & Faessler (2022) där framtida batterier prognostiseras till 50 €/kWh.

För denna simulering valdes en kostnad om 60 €/kWh med ett förhållande mellan effekt och kapacitet på 1:2,5.

Tabell 4 – Parametrar för högsta ekonomiska nytta

<b>Parameter</b>	<b>Värde</b>	<b>Enhet</b>
<u>investment_costs</u>	300 000	€
<u>discount_rate</u>	4	%
<u>fcr_price</u>	0,5	€/kW
<u>idm_price</u>	0,05	€/kWh
<u>Start &amp; end</u>	2018-01-01 – 2018-12-31	N/A
<u>time_step</u>	120	Sekunder
<u>strategy</u>	FcrIdmRechargeStacked	N/A
<u>min_soc, max_soc &amp; soc_set</u>	0.4 – 0.8, 0.8	%
<u>power_fcr</u>	2 000 000	W
<u>power_idm</u>	500 000	W
<u>max_power</u>	300 000	W
<u>eol</u>	40	%
<u>start_soh</u>	100	%

## 4.4 Återskapande av tidigare installationer

Återskapandet av Fortums BESS i Forshuvud baserades på de specifikationer avseende effekt, kapacitet och investeringskostnad som angavs av Wolf et.al. (2020). I detta återskapande simulerades två scenarion. Det första, betecknat scenario 1 fick styrsystemet i uppgift att maximera användandet av batterierna till både FCR och IDM där SOC fick variera mellan 0.2 och 0.9. I scenario 2 konfigurerades styrsystemet för att maximera batteriernas livslängd genom att variera SOC mellan 0.4 och 0.8. I scenario 2 tillägnades maximal effekt till FCR och en femtedel av maximal effekt till IDM.

Tabell 5 – Parametrar för Fortum Forshuvud

<b>Parameter</b>	<b>Värde</b>	<b>Enhet</b>
<u>investment_costs</u>	3 000 000	€
<u>discount_rate</u>	4	%
<u>fcr_price</u>	0,5	€/kW
<u>idm_price</u>	0,05	€/kWh
<u>Start &amp; end</u>	2018-01-01 – 2018-12-31	N/A
<u>time_step</u>	120	Sekunder
<u>strategy</u>	FcrIdmRechargeStacked	N/A
<u>min_soc, max_soc &amp; soc_set</u>	0.4 – 0.8, 0.8	%
<u>power_fcr</u>	5 000 000	W
<u>power_idm</u>	1 000 000	W
<u>max_power</u>	5 000 000	W
<u>eol</u>	40	%
<u>start_soh</u>	100	%

Studien valde även att återskapa ett fiktivt system som simulerades av Wrålsen & Faessler (2022). I denna studie simulerades BESS med specifikationerna 79,7 kW/185 kWh. För detta scenario angavs specifika kostnader för batterier om 115 €/kWh och 140 €/kW. Dessa kostnader applicerades på systemets specifikationer enligt följande.

$$140 \text{ €/kW} * 79,7 \text{ kW} = 11\,158 \text{ €}$$

$$115 \text{ €/kWh} * 185 \text{ kWh} = 21\,275 \text{ €}$$

$$11\,158 \text{ €} + 21\,275 \text{ €} = 32\,433 \text{ €}$$

Grundinvesteringen för systemet uppgår till 32 433 € vilket också är underlaget för scenariots simulering.

Tabell 6 – Parametrar för Wrålsen & Faessler

<b>Parameter</b>	<b>Värde</b>	<b>Enhet</b>
<u>investment_costs</u>	32 433	€
<u>discount_rate</u>	4	%
<u>fcr_price</u>	0,5	€/kW
<u>idm_price</u>	0,05	€/kWh
<u>Start &amp; end</u>	2018-01-01 – 2018-12-31	N/A
<u>time_step</u>	120	Sekunder
<u>strategy</u>	FcrIdmRechargeStacked	N/A
<u>min_soc, max_soc &amp; soc_set</u>	0.4 – 0.8, 0.8	%
<u>power_fcr</u>	79 700	W
<u>power_idm</u>	20 000	W
<u>max_power</u>	79 700	W
<u>eol</u>	40	%
<u>start_soh</u>	100	%

Vattenfalls BESS, i denna studie kallat Boliden 480kW /1MWh simulerades med parametrar enligt nedan. Eftersom information om denna anläggning varit bristfällig har alla parametrar förutom investeringskostnad, effekt och kapacitet förts över från tidigare simuleringar i studien. Systemet är programmerad för maximal livslängd för batterierna.

Tabell 7 – Parametrar för Boliden 480kW/1MWh

<b>Parameter</b>	<b>Värde</b>	<b>Enhet</b>
<u>investment_costs</u>	740 000	€
<u>discount_rate</u>	4	%
<u>fer_price</u>	0,5	€/kW
<u>idm_price</u>	0,05	€/kWh
<u>Start &amp; end</u>	2018-01-01 – 2018-12-31	N/A
<u>time_step</u>	120	Sekunder
<u>strategy</u>	FcrIdmRechargeStacked	N/A
<u>min_soc, max_soc &amp; soc_set</u>	0.4 – 0.8, 0.8	%
<u>power_fcr</u>	480 000	W
<u>power_idm</u>	100 000	W
<u>max_power</u>	480 000	W
<u>eol</u>	40	%
<u>start_soh</u>	100	%

## 5. Resultat

I följande avsnitt presenteras resultatet av de intervjuer som har tagits av del från AFRY samt de simuleringar som har utförts under studiens gång.

### 5.1 Intervjuer

Nedan följer intervjuer genomförda av AFRYs affärsutvecklande team med olika intressenter på elmarknaden.

#### 5.1.1 Expert-intervju med ett elbolag på västkusten

Intervjun med elbolaget syftade till att få insikt i hur elbolagen ser på nya tekniska lösningar som BESS erbjuder. Enligt AFRY (2021) hävdar elbolaget själva att de tar innovation på stort allvar för att kunna vara konkurrenskraftig samtidigt som alla projekt som arbetas med måste inneha ett stort fokus på hållbarhet. Genom intervjun framkommer det tydligt att bolaget strävar mot att arbeta med bilindustrin där de själva tror att framtidens kunder och elförbrukning ligger. Det blir därför naturligt att titta på nya innovationer som V2G och BESS. Elbilen ses av bolaget både som en stor tillgång för framtiden och en stor utmaning i att möta efterfrågan i elproduktion. På tillgångssidan kan en stor mängd av elbilar tillsammans aggregeras till ett stort batteri vilket kan användas för V2G i att avlasta elnätet. När många elbilar behöver laddas samtidigt uppstår i stället ett ökat behov av kapacitet varför elbolaget nu även undersöker BESS som en lösning på detta. Elbolaget besitter idag två energilager av batterityp, ett mindre och ett större för att lagra vind och solenergi (AFRY, 2021).

Elbolaget undersöker även möjligheten att bruka använda batterier i energilager. För att detta skall vara effektivt finns många frågetecken och utmaningar kvar innan företaget skulle lita på detta som ett huvudalternativ. Den första utmaningen är att batterierna som använts i elbilar tidigare måste vara av likartad modell för att enkelt kunna anslutas i ett större energilager. Utan en standard eller ett modulärt system kan i praktiken ett energilager bara ta emot använda batterier från enstaka bilmodeller. Nästa utmaning är att kunna säkerställa säkerheten och kapaciteten från återanvända batterier. Utan en sådan garanti är inte dessa batterier intressanta för elbolaget (AFRY, 2021).

#### 5.1.2 Expert-intervju med ett företag inom energilagring

AFRY (2021) intervjuade ett företag som huvudsakligen arbetar med att utveckla olika former av energilager, i första hand genom att använda 2LB (Second Life Battery). Företaget har tagit fram flera BESS på 360 kWh som enbart använder återanvända batterier (2BL). Under åren 2020 – 2021 har en märkbar attitydförändring skett menar företagens expert, att batterier ses som en tillgång och inte längre en börda. Tidigare har brandrisker, höga kostnader och tvivelaktig lönsamhet bidragit till låg investeringsvilja. Företagets BESS kan förse elnätet med en rad olika tjänster som aggregatorer efterfrågar. En aggregator i detta sammanhang är de företag som förhandlar med

elproducenter på uppdrag av konsumenterna. Systemet har ett fönster om 15 minuter för att avgöra vilken tjänst och om en tjänst skall levereras. I Storbritannien levererar systemet kontinuerlig frekvensreglering och i Belgien reglering när frekvensen faller utanför satta intervaller.

Priset på 2LB per kWh avslöjas inte av intervjuobjektet då detta är en affärshemlighet (AFRY, 2021). Ur intervjun framkommer dock att högre kWh uppfattas som mer värdefullt och därav är priset också högre. Genom att fråga om hur företaget ser på garanti och livslängd på återanvända batterier berättar de att batterierna måste uppfylla en rad krav för att användas där 68% SOH (State of Health) är ett minimum. Innan batterierna köps in testas de av ett annat företag och får sedan ett pass för batterier där bland annat specifikationer och SOH ingår. Intervjuobjektet lyfter att en stor fördel med att använda 2LB i stället för 1LB (First Life Battery) är att batterierna kan pressas hårdare då de inte måste förhålla sig till garantier. Detta medför att systemet försöker sälja så mycket kapacitet som möjligt även om livslängden påverkas avsevärt. I dagsläget är tillgången på 2LB så pass stort att livslängden inte är avgörande.

### 5.1.3 Expert-intervju med ett företag inom Virtual Power Plant (VPP)

För att förstå användningen av BESS inom VPP intervjuade AFRY (2021) en expert på ett företag som arbetar med just VPP som huvudområde. Viktigt att ha i åtanke är att detta företag verkar huvudsakligen i flera länder där lagstiftning för elbolag och elnätet skiljer sig från Sveriges lagstiftning. Företaget äger inte själva några energilagrar utan använder sig av mindre system ute i elnätet som Vehicle to Grid (V2G) eller BESS. Dessa mindre lager aggregeras tillsammans för att verka som ett virtuellt kraftverk.

AFRY (2021) berättar att företaget har en positiv syn på BESS som använder sig av bilbatterier. De medger också att dessa kan vara minst lika värdefulla som energilagrar med större batterier specifikt konstruerade för detta ändamål.

I intervjun framkommer även en rad åsikter och insikter om BESS från företaget. Intervjuobjektet (AFRY, 2021) anser att frekvensreglering (FCR) genom BESS inte kommer att vara lika lönsamt i framtiden när fler BESS finns till förfogande för denna uppgift. Fler BESS kommer innebära att behovet av FCR kommer vara detsamma men att tillgången på FCR tjänster ökar och således pressas priset. Företaget hävdar i stället att BESS i första hand borde användas för att kapa effekttoppar eller för att göra fastigheter och anläggningar mer självförsörjande genom solceller. Slutligen nämner intervjuobjektet en investeringskostnad om 100 000 € per MW.

## 5.2 Simulering

Som tidigare nämnt användes simuleringsprogramvara SimSES för att simulera den teknoekonomiska nyttan av BESS. Resultaten nedan redovisas i figurer som genereras efter varje slutförd simulering. Resultatredovisning sorteras under tre rubriker, teknisk utvärdering,

ekonomisk utvärdering och kapacitetsförändring. Utöver detta redovisas även de parametrar som användes under den specifika simuleringsperioden.

### 5.2.1 Återskapande av resultat

För att utvärdera programvarans tillförlitlighet simulerades flera system som redan idag tagits i drift. Det första systemet som simulerades var Fortums BESS i Forshuvud. Specifikationerna för detta system är 5MW/6,2MWh med en investeringskostnad om 30 miljoner kronor. Wolf et al. (2020) skriver att detta system huvudsakligen används för att arbeta med frekvensreglering. Därav simulerades ett fall där systemet arbetar huvudsakligen med just detta. Vidare kommer denna simulering kallas scenario 1.

Description	Value	Unit
FCR Revenue Each Year	[755065.97]	EUR
Intraday Revenue Each Year	[-169250.0]	EUR
Op. and Maint. Cost each year	[-0.0]	EUR
Investment Costs	3000000.00	EUR
Cashflow each year	[585815.97]	EUR
NPV	-2436715.41	EUR
IRR	-80.47	%
Profitability Index	0.19	
ROI	-0.81	
Levelized Cost of Storage	665.49	EUR / MWh

*Figur 10 – Ekonomiskt resultat Fortum 5MW/6.2KWh (Scenario 1)*

Enligt simuleringens resultat från Figur 10 uppvisar inte Fortums system en positiv avkastning. Systemet erhåller ett kassaflöde om 585 000 € och täcker därmed inte investeringskostnaden om 3 000 000 €. Batterierna kördes tills dess att batterihälsan (SOH) sjönk till 40%. Livslängden blev i detta fall cirka tio månader och motsvarade 802 fulla laddningscykler. I scenario 1 gavs programmet direktivet att maximera användningen av batterierna på bekostnad av kortare livslängd.

Description	Value	Unit
FCR Revenue Each Year	[910000.0]	EUR
Intraday Revenue Each Year	[4708.33]	EUR
Op. and Maint. Cost each year	[-0.0]	EUR
Investment Costs	3000000.00	EUR
Cashflow each year	[914708.33]	EUR
NPV	-2120472.76	EUR
IRR	-69.51	%
Profitability Index	0.29	
ROI	-0.71	
Levelized Cost of Storage	1510.82	EUR / MWh

*Figur 11 – Ekonomiskt resultat Fortum 5MW/6.2kWh (Scenario 2)*

Resultaten för scenario 2 illustreras i Figur 11 där det ekonomiska resultatet utföll bättre än från scenario 1. Batteriet varade längre när styrsystemet inte tillät SOC att variera lika fritt som i scenario 1. Ett positivt kassaflöde från IDM-försäljning erhöles även. Trots längre livstid bedöms inte heller detta användningsområde vara lönsamt och uppvisar en negativ ROI om -71% efter ett år.

Description	Value	Unit
Efficiency round trip	99.12	%
SOC mean	75.33	%
SOC max	100.00	%
SOC min	40.00	%
Number of changes of signs per day	109.70	
Avg. length of resting times	1.79	min
Pos. energy between changes of sign	4.85	%
Avg. Fulfillment Factor	95.98	%
Remaining capacity	40.00	%
Energy throughput	9911970.88	kWh
Equivalent full cycles	802.73	
Avg. depth of cycle for discharge	4.72	%

*Figur 12 - Tekniskt resultat Fortum 5MW/6.2kWh (Scenario 1)*

Ur Figur 12 går att utläsa det tekniska resultatet från scenario 1 där anmärkningsvärt är högt antal cykler och hög DoD.

Description	Value	Unit
Efficiency round trip	99.68	%
SOC mean	67.72	%
SOC max	100.00	%
SOC min	40.00	%
Number of changes of signs per day	80.77	
Avg. length of resting times	3.54	min
Pos. energy between changes of sign	2.39	%
Avg. Fulfillment Factor	99.57	%
Remaining capacity	60.02	%
Energy throughput	4354095.37	kWh
Equivalent full cycles	351.66	
Avg. depth of cycle for discharge	1.97	%

*Figur 13 – Tekniskt resultat Fortum 5MW/6.2kWh (Scenario 2)*

Ur Figur 13 vilken illustrerar scenario 2 kan anmärkas på en lägre och bättre DoD samt färre antal cykler än scenario 1.

Nedan följer resultat från simuleringen av Wrålsen & Faessler's (2022) fiktiva system.

Description	Value	Unit
FCR Revenue Each Year	[14505.4]	EUR
Intraday Revenue Each Year	[175.47]	EUR
Op. and Maint. Cost each year	[-0.0]	EUR
Investment Costs	32433.00	EUR
Cashflow each year	[14680.87]	EUR
NPV	-18316.78	EUR
IRR	-54.73	%
Profitability Index	0.44	
ROI	-0.56	
Levelized Cost of Storage	1212.56	EUR / MWh

Figur 14 – Wrålsen & Faessler 79,7kW/185 kWh, Ekonomiskt resultat

Ur Figur 14 utläses att Wrålsen & Faessler's system inte uppnår lönsamhet under simuleringsperioden och att LCOS uppgår till 1212 €/MWh. Med avseende på grundinvesteringen uppgår systemets totala kostnad till 175 €/kWh.

Description	Value	Unit
Efficiency round trip	99.70	%
SOC mean	60.86	%
SOC max	90.00	%
SOC min	10.00	%
Number of changes of signs per day	81.28	
Avg. length of resting times	3.48	min
Pos. energy between changes of sign	1.07	%
Avg. Fulfillment Factor	99.98	%
Remaining capacity	67.61	%
Energy throughput	58621.47	kWh
Equivalent full cycles	158.61	
Avg. depth of cycle for discharge	0.81	%

Figur 15 - Wrålsen & Faessler 79,7 kW/185 kWh, Teknisk utvärdering

I den tekniska utvärderingen från Figur 15 noteras att kvarvarande kapacitet i systemet efter simuleringsperioden uppgår till 67%. Systemet uppnår 158 fulla cykler under perioden och att SOC varierat mellan 10% och 90%.

I bakgrunden presenteras Bolidens BESS vilket denna studie använt specifikationer från och sedan simulerat. Nedan följer resultat utifrån simulering.

Description	Value	Unit
FCR Revenue Each Year	[87360.0]	EUR
Intraday Revenue Each Year	[1056.0]	EUR
Op. and Maint. Cost each year	[-0.0]	EUR
Investment Costs	740000.00	EUR
Cashflow each year	[88416.0]	EUR
NPV	-654984.62	EUR
IRR	-88.05	%
Profitability Index	0.11	
ROI	-0.89	
Levelized Cost of Storage	4579.71	EUR / MWh

*Figur 16 – Boliden 480kW /1 MWh, Ekonomisk utvärdering*

Det ekonomiska resultatet från Figur 16 visar en negativ ROI om -89% under första året. LCOS är mycket hög på 4 579 €/MWh. Systemet erhåller positivt kassaflöde både från FCR försäljning och deltagande på Intraday-marknaden. Med avseende på grundinvesteringen uppgår systemets totala kostnad till 740 €/kWh

Description	Value	Unit
Efficiency round trip	99.71	%
SOC mean	61.27	%
SOC max	100.00	%
SOC min	40.00	%
Number of changes of signs per day	82.83	
Avg. length of resting times	3.50	min
Pos. energy between changes of sign	1.18	%
Avg. Fulfillment Factor	99.77	%
Remaining capacity	66.92	%
Energy throughput	354146.17	kWh
Equivalent full cycles	177.26	
Avg. depth of cycle for discharge	0.91	%

*Figur 17 – Boliden 480kW /1 MWh, Teknisk utvärdering*

Den tekniska utvärderingen i Figur 17 visar på en DoD (depth of discharge) på 0,91% vilket betyder att batteriet i snitt laddats ur mindre än en procent till uppladdning påbörjas igen. Ca 67% av kapaciteten återstår i batteriet och motsvarande 177 fulla cykler uppnåddes.

## 5.2.2 Högsta ekonomiska nytta

Nedan följer resultatet från ett fiktivt system med mycket lägre investeringskostnad än dagens batteripriser tillåter (Wrålsen & Faessler, 2022).

Description	Value	Unit
FCR Revenue Each Year	[364000.0]	EUR
Intraday Revenue Each Year	[4626.67]	EUR
Op. and Maint. Cost each year	[-0.0]	EUR
Investment Costs	300000.00	EUR
Cashflow each year	[368626.67]	EUR
NPV	54448.72	EUR
IRR	22.88	%
Profitability Index	1.18	
ROI	0.18	
Levelized Cost of Storage	454.38	EUR / MWh

Figur 18 – Fiktivt BESS 2MW/5MWh, Ekonomisk utvärdering

Ur Figur 18 utläses att systemet uppnår lönsamhet redan efter första året med en ROI på 18%. LCOS uppgår till 454 €/MWh vilket är lägre än Wrålsen & Faesslers system men precis högre än systemet med minsta möjliga grundinvestering som anges nedan av Figur 19.

Description	Value	Unit
Efficiency round trip	99.69	%
SOC mean	61.12	%
SOC max	95.94	%
SOC min	40.00	%
Number of changes of signs per day	81.23	
Avg. length of resting times	3.50	min
Pos. energy between changes of sign	0.98	%
Avg. Fulfillment Factor	99.88	%
Remaining capacity	68.11	%
Energy throughput	1446885.51	kWh
Equivalent full cycles	144.82	
Avg. depth of cycle for discharge	0.74	%

Figur 19 – Fiktivt BESS 2MW/5MWh, teknisk utvärdering

Efter simuleringsperioden återstår 68% av kapaciteten vilket utläses av Figur 19. Batteriet uppnår 144 fulla cykler under perioden med ett snittvärde i SOC på 61%.

### 5.2.3 Minsta möjliga lönsamma grundinvestering

Detta område undersökte olika KPIer och värden på dessa när grundinvesteringen och ett positivt kassaflöde går jämnt ut redan första året.

Description	Value	Unit
FCR Revenue Each Year	[182000.0]	EUR
Intraday Revenue Each Year	[1916.25]	EUR
Op. and Maint. Cost each year	[-0.0]	EUR
Investment Costs	175000.00	EUR
Cashflow each year	[183916.25]	EUR
NPV	1842.55	EUR
IRR	5.09	%
Profitability Index	1.01	
ROI	0.01	
Levelized Cost of Storage	440.17	EUR / MWh

Figur 20 – Fiktivt 1MW/2MWh, Ekonomisk utvärdering

Ur Figur 20 går att utläsa en ROI på 1%, alltså att grundinvesteringen täcks av kassaflödet. LCOS uppgår till 440 €/MWh och Grundinvesteringen/kapacitet blir 175 €/kWh.

Description	Value	Unit
Efficiency round trip	99.70	%
SOC mean	60.54	%
SOC max	100.00	%
SOC min	40.00	%
Number of changes of signs per day	117.94	
Avg. length of resting times	1.80	min
Pos. energy between changes of sign	1.02	%
Avg. Fulfillment Factor	99.92	%
Remaining capacity	65.05	%
Energy throughput	871506.64	kWh
Equivalent full cycles	218.13	
Avg. depth of cycle for discharge	0.70	%

Figur 21 - Fiktivt 1MW/2MWh, Teknisk utvärdering

Den tekniska utvärderingen i Figur 21 visar att systemet varierat SOC mellan 40% och 100% med ett snittvärde på 60,5%. Antalet cykler uppgår till 218st och DOD till 0,7%. Batteriet har under användningen degraderat till 65% av den ursprungliga kapaciteten.

## 5.2.4 BESS med återanvända batterier

Flera simuleringar kördes för att undersöka hur 2LB (återanvända batterier) påverkar lönsamhet och hållbarhet. Efter en del konfiguration av parametrar och kostnader utföll resultatet enligt nedan.

Description	Value	Unit
FCR Revenue Each Year	[44600.0]	EUR
Intraday Revenue Each Year	[-18630.0]	EUR
Op. and Maint. Cost each year	[-0.0]	EUR
Investment Costs	100000.00	EUR
Cashflow each year	[25970.0]	EUR
NPV	-75028.85	EUR
IRR	-74.03	%
Profitability Index	0.25	
ROI	-0.75	
Levelized Cost of Storage	711.05	EUR / MWh

Figur 22 – 2LB BESS 300kW/360 kWh, Ekonomisk utvärdering

Inte heller i detta fall lyckades systemet uppnå lönsamhet under den simulerade tidsperioden. LCOS utföll något bättre än systemet Wrålsen & Faessler men högre och därmed sämre än Fortums scenario 1.

Description	Value	Unit
Efficiency round trip	98.88	%
SOC mean	86.02	%
SOC max	100.00	%
SOC min	39.99	%
Number of changes of signs per day	108.44	
Avg. length of resting times	2.12	min
Pos. energy between changes of sign	3.94	%
Avg. Fulfillment Factor	77.38	%
Remaining capacity	10.00	%
Energy throughput	309543.08	kWh
Equivalent full cycles	635.19	
Avg. depth of cycle for discharge	5.83	%

Figur 23 – 2LB BESS 300kW/360 kWh, Teknisk utvärdering

Simuleringen för 2LB med specifikationerna 300kW/360 kWh uppnår inte lönsamhet under den tekniska livslängden. ROI utfaller enligt Figur 23 till -75% vilket är långt från lönsamhet. Batterierna kontrolleras av flera parametrar där alla är satta för att använda batterierna så mycket som möjligt. Detta innebär att systemet körs på ett sätt som nya batterier inte skulle kunna göras

med avseende på garanti, något som intervjun med företaget inom energilager också belyste (AFRY, oktober 2021). Trots en lägre investeringskostnad och mer liberala parametrar lyckas inte systemet ge upphov till ett positivt kassaflöde.

### 5.2.5 Sammanställning och jämförelse av resultat från simulering

Nedan följer en tabell som översiktligt jämför ett urval av mätvärden från simulerade system.

Tabell 8 – Jämförelse av resultat från simulering

System	W/Wh	ROI	LCOS €/MWh	G (€)	Cykler	Avg. DoD
<b>Fortum S.1</b>	5MW/6.2MWh	-81%	665	3 000 000	802	4,7%
<b>Fortum S.2</b>	5MW/6.2MWh	-71%	1510	3 000 000	352	2%
<b>Wrålsen &amp; Faessler</b>	79,7kW/185 kWh	-56%	1212	32 433	158	0,8%
<b>Boliden</b>	480kW/1 MWh	-89%	4579	740 000	177	0,9%
<b>Fiktivt BESS</b>	2MW/5MWh	18%	454	300 000	144	0,7%
<b>Fiktivt BESS</b>	1MW/2MWh	1%	440	175 000	218	0,7%
<b>2LB</b>	300kW/360 kWh	-75%	711	100 000	635	5,8%

I Tabell 8 markeras med röd färg för sämsta och grön färg för bästa uppmätta resultat gällande respektive mätetal. G (Grundinvestering) bedöms inte då inte en lägre investeringskostnad nödvändigtvis presterar bättre.

## 6 Analys & diskussion

Följande avsnitt presenterar analys och diskussion av resultaten från studiens simuleringar samt intervjuer. Avsnittet är uppdelat i tre områden vilka behandlar lönsamhet, hållbarhet och simuleringsprogramvaran.

### 6.1 BESS som en lönsam investering

Ur simuleringen lyckas endast ett resultat visa på lönsamhet under batteriernas livslängd. Detta resultat var dessutom ett fiktivt skapat scenario där batteripriser erhållits till priser långt lägre än marknadspriserna anger i dagsläget. Resterande simuleringar skiljer sig från tidigare forskning som visat dessa vara lönsamma. Denna studie med simuleringsprogramvaran SimSES visar i de flesta fall inte på att BESS är en lönsam investering. Anmärkningsvärda resultat är Boliden 480kW /1 MWh, 2LB BESS 300kW/360 kWh och Fortum 5MW/6.2KWh. Dessa tre system visade alla på en ROI under -70% trots att specifikationerna påstås vara lönsamma av tidigare forskning och artiklar. 2LB systemet använder batterier till en bråkdel av nypris men den degraderade kapaciteten bidrar till att systemet inte uppnår lönsamhet under kvarvarande livstid.

Tidigare forskning anger att ”service stacking” är nyckeln till lönsamhet. I simuleringen med SimSES bidrar ”service stacking” i vissa fall till ett mindre positivt kassaflöde jämfört med om systemet enbart erbjuder marknaden FCR. Studien från Wrålsen & Faessler (2022) angav att simuleringar pekade på en återbetalningstid på ca 7 år för ett givet BESS. I författarnas fall med programvaran SimSES pekar i stället resultatet på att BESS inte blir lönsamt alls eftersom batterierna når EOL innan break-even. Resultaten kompliceras ytterligare av att inget restvärde går att beräkna med programvaran och att kringutrustning som elektronik beräknas som förbrukade efter batterierna når EOL. Kringutrustningen når sannolikt inte EOL vid samma tidpunkt som batterierna och kommer troligen kunna återanvändas. I ett verkligt scenario kommer troligtvis inte en investering i BESS kunna åstadkomma lönsamhet redan efter ett års användning vilket är då simuleringarna tar slut som diskuteras vidare i 6.3. Författarna anser detta vara den främsta anledningen till att de simulerade BESS:en inte visar sig vara lönsamma.

### 6.2 BESS som ett hållbart alternativ

Forskning från bland annat Hidalgo-Leon et al. (2017), Kiviluoma (2013) och Wrålsen och Faessler (2022) har kunnat visa på att BESS kan vara en del i lösningen på problem som uppstår med variationen av elektrisk produktion av vind- och solkraft. Att använda återanvända batterier förlänger den totala livslängden av batteriet jämfört med att använda helt nyproducerade batterier i systemet. I dagsläget råder en viss tveksamhet kring användningen av 2LB eftersom få garantier ges. Intervjuerna presenterade av denna studie anses 2LB som köps in med garantier vara mer värdefulla än 2LB utan garantier trots ett högre pris.

Erhållna resultat från simuleringar med 2LB visar att den lägre kapaciteten i kombination med investeringskostnaderna inte uppnår lönsamhet innan batteriet når EOL (End of Life). Den simulerade degraderingen av batterier av typ 2LB stämmer inte överens med de antal cykler som forskning antyder borde vara möjligt. Data från både Wrålsen och Faessler (2022) eller teorin från Buchmann (2011) antyder att 2LB som används inom en låg DoD bör överleva ca 1000 cykler. I det simulerade fallet når systemets batterier EOL efter 665 cykler.

Ett av de större hållbarhetsproblemen med litiumjon-batterier är att bortskaffningen inte görs ansvarsfullt och att de i väldigt låg grad återvinns. Genom att just förlänga batteriets liv minskar de risker för föroreningar som litiumjon-batterier som hamnar på deponier medför. Detta i samband med en ökad efterfrågan och brist på råvaror kommer kräva en högre grad av återvinning och återanvändning. Det Hannan et al. (2021) tar upp är att 2LB passar som energiförsörjning där det är lägre prestationskrav. Således kan detta tillsammans med återvunna batterikomponenter sänka andelen avfall och växthusgasutsläpp anmärkningsvärt samtidigt som kostnader sjunker.

### 6.3 Simuleringsverktyg

Tillförlitligheten för simuleringarna i denna studie har påvisats vara något bristfällig. Detta då informationen för att göra tillförlitliga simuleringar är svåråtkomlig i samband med att författarna endast har en grundläggande erfarenhet av programmering samt ämnesområdena batterier och elnätet.

Informationsåtkomsten har komplicerat studien i hög grad och därmed gjort kontrollräkningen av liknande scenarion mindre tillförlitlig. Batterier och energilagringssystem är, som studien tydliggjort, synnerligen aktuella ämnen där flertalet företag arbetar på sina egna varianter och delar inte med sig av information som kan äventyra deras position eller framtida position på marknaden. Således är mycket av informationen affärshemligheter och att uppskatta relevanta data försvårar processen och dess tillförlitlighet. I simuleringen som utfördes med återanvända batterier där kostnaden togs från en hemsida som sålde dessa kan exempelvis inte investeringskostnaden som användes vara fullt pålitlig. Detta av anledningen att större företag förmodligen köper in sina återanvända batterier i bulk och får ett nedsatt pris eller som i vissa fall har ett samarbete med något företag som tillgodoser dem med använda batterier från dennes egen affärsverksamhet.

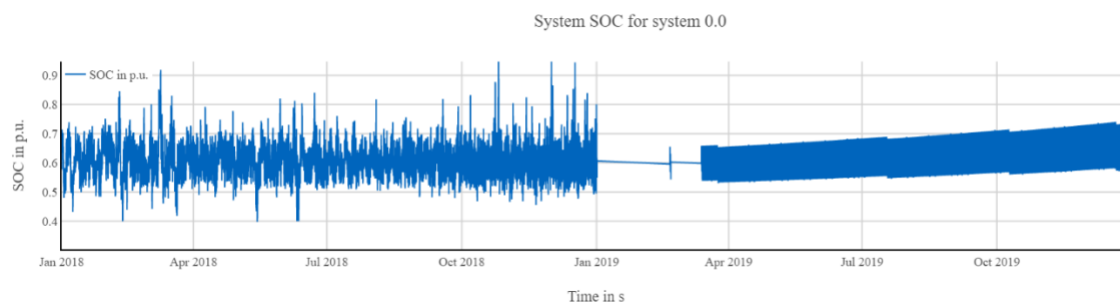
Utöver detta kräver tillförlitliga resultat att det utförs simuleringar med längre tidsspann vilket tar lång tid att simulera. Det krävs många olika mindre justeringar av parametrarna och flertalet simuleringar för att analysera skillnaderna vilket komplicerar studien i samband med att tillförlitliga simuleringar tar lång tid.

När det kommer till tillförlitligheten hos programvaran SimSES återfinns en del aspekter som påverkar denna. Vid simuleringar längre än ett år verkar något fel uppstå och batteriet arbetar inte som det ska under antingen en signifikant tidsperiod eller resterande tidsperiod tills det dör. Detta

märks i Figur 24 nedan då batteriet stagnerar mellan januari 2019 och april 2019. Det återfinns ingen tydlig förklaring till detta plötsliga stopp i simuleringen och det är något som sänker tillförlitligheten för simuleringarna. Att simuleringarna alltid skulle avslutas vid årsskiftet oavsett val av parametrar är högst osannolikt. Författarna kan endast anta vad som är anledningen till dessa problem och en möjlig orsak skulle kunna vara lastprofilerna som inte är konstruerade korrekt för detta ändamål. Ännu en aspekt i SimSES som påverkar tillförlitligheten är brist i valmöjligheter när det kommer till att köpa och sälja el. Författarna har inte lyckats fullt förstå hur denna process fungerar i simuleringen då det verkar ske automatiskt, men anser att en funktion där en själv får välja vilket pris BESS:en ska köpa respektive ett pris det ska sälja på hade ökat tillförlitligheten.

Som tidigare nämnt har service stacking tydligt påvisats både från teori och tidigare forskning att vara mest lönsamt. Detta verkar ändå inte påvisa den lönsamhet som kan förväntas och författarna lyckas inte få detta att fungera på ett trovärdigt sätt i simuleringen. Vad som erfordras är att systemet ska köpa elektricitet billigt och sälja dyrt, men det finns ingen tydlig förklaring till vilket pris som säljs för.

Således anser författarna att mer förståelse för programvaran och batterier skulle öka tillförlitligheten, men också att en del aspekter i programvaran borde förbättras för att åstadkomma mer tillförlitliga resultat.



*Figur 24 – Fel i simulering*

## 7 Slutsats & förslag till fortsatt forskning

I följande avsnitt presenteras svar på de frågeställningar som inledningsvis formulerades i studien. Dessutom framförs förslag till hur fortsatt forskning kan gå till väga och vad som är intressant att vidare undersöka.

### 7.1 Slutsats

Slutsatsen efter studiens simuleringar och jämförande av resultat med tidigare forskning är att det med säkerhet inte går att använda SimSES för att tillförlitligt mäta lönsamhet. Programvaran kan vara ett bra redskap i syfte att förstå hur BESS interagerar med elnätet samt på en konceptuell nivå användas till grova uppskattningar i ekonomisk nytta exempelvis i intäkter från frekvensreglering. SimSES och dess resultat från simuleringar bör inte som ensam källa användas för att ta beslut gällande effekt, kapacitet eller budget för grundinvesteringen. Resultatet från simuleringen visar inte att 2LB skulle vara ett bättre ekonomiskt alternativ än 1LB med det underlag av priser som studien använt. Studien kan dock bekräfta tidigare forskning i att användandet av 2LB har en rad fler positiva aspekter gällande hållbarhet än 1LB som exempelvis reduktion av utsläpp och avfall. Studien kan inte heller säkerställa tillförlitlighet hos programvaran avseende att simulera den ekonomiska nyttan då både viktig information samt kunskap inom området saknas.

Vidare kan tilläggas att fortsatt sjunkande batteripriser och en ökad produktion av vind- och solkraft skulle gynna marknaden för BESS. Lönsamhet skulle då bli lättare att uppnå eftersom batterierna för närvarande är systemets största kostnad.

### 7.2 Förslag till fortsatt forskning

Det finns säkerligen skäl och möjlighet att fortsätta studien då det är ett allt växande område där forskningen inte kommer trappas ner inom överskådlig tid. Vad som framför allt kan göras är att vidare utforska och läsa sig in i SimSES då det är ett komplicerat program som för en novis kräver mycket inläsning samt många försök. Genom vidare inläsning på programvaran kan säkerligen några av de problem som vi själva stött på lösas och den kunnige inom programmering skulle kunna lägga till eller ändra på funktioner.

Dessutom är det relevant att fortsätta sätta sig in i ämnesområdet batterier och energilagring då alltmer forskning görs i området och det finns en del alternativ som förutspås vara mer fördelaktiga än litium-jon batterier både hållbarhetsmässigt och lönsamhetsmässigt. Både andra typer av batterier samt andra typer av energilagring är något som hade varit intressant att fortsätta forska på. Exempelvis nämns lagring i komprimerad luft (CAES) eller pumpkraftverk (PSH) som andra alternativ.

## Referenser

- AFRY AB. (16 september 2021). Intervju med ett elbolag på västkusten
- AFRY AB. (21 oktober 2021). Intervju med ett företag inom energilagring
- AFRY AB. (15 november 2021). Intervju med ett företag inom Virtual Power Plant (VPP)
- Andersson, G. (2013). *Kalkyler som beslutsunderlag* (Sjunde upplagan). Studentlitteratur.
- Bryman, A., & Bell, E. (2011). *Business Research Methods* (3 uppl.). Oxford University Press.
- Bryman, A., & Bell, E. (2015). *Business Research Methods* (4 uppl.). Oxford University Press.
- Buchmann, I. (2011). *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers, Third Edition* (3rd ed.). Cadex Electronics Inc.
- CNBC. (27 maj 2021). *How Tesla Is Quietly Expanding Its Energy Storage Business* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=x3aqWJO4Rso>
- Dehghani-Sanij, A. R., Tharumalingam, E., Dusseault, M. B., & Fraser, R. (2019). Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 192–208. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.023>
- Eldabi, T., Irani, Z., Paul, R. J., & Love, P. E. (2002). Quantitative and qualitative decision-making methods in simulation modelling. *Management Decision*, 40(1), 64–73. <https://doi.org/10.1108/00251740210413370>
- FN. (28 december 2021). *Om globala målen*. <https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/>
- Hannan, M. A., Al-Shetwi, A. Q., Begum, R. A., Jern Ker, P., Rahman, S. A., Mansor, M., Mia, M. S., Muttaqi, K. M., & Dong, Z. Y. (2021). Impact assessment of battery energy storage systems towards achieving sustainable development goals. *Journal of Energy Storage*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103040>
- Hedenus, F., Persson, M., & Sprei, F. (2018). *Hållbar utveckling - nyanser och tolkningar* (1:3 uppl.). Studentlitteratur.
- Hidalgo-Leon, R., Siguenza, D., Sanchez, C., Leon, J., Jacome-Ruiz, P., Wu, J., & Ortiz, D. (oktober, 2017). A survey of battery energy storage system (BESS), applications and

environmental impacts in power systems. *2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*. <https://doi.org/10.1109/etcm.2017.8247485>

Holmström, C. H. (1 juni 2021). *Elproduktion*. Ekonomifakta. Retrieved February 11, 2022, from <https://www.ekonomifakta.se/fakta/energi/energibalans-i-sverige/elproduktion/>

*Intraday trading*. (n.d.). Next Kraftwerke. Hämtad 11 maj, 2022 från <https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/intraday-trading>

Kirkerud, J., Nagel, N., & Bolkesjø, T. (2021). The role of demand response in the future renewable northern European energy system. *Energy*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121336>

Kiviluoma, J. (September 2013). *Managing wind power variability and uncertainty through increased power system flexibility*. VTT Technical Research Centre of Finland. [https://www.researchgate.net/publication/263007788\\_Managing\\_wind\\_power\\_variability\\_and\\_uncertainty\\_through\\_increased\\_power\\_system\\_flexibility](https://www.researchgate.net/publication/263007788_Managing_wind_power_variability_and_uncertainty_through_increased_power_system_flexibility)

Möller, M., Kucevic, D., Collath, N., Parlikar, A., Dotzauer, P., Tepe, B., Englberger, S., Jossen, A., & Hesse, H. (2022). SimSES: A holistic simulation framework for modeling and analyzing stationary energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, 49, 103743. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103743>

Naumann, M., & Truong, C. N. (1 november 2017). SimSES: Software for techno-economic Simulation of Stationary Energy Storage Systems. VDE Conference Publication | IEEE Xplore. [doi:10.1109/2017mp1401541](https://doi.org/10.1109/2017mp1401541)

Nohrstedt, L. (15 februari 2022). Här gör batteriet nytta på flera olika sätt. *Ny Teknik*. <https://www.nyteknik.se/premium/har-gor-batteriet-nytta-pa-flera-olika-satt-7028762>

Pellow, M. A., Ambrose, H., Mulvaney, D., Betita, R., & Shaw, S. (2020). Research gaps in environmental life cycle assessments of lithium ion batteries for grid-scale stationary energy storage systems: End-of-life options and other issues. *Sustainable Materials and Technologies*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00120>

*Second Life EV Batteries Ltd - Used electric car (EV) batteries*. (n.d.). Second Life EV Batteries Ltd. Hämtad 19 maj, 2022, från <https://www.secondlife-evbatteries.com/>

Svenska kraftnät. (10 februari 2022). *Förbrukningsprofiler*. Mimer. <https://mimer.svk.se/ConsumptionProfile/ConsumptionProfileIndex>

Statistiska centralbyrån. (2020). *Statistikdatabasen*. SCB. Hämtad 24e maj 2022, från <https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/>

Wali, S. B., Hannan, M. A., Jern Ker, P., Rahman, M. A., Mansor, M., Muttaqi, K. M., Mahlia, T. M. I., & Begum, R. A. (2022). Grid-connected lithium-ion battery energy storage system: A bibliometric analysis for emerging future directions. *Journal of Cleaner Production*, 334, 130–272. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130272>

Wolf, A., Sandels, C., & Shepero, M. (maj 2020). *LOKAL ENERGILAGRING ELLER TRADITIONELLA NÄTFÖRSTÄRKNINGAR?* (No. 47410–1). Energimyndigheten Sverige.

Wrålsen, B., & Faessler, B. (2022). Multiple Scenario Analysis of Battery Energy Storage System Investment: Measuring Economic and Circular Viability. *Batteries*, 8(2), 7. <https://doi.org/10.3390/batteries8020007>

## Figurförteckning

Buchmann, I. (2011). *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers, Third Edition* (3rd ed.). Cadex Electronics Inc.

FN. (7 april 2022). *Logotyper*. <https://www.globalamalen.se/material/logotyper/>

Hannan, M. A., Al-Shetwi, A. Q., Begum, R. A., Jern Ker, P., Rahman, S. A., Mansor, M., Mia, M. S., Muttaqi, K. M., & Dong, Z. Y. (2021). Impact assessment of battery energy storage systems towards achieving sustainable development goals. *Journal of Energy Storage*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103040>

Hidalgo-Leon, R., Siguenza, D., Sanchez, C., Leon, J., Jacome-Ruiz, P., Wu, J., & Ortiz, D. (oktober, 2017). A survey of battery energy storage system (BESS), applications and environmental impacts in power systems. *2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*. <https://doi.org/10.1109/etc.2017.8247485>

Kiviluoma, J. (2013, September). *Managing wind power variability and uncertainty through increased power system flexibility*. VTT Technical Research Centre of Finland. [https://www.researchgate.net/publication/263007788\\_Managing\\_wind\\_power\\_variability\\_and\\_uncertainty\\_through\\_increased\\_power\\_system\\_flexibility](https://www.researchgate.net/publication/263007788_Managing_wind_power_variability_and_uncertainty_through_increased_power_system_flexibility)



**CHALMERS**